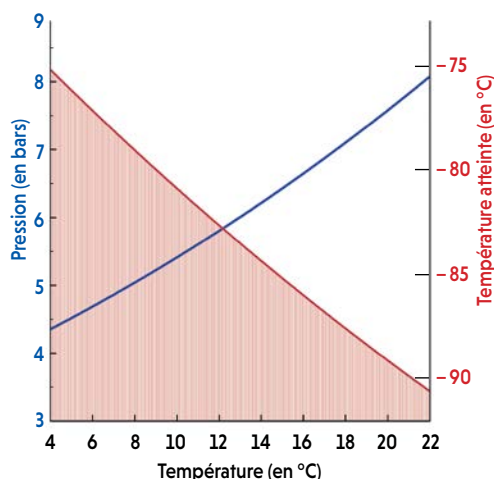




Ces deux graphiques montrent, en fonction de la température de la bouteille bouchée, la pression partielle de CO₂ régnant dans le col de la bouteille (en bleu) et la température atteinte par le nuage de gaz carbonique après que le bouchon a sauté (en rouge).

rappelons-le, est formé d'environ 85% d'eau en volume. La teneur en vapeur d'eau dans le col d'une bouteille augmente avec sa température, selon une loi connue (la loi de Clausius-Clapeyron). Elle passe de 0,9% dans le col d'une bouteille à 6 °C, à environ 2,3% pour une bouteille à 20 °C.

Comme on l'a vu, lorsque le bouchon saute, les gaz initialement sous pression dans le col d'une bouteille se détendent et leur température chute à plusieurs dizaines de degrés sous la température de congélation de l'eau. Il fait alors si froid que la vapeur d'eau se transforme instantanément en cristaux de glace d'eau *ex nihilo* (c'est-à-dire sans que la présence de noyaux de condensation soit nécessaire), à la différence du gaz carbonique. Ce sont donc les cristaux de glace d'eau nés dans le col de la bouteille qui servent de noyaux solides pour la condensation du gaz carbonique en neige carbonique.

Des phénomènes similaires ont été mis en évidence dans le mélange gazeux qui se détend dans les tuyères des moteurs de fusées (voir la photographie page précédente). Là aussi, les gaz les plus facilement condensables (en général l'eau et le CO₂) servent de noyaux solides qui rendent possible la condensation des espèces présentant des températures de condensation bien plus basses (tels que le dioxygène et le diazote).

Le panache bleu azur qui apparaît dans le sillage du bouchon qui saute et dans le col de la bouteille serait donc la signature de la transformation des vapeurs de CO₂ en cristaux de neige carbonique. Mais pourquoi ce panache est-il bleu, alors que le nuage de condensation de la vapeur d'eau ambiante qui caractérise le débouchage des bouteilles plus froides apparaît plutôt blanc ?

Cette couleur bleue a certainement pour origine la très petite taille des cristaux de neige carbonique qui diffusent la lumière ambiante. En effet, lorsque les cristaux qui diffusent la lumière sont de taille très inférieure aux

longueurs d'onde du spectre de la lumière ambiante (centrée autour de 0,6 micromètre environ), ils diffusent bien plus efficacement les petites longueurs d'onde du spectre, et donc la lumière bleue. Le nuage de condensation apparaît alors bleuté et non pas blanc comme dans le cas de la diffusion de Mie, où la taille des objets qui diffusent la lumière est comparable à celle de la longueur d'onde incidente.

COMME LE BLEU DU CIEL

Ce mode de diffusion de la lumière par des particules plus petites que les longueurs d'onde incidentes est connu sous le nom de diffusion de Rayleigh (d'après le physicien anglais John Rayleigh, ou Lord Rayleigh, 1842-1919). C'est d'ailleurs le même phénomène qui explique pourquoi le ciel nous apparaît bleu. Les molécules qui composent l'atmosphère de notre planète sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière solaire. Le bleu est donc bien plus efficacement diffusé que les autres couleurs du spectre, et c'est pourquoi l'atmosphère terrestre nous apparaît de cette couleur (voir la photographie page précédente).

