

du spécimen. J'en suis resté bouche bée : ce que je voyais était un tyrannosaure de l'extrême fin du Crétacé, mais il était très différent de *T. rex*. Mesurant entre 8 et 9 mètres de long, donc nettement plus petit, il ne pesait vraisemblablement qu'une tonne. Contrairement à celui de *T. rex*, armé d'une mâchoire apte à broyer tout adversaire, son crâne était long et délicatement constitué.

Junchang Lü m'a invité à l'aider à décrire la nouvelle espèce, car j'avais déjà étudié de près deux tyrannosaures à long museau découverts il y a environ 40 et 10 ans. Ces dinosaures avaient alors plongé les paléontologues dans une grande perplexité. La première de ces formes, *Alioramus remotus*, a d'abord été connue par un squelette incomplet qu'une équipe russe mit au jour en Mongolie dans les années 1970. Ces chercheurs avaient souligné son aspect anormal. Comme, au cours de la guerre froide, peu de paléontologues ont eu la possibilité de l'étudier, on a continué à se demander s'il s'agissait d'une nouvelle espèce atypique ou d'un jeune représentant de l'espèce *Tarbosaurus*, déjà connue.

Plusieurs tyrannosaures à long museau

Cette incertitude dura jusqu'au début des années 2000, quand une équipe américano-mongole dirigée par mon directeur de thèse, Mark Norell, du Muséum américain d'histoire naturelle, découvrit un spécimen d'*Alioramus* bien plus complet et mieux conservé. Mark Norell me demanda alors de l'étudier. C'est ainsi qu'en 2009 nous propositions une nouvelle espèce : *Alioramus altai*. Ce fossile semblait distinct de *Tarbosaurus* ; toutefois, comme le squelette dont nous disposions était celui d'un individu juvénile (ce que révélait la structure interne des os), on ne pouvait exclure que ses traits particuliers soient la conséquence d'une croissance incomplète.

Une fois n'est pas coutume, cette question paléontologique a été tranchée seulement quelques années plus tard, grâce à la découverte fortuite de 2010, à Ganzhou. Le squelette de *Qianzhousaurus* mis au jour avait en effet le même long museau, la même constitution délicate et la même petite taille qu'*Alioramus*, mais il était clair qu'il appartenait à un individu beaucoup plus âgé. Cela nous permit de conclure que les tyrannosaures à long museau

constituaient à la toute fin du Crétacé un groupe asiatique occupant une position intermédiaire dans la chaîne alimentaire par rapport à celle de *Tarbosaurus* et de ses semblables.

Qianzhousaurus n'était pas le seul petit tyrannosaure cohabitant avec les poids lourds de son groupe. Deux mois environ avant la publication de notre description de *Qianzhousaurus*, mes collègues Anthony Fiorillo et Ronald Tykoski, du muséum Perot à Dallas, ont découvert près du cercle polaire un tyrannosaure de la fin du Crétacé encore plus étrange : *Nanuqsaurus*. Il ne reste de lui que quelques ossements similaires à ceux de *T. rex*, mais deux fois plus petits. Les os comportant des sutures épaissies qui ne s'observent que chez des adultes, Anthony Fiorillo et Ronald Tykoski ont supposé que la pauvreté en ressources du milieu polaire a entraîné une tendance au nanisme, tout comme de nombreux animaux insulaires sont plus petits que leurs congénères continentaux. L'idée est donc que les *T. rex* monstrueux du sud avaient des cousins de taille réduite dans le Grand Nord.

Les nouveaux fossiles de tyrannosaures nous ont beaucoup appris sur l'évolution de leur groupe. Plusieurs questions essentielles demeurent cependant. Quelle est l'origine des tyrannosaures ? Est-elle antérieure au Jurassique moyen ? Date-t-elle du Jurassique inférieur, période pour laquelle nous avons très peu de fossiles ? Des tyrannosaures ont-ils vécu sur les continents de l'hémisphère Sud entre le Jurassique moyen et le Crétacé moyen ?