Et si le nuage de condensation du gaz carbonique ne blanchit pas hors du goulot de la bouteille, c'est parce que les cristaux de neige carbonique dont il est constitué ne peuvent pas croître suffisamment pour atteindre des tailles micrométriques, qui le feraient paraître blanc par diffusion de la lumière ambiante. En effet, l'air ambiant, à une vingtaine de degrés Celsius, agit comme un immense réservoir thermique. Très vite, la température du nuage de condensation remonte alors au-dessus des -78,5 °C fatidiques, et les cristaux de neige carbonique se subliment pour se transformer en gaz carbonique. Ainsi, au bout de quelques millisecondes, le nuage bleu s'évanouit au-dessus du goulot.

Cependant, confiné dans le goulot de la bouteille, le nuage de condensation est protégé du réservoir thermique un peu plus longtemps. Les cristaux de neige carbonique sont donc susceptibles de croître autour de leur cœur de glace d'eau. Ils atteignent alors des tailles micrométriques et le nuage de condensation présent dans le goulot change progressivement de couleur. Il vire du bleu profond au blanc-gris, comme on peut clairement le constater sur les photographies reproduites.

En d'autres termes, pour ce qui est de la diffusion de la lumière ambiante, on passe progressivement d'un régime de Rayleigh, dû à des cristaux de taille très inférieure aux longueurs d'onde de la lumière ambiante, à un régime de Mie lorsque la taille des cristaux de neige carbonique devient comparable ou supérieure à ces longueurs d'onde. Le nuage bleu visible lors du débouchage d'une bouteille de champagne à température ambiante et son changement de couleur n'ont ainsi plus de mystères... ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Liger-Belair et al., **Unveiling CO₂ heterogeneous freezing plumes during champagne cork popping**, *Scientific Reports*, vol. 7, article 10938, 2017.

G. Liger-Belair et al., **Un océan dans une flûte de champagne**, *Pour la Science*, n° 459, pp. 36-41, janvier 2016.

M. Vollmer et K.-P. Möllmann, **Vapour pressure and adiabatic cooling from champagne : Slow-motion visualization of gas thermodynamics**, *Physics Education*, vol. 45, pp. 608-615, 2012.

B. E. Wyslouzil et al., **Binary condensation in a supersonic nozzle**, *Journal of Chemical Physics*, vol. 113, pp. 7317-7329, 2000.

R. Batt, **Pop ! Goes the champagne bottle cork**, *Journal of Chemical Education*, vol. 48, p. 75, 1971.

RONAN ALLAIN

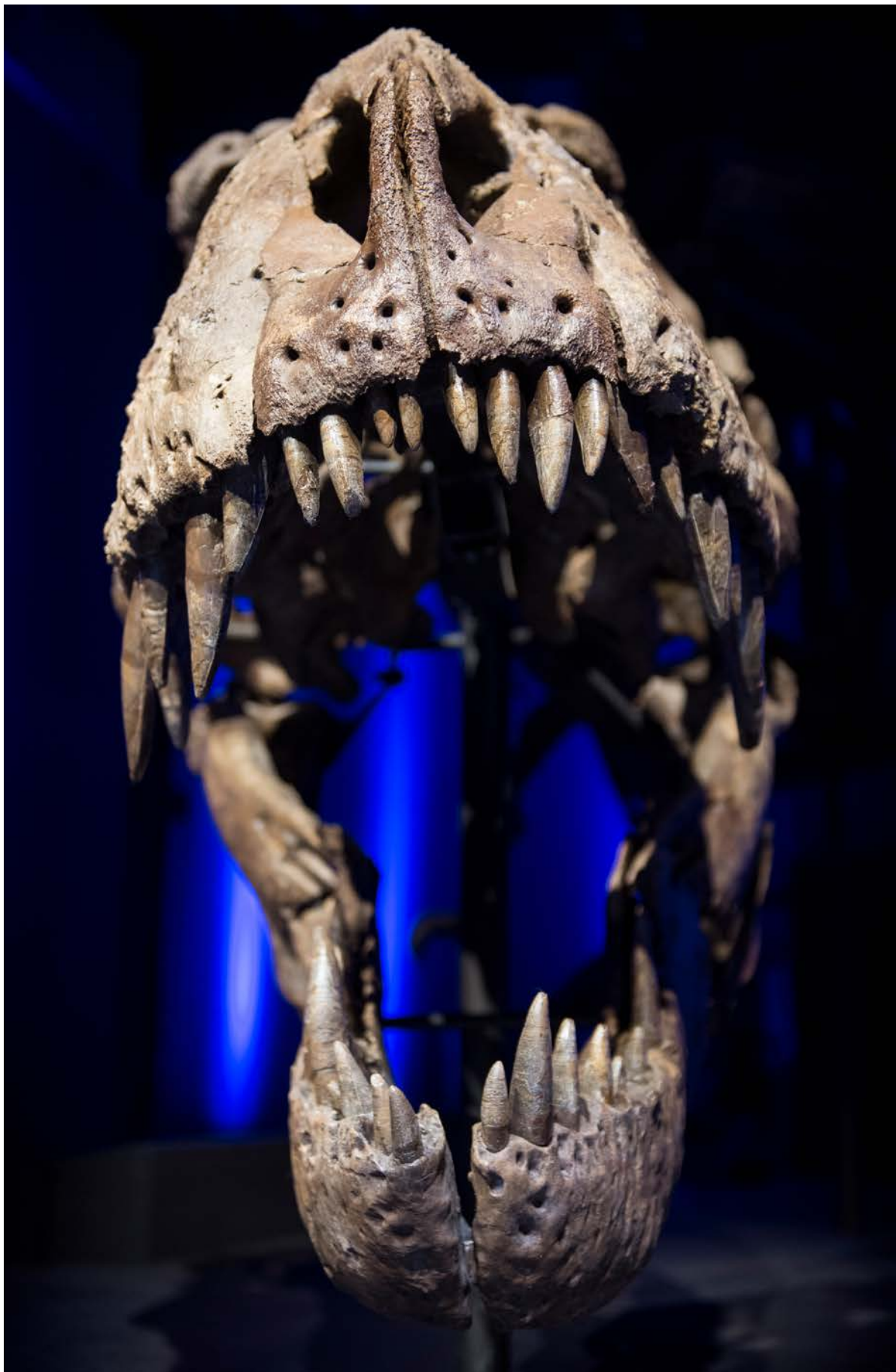
est le paléontologue chargé de la conservation des collections de reptiles et d'oiseaux fossiles au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Spécialiste des dinosaures, il participe aux fouilles du site d'Angeac-Charente, qui a livré de nombreux squelettes de dinosaures, notamment un fémur de sauropode de 2,3 mètres de long.



Trix, le premier T. rex jamais exposé en France



Pendant tout l'été, le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, présente Trix, une femelle tyrannosaure découverte dans le Montana. Ronan Allain, commissaire scientifique de l'exposition, nous raconte la vie de cet hypercarnassier du Crétacé.



L'exposition « Un T. rex à Paris » se tiendra au Jardin des plantes du 6 juin au 2 septembre 2018. Pourquoi le Muséum national d'histoire naturelle consacre-t-il cette exposition de paléontologie à une unique espèce de dinosaure ?

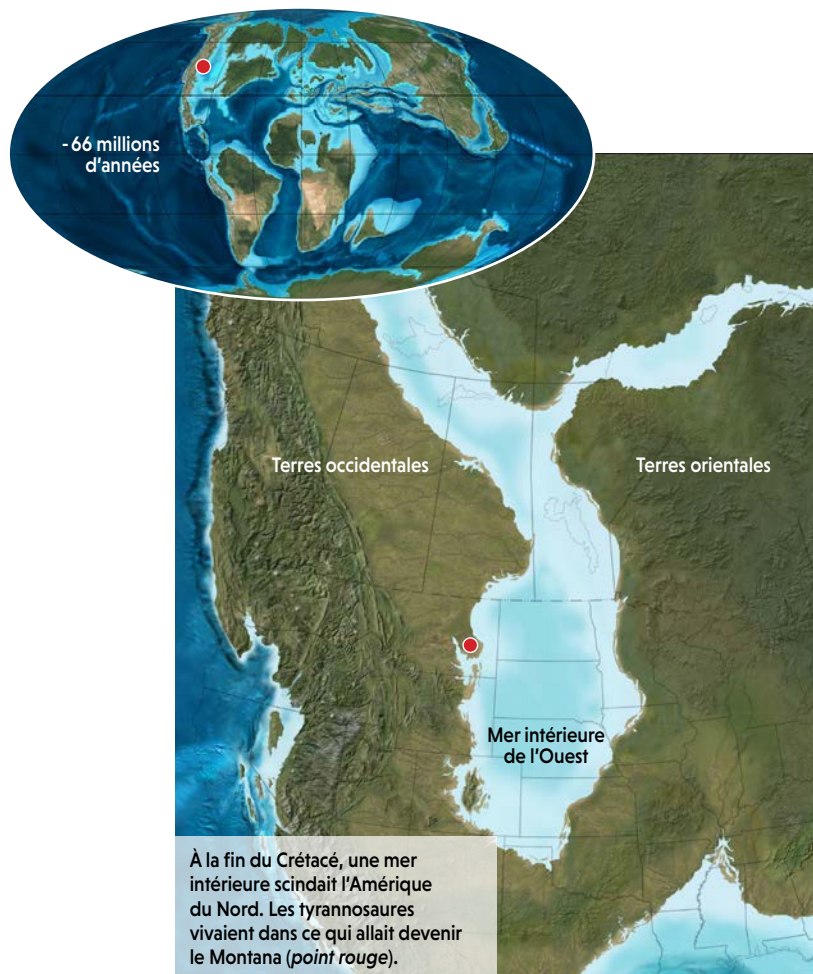
Parce que *Tyrannosaurus rex* est une espèce spectaculaire ! Or les études des dernières années nous la font connaître de mieux en mieux. Nous avons donc voulu consacrer une exposition à cette espèce emblématique. Pour cela, nous faisons venir à Paris le squelette de tyrannosaure que nos collègues du centre de biodiversité Naturalis de Leyde, aux Pays-Bas, ont mis au jour. Après une partie qui contextualise le tyrannosaure dans le temps et l'espace et qui aborde l'histoire de ses découvertes, nous y présenterons l'animal en pied dans la position qu'il devait adopter lorsqu'il était en chasse.

Le nom de l'exposition « Un T. rex à Paris » est une allusion à la célèbre comédie musicale ?

À l'origine, j'avais même proposé « Une Américaine à Paris », car c'est vraiment une vieille dame américaine qui nous rend visite.

Car ce squelette vient d'Amérique...

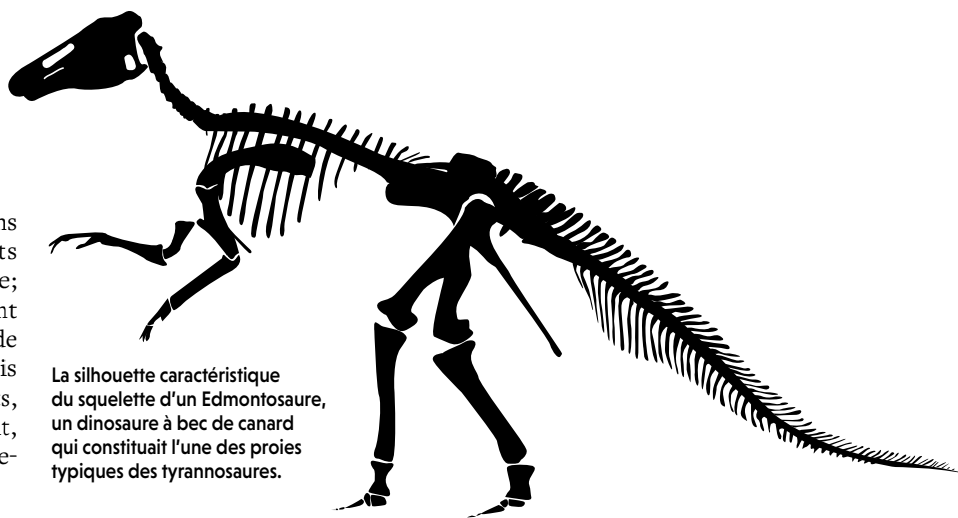
Oui, de la formation géologique de Hell Creek. Cette formation que ses fossiles ont rendue célèbre se trouve quelque 50 kilomètres au sud de la ville de Jordan dans le Montana.



Qu'est-ce qui fait de *T. rex* une espèce si emblématique : ses grandes dents ?

Certes ! Mais surtout le fait qu'elle soit dans la culture de tout un chacun. Nos enfants jouent avec des répliques de *T. rex* en plastique ; nous avons tous vu et aimé *Jurassic Park*, dont un énième avatar va sortir en juin, le jour de l'ouverture de l'exposition justement ; depuis ce film, le *T. rex* est partout, sur les T-shirts, dans les bandes dessinées, etc. Pour autant, cette espèce et surtout son histoire sont largement méconnues en Europe...

La silhouette caractéristique du squelette d'un Edmontosaure, un dinosaure à bec de canard qui constituait l'une des proies typiques des tyrannosaures.



Comment cela ?

Peu de gens sur notre continent ont repéré qu'il n'y a eu de *T. rex* qu'en Amérique ; et seulement pendant les deux derniers millions d'années précédant la chute de la météorite qui a mis fin à la domination des dinosaures dans tous les écosystèmes terrestres, il y a 66 millions d'années...

Cela signifie-t-il que les tyrannosaures ont évolué sur le continent américain ?

Non, pas vraiment, car il faut distinguer l'histoire évolutive de *Tyrannosaurus rex*, espèce exclusivement américaine de genre *Tyrannosaurus*, de celle, beaucoup plus complexe de la superfamille des tyrannosauroïdes. La persistance jusqu'au tyrannosauridés, c'est-à-dire jusqu'au genre *Tyrannosaurus*, de certains traits anatomiques au sein de cette superfamille nous a permis d'identifier des tyrannosauroïdes en Europe et en Asie dès le Jurassique moyen, il y a 165 millions d'années. Cela suggère qu'au Jurassique, des tyrannosauroïdes ont vécu sur tous les continents. Ces animaux, qui mesuraient moins de quatre mètres, étaient bien plus modestes que leurs descendants tyrannosauridés...

Ensuite, à partir du début du Crétacé supérieur, il y a quelque 100 millions d'années, on ne trouve des membres de ce genre qu'en Asie et en Amérique du Nord. Finalement, au Maastrichtien, la dernière période du Crétacé

(qui dura environ six millions d'années), les tyrannosaures de Mongolie comme le *Tarbosaurus* étaient très proches de ceux de l'ouest de l'Amérique du Nord. En effet, comme nous l'expliquons dans la première partie de l'exposition, pendant le Crétacé, ce qui allait devenir le continent nord américain actuel était alors scindé par une mer, la mer intérieure de l'Ouest, et l'on n'a jamais découvert de tyrannosaures dans l'est de l'Amérique du Nord.

Les tyrannosaures vivaient donc sur les terres occidentales. Le fait que l'on ait retrouvé des fossiles de tyrannosauroïdes en Alaska suggère par ailleurs une circulation des tyrannosauridés entre l'Asie et les terres occidentales de l'Amérique du Nord. Faut-il voir là l'origine de la proximité entre les tyrannosauridés maasrichtiens asiatiques et *Tyrannosaurus* ?

Et dans quel genre d'environnement vivaient ces animaux ?

La formation de Hell Creek est composée en grande partie de grès et de mudstones – une fine roche sédimentaire faite de boue consolidée – attribués à de basses plaines côtières marécageuses, à des estuaires et à d'autres environnements fluviaux ou lacustres, mais en tout cas à des zones humides sous climat chaud. La température moyenne terrestre était alors proche de 20 °C. Depuis le début du Crétacé, les angiospermes, en d'autres termes les plantes à fleurs, avaient envahi la nature auparavant occupée seulement par les gymnospermes, c'est-à-dire par les conifères. Les paysages ressemblaient donc à ceux que nous connaissons aujourd'hui dans certaines régions tropicales comme la Floride. La végétation était assez dense, pour que les superprédateurs que sont les tyrannosaures puissent se dissimuler et prendre leurs proies par surprise...

Parmi eux, Trix, le spécimen bientôt exposé à Paris. Qu'a-t-il de si remarquable ?

Tout d'abord, il est exceptionnellement bien conservé. Après les quelques spécimens de tyrannosaures exhumés dans les années 1900, plus aucune découverte notable n'a eu lieu jusque dans les années 1990. Depuis, les ➤

À part eux-mêmes, aucun animal n'attaquait les *T. rex* !

> chercheurs privés du Wyoming et du Montana ont produit plusieurs beaux squelettes, notamment Sue, complète à 85%, Scotty, complet à 70% et Stan, complet à 65%. Dans l'étude des tyrannosaures, la découverte de Trix n'a donc rien d'anodin: même si seulement la moitié de ses os ont été découverts, ils représentent de 75 à 80% du volume osseux, ce qui fait de Trix l'un des tyrannosaures les mieux conservés. Par ailleurs, l'animal est imposant: vivant, il a dû peser 5 tonnes et mesurer de 4 à 5 mètres de haut pour une longueur de 12 mètres... Finalement, on s'est aperçu que cette robuste femelle a probablement atteint une trentaine d'années – la durée de vie maximale des tyrannosaures, sans doute...

Comment sait-on que Trix est une femelle ?

Cette attribution découle de l'interprétation que font nombre de paléontologues – notamment ceux de l'institut de recherche géologique des Black Hills, qui a aidé le centre Naturalis à découvrir Trix – de l'existence de deux types de squelettes de tyrannosaures. Le premier, très robuste, serait celui des femelles et le second, nettement plus gracile, celui des mâles. Pour ces paléontologues, cette interprétation est corroborée par la présence, dans les parties internes de certains os des spécimens robustes, de tissus enrichis en calcium, qui auraient facilité la production d'œufs. Trix, notamment de par les proportions de ses pattes, est clairement du type robuste. Nos collègues hollandais veulent mener de plus amples explorations à la recherche de réserves de calcium, mais ils estiment à ce stade que Trix est «très probablement» une femelle. Quoi qu'il en soit, ils ont nommé leur spécimen Trix en hommage à la reine Béatrix. Cela fait donc de leur *T. rex* une sorte de «reine des tyrannosaures»...

Comment décririez-vous Trix ou un tyrannosaure en quelques mots ?

Les tyrannosaures sont les plus gros prédateurs que la Terre ait jamais portés. Le corps de ces hypercarnivores bipèdes dénués de plumes était organisé afin de porter une énorme tête – celle de Trix mesure 1,5 mètre de long. Leur gueule était pleine de longs crocs similaires les uns aux autres qu'ils enfonçaient profondément dans la chair de leurs proies afin de les maintenir. Terminées par seulement deux doigts, leurs pattes antérieures avaient régressé en taille, ce qui déséquilibrait moins un animal qui compensait le poids de sa tête par sa queue. Leurs yeux étaient orientés vers l'avant de la face, ce qui leur permettait une vision stéréoscopique (en 3D) comparable à la nôtre. Très puissantes, les pattes postérieures étaient adaptées à une bipédie permanente et à une course qui ne devait pas être très rapide – avec des pointes à 20 kilomètres par heure,



peut-être – suffisantes pour rattraper les lourds dinosaures herbivores qu'ils chassaient...

Justement, quelles étaient leurs proies ?

Il pouvait s'agir de tricératops, d'ankylosaures, de dinosaures à bec de canard... Nous présentons un membre de cette dernière famille dans l'exposition: un *Edmontosaurus*, un dinosaure à bec de canard qui, d'après ce que l'on a compris, aimait vivre dans les plaines côtières; il pouvait peser jusqu'à 4 tonnes et mesurer jusqu'à 13 mètres de long. Le squelette de celui que le Muséum national d'histoire naturelle possède depuis un siècle mesure 8 mètres de long. Grande première: Trix nous donne l'occasion de le sortir des réserves pour l'exposer, ce que nous ferons en le présentant en position couchée.

Les tyrannosaures avaient-ils des prédateurs ?

À part eux-mêmes, ce qui est envisagé, aucun animal n'attaquait les *T. rex*!

Pourtant, Trix a eu une vie mouvementée ?

En effet ! Pendant les fouilles, nos collègues hollandais ont découvert les traces de blessures et de maladies sur certains os. Cela suggère que la vieille dame Trix en a vu au cours de sa vie: un os de sa jambe droite et une de ses côtes présentent des excroissances, signes possibles de fractures ou d'infection; ses mâchoires ont subi des dommages considérables: une infection du maxillaire droit et une morsure d'un autre tyrannosaure sur la mâchoire inférieure

Pour survivre, un tyrannosaure devait absolument éviter de se faire briser la patte par les puissants dinosaures herbivores qu'il chassait. Dans cette restitution, l'un d'eux, un ankylosaure, se défend à l'aide de sa queue en forme de masse d'arme.

UN T. REX À PARIS

Au Jardin des plantes, du 6 juin au 2 septembre 2018.





gauche. On peut imaginer des interactions rudes avec un mâle *T. rex* pendant l'accouplement, ou un combat autour d'une proie... Le sacrum et la première vertèbre caudale montrent un développement inégal qui pourrait suggérer une malformation congénitale ou une blessure subie pendant la jeunesse...

Si le *T. rex* n'avait aucun prédateur à part lui-même, un coup de corne de tricératops pouvait être létal. Les tricératops étaient en effet de véritables chars d'assaut, cuirassés et massifs, qui de plus vivaient en troupes, ce qui ne devait pas les rendre faciles à terrasser. Un autre dinosaure herbivore à armure, l'ankylosaure, était pour sa part muni d'une queue en forme de masse d'arme. Un coup de queue d'ankylosaure aurait pu briser la jambe d'un tyrannosaure, qui, dès lors, n'aurait plus pu se nourrir. Pour avoir survécu aussi longtemps, Trix, comme tous les grands prédateurs, a dû être d'une très grande prudence. S'il y a beaucoup de traces de blessures sur son squelette, la plupart sont cicatrisées et ne semblent pas être à l'origine de sa mort. Trix est morte tranquillement, après s'être couchée dans son coin...

Comment a-t-on déterminé son âge ?

Pour survivre, les jeunes tyrannosaures devaient grandir très vite, mais leur croissance marquait un arrêt chaque année pendant l'hiver. Si l'on admet qu'une ligne d'arrêt de croissance représente un an, alors il suffit de compter ces lignes pour trouver l'âge d'un dinosaure juvénile. Toutefois, les reptiles sont différents de nous qui arrêtons de grandir : leur croissance est continue, de sorte que pour continuer à croître, ils en viennent à dissoudre l'intérieur de leur os pour le réutiliser à l'extérieur de celui-ci. Les petites baies de dissolution correspondantes se voient très bien sur une lame mince. Chez Trix, cette dissolution est si avancée que l'on ne voit pratiquement plus les lignes d'arrêt de croissance. C'est ainsi que la comparaison avec d'autres individus nous a montré qu'elle est plus vieille, en fait la plus vieille de tous les tyrannosaures que l'on a trouvés : on estime qu'elle a vécu plus de 27 ans, voire 30 ans.

Quelles sont les autres recherches menées sur le squelette de Trix ?

Ces recherches n'ont pas encore été publiées, mais elles incluent sa datation – entre 67 et 66 millions d'années – par des méthodes géologiques et paléomagnétiques, ainsi que des études histologiques et une tomographie du crâne de Trix.

Que confirme par exemple l'étude du crâne ?

Que *Tyrannosaurus* avait un coefficient d'encéphalisation – un paramètre qui, au sein d'une lignée, caractérise le rapport entre la

masse du cerveau et celle du corps – intermédiaire entre celui des premiers dinosaures et celui des dinosaures actuels, c'est-à-dire des oiseaux. C'est logique : ne volant pas, il n'avait pas développé les volumineux circuits cérébraux du vol. Le scan nous a confirmé par ailleurs l'importance des lobes olfactifs, ce qui confirme une fois de plus que les tyrannosaures se servaient beaucoup de l'odorat pour déterminer la présence de proies et sans doute celle de dangereux concurrents à éviter...

Cela a-t-il un rapport avec la position dans laquelle le dinosaure sera présenté ?

Tout à fait : après avoir complété son squelette à partir de celui de Sue qui est de corpulence comparable, Trix a été montée dans une position dynamique, en train de marcher le museau très bas et la queue relevée pour équilibrer le poids de la tête. Nous la montrons non pas comme le gros animal pataud et quasi debout que l'on représentait au ^{xx}e siècle, mais telle que cette prédatrice se tenait probablement alors qu'elle progressait en surveillant et en reniflant toutes les odeurs émanant du sol ou apportées par le vent.

Quelles questions les paléontologues se posent-ils encore sur *T. rex* ?

Nous n'avons pas d'œufs de tyrannosaures. Si nous en avions, nous pourrions progresser quant à la croissance de ces animaux, mais aussi sur leur comportement social. Comment se passait l'élevage des petits ? Se rassemblaient-ils pour se protéger mutuellement ? Les tyrannosaures s'associaient-ils aussi pour chasser ?

Outre ses magnifiques fossiles et leur contexte scientifique, que contient cette exposition ?

Nous l'avons conçue pour le grand public, de sorte que nous lui avons adjoint une troisième partie ludique, plus particulièrement destinée aux enfants : ils pourront se comparer à un tyrannosaure juvénile sous la forme d'un hologramme ou encore tenter d'échapper à vélo à un tyrannosaure, etc.

Bref, l'exposition qu'il faut avoir vue pour connaître la science des tyrannosaures avant de visionner un énième *Jurassic World*...

En effet, puisque dans le film qui va sortir, les tyrannosaures et les autres dinosaures sont supposés clonés et modifiés génétiquement ! Vous conviendrez que pareil parti pris n'a plus grand-chose à voir avec ce que la paléontologie peut dire sur ces animaux qui vivaient non pas au Jurassique, mais à la toute fin du Crétacé... ■

PROPOS RECUEILLIS
PAR FRANÇOIS SAVATIER

BIBLIOGRAPHIE

S. Brusatte, *L'ascension des tyrannosaures*, Pour la Science, n° 456, 2015.

A. R. Fiorillo et R. S. Tykoski, *A diminutive new Tyrannosaur from the top of the world*, Plos One, vol. 9(3), article e91287, 2014.

M. Schweitzer, *Dinosaures : on a retrouvé leur sang*, Pour la Science n° 402, 2011.

S. Brusatte et al., *New research on ancient exemplar organisms*, Science, vol. 329, pp. 1481-1485, 2010.

G. M. Erickson, *La vie de Tyrannosaurus rex*, Dossier Pour la Science, n° 48, 2005.

L'ESSENTIEL

> Rougeur, gonflement, chaleur et douleur sont connus depuis longtemps comme des signes d'inflammation, qu'elle soit due à une infection ou à une lésion.

> Des scientifiques ont montré que des cellules lancent ce processus en assemblant des complexes moléculaires nommés inflammasomes.

> Les mêmes inflammasomes interviennent dans de nombreuses pathologies chroniques apparemment sans lien comme la maladie d'Alzheimer, la goutte et des maladies cardiaques.

> On espère ainsi concevoir de nouveaux médicaments visant une grande variété de maladies.

L'AUTEUR



WAJAHAT Z. MEHAL
professeur de médecine spécialisé dans les maladies digestives et l'inflammation à l'université Yale, aux États-Unis

Comment les cellules s'enflamment

Quel est le point commun entre la goutte, la maladie d'Alzheimer et la stéatose hépatique ? Il n'y en a pas, aurait-on répondu il y a quinze ans. Mais depuis, on a découvert que, dans toutes ces maladies, une même structure moléculaire entretient une inflammation chronique.

Si vous avez déjà eu un bouton, vous connaissez les signes typiques d'une infection: rougeur, gonflement, chaleur et douleur. Cette réaction de l'organisme, nommée inflammation, est identifiée depuis longtemps. Cependant, elle ne se déclenche pas seulement lors d'une infection. Elle se produit aussi quand un tissu est endommagé, même en l'absence d'agent pathogène – par exemple lorsque vous vous cognez un orteil ou, plus gravement, lors d'une crise cardiaque. Et quand elle tourne mal, cette inflammation dite stérile contribue à toute une série de maladies apparemment sans lien, allant de la maladie d'Alzheimer au diabète et à diverses affections hépatiques.

L'inflammation prolongée et son rôle dans la maladie sont connus depuis des décennies. Néanmoins, les recherches menées ces dernières années ont révélé d'étonnantes informations

sur ses origines, dont l'une des plus fascinantes est que l'inflammation n'est pas une réaction automatique: elle ne se lance qu'après un assemblage actif de structures moléculaires. Les cellules qui interviennent dans l'inflammation construisent rapidement ces structures, nommées inflammasomes, puis les démantèlent très vite, en général dans les vingt-quatre heures qui suivent une blessure. Imaginez la construction d'une usine d'assemblage en quelques minutes lorsqu'un produit devient nécessaire, puis sa démolition dès que le besoin a disparu et vous aurez une idée de la scène. Le désassemblage rapide aide probablement l'organisme à éviter des lésions excessives. Une certaine dose d'inflammation est utile, car elle détruit les agents pathogènes et bloque leur propagation dans l'organisme. Mais une inflammation trop forte est susceptible d'altérer les tissus sains environnants et d'étendre ainsi la lésion initiale.

>