La plupart des nouveaux fossiles tyrannosauriens ont été retrouvés dans l'hémisphère Nord. Or nous savons qu'au Jurassique et Crétacé moyens de nombreux groupes de dinosaures avaient une répartition planétaire... Des inconnues subsistent aussi quant à la biologie des tyrannosaures : de quelles sortes de plumes *T. rex* était-il recouvert et à quoi servaient-elles ? À quoi servait le long museau de *Qianzhousaurus* et *Alioramus* ?

Bien que très incomplète, l'histoire des tyrannosaures montre une fois de plus que l'évolution est imprévisible. Personne n'aurait pensé que, en 170 millions d'années, on passerait d'animaux chétifs à de féroces géants dominant les chaînes alimentaires de plusieurs continents, ni que, il y a 66 millions d'années, l'impact d'une météorite mettrait brutalement un terme à leur règne. ■

T. rex, charognard ou chasseur ?

***Tyrannosaurus rex* était chasseur : on a retrouvé une de ses dents fichée dans la vertèbre d'un autre dinosaure. Ses mâchoires pouvaient exercer des forces de 20 tonnes. Mais il ne courait pas vite, et, comme la taille de ses bulbes olfactifs suggère qu'il avait un odorat développé pouvant lui permettre de repérer une carcasse à des kilomètres, certains paléontologues proposent que *T. rex* était un charognard. Alors, charognard ou chasseur ? Les deux, sans doute !**

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Lü *et al.*, A new clade of Asian late Cretaceous long-snouted Tyrannosaurids, *Nature Communications*, vol. 5, article 37898, 2014.

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.

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

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

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

L'horizon des trous noirs brûle-t-il ?

Pour concilier la relativité générale et la physique quantique des trous noirs, certains physiciens ont conclu que l'horizon des événements entourant un tel astre est un « mur de feu » rempli de particules de haute énergie.

Joseph Polchinski

L'ESSENTIEL

- L'évaporation des trous noirs implique que l'information qui y entre est perdue, ce que la physique quantique interdit.
- Les solutions à cette difficulté, inspirées de la théorie des cordes, posent d'autres problèmes.
- L'auteur et ses collègues proposent un scénario radical, où le trou noir serait entouré de particules de haute énergie, un « mur de feu ».
- Résoudre le paradoxe de l'horizon ouvrirait la voie à une unification de la physique quantique et de la relativité générale.

Kenn Brown, Mandelbrot Studios

Tomber dans un trou noir n'est certainement pas une partie de plaisir. Dès que les physiciens ont compris que les trous noirs existaient, ils ont su que s'en approcher trop exposait à une disparition certaine. En revanche, dans le cas d'un grand trou noir, ils pensaient qu'un astronaute ne ressentirait rien de spécial lorsqu'il franchit le point de non-retour, nommé l'horizon des événements. D'après la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, cette région ne revêt aucun caractère particulier. Tout voyageur qui traverserait l'horizon aurait juste la sensation de tomber indéfiniment dans un puits d'une indicible noirceur, sans se rendre compte qu'il n'a plus aucune chance d'en sortir.

Récemment, mes collègues et moi avons brossé un tableau bien différent de l'horizon des événements. À la lumière des derniers développements en matière de physique quantique à proximité d'un trou noir, il semble désormais que notre astronaute aurait une tout autre expérience que celle prévue par la théorie d'Einstein. Au lieu d'une traversée de l'horizon des événements sans phénomène particulier,

l'astronaute rencontrerait un mur de particules de haute énergie, ou « mur de feu » (le terme utilisé en anglais est *firewall*, qui correspond aussi à « pare-feu »), qui lui serait instantanément fatal. Ce mur pourrait même marquer la fin de l'espace.

Il y a trois ans, notre groupe de l'université de Californie à Santa Barbara – Donald Marolf, Ahmed Almheiri, James Sully et moi-même (aujourd'hui connus sous l'acronyme AMPS) – est parvenu à cette conclusion après avoir étudié certaines idées de la théorie des cordes appliquées à la physique des trous noirs, en particulier en considérant un débat ouvert dès les années 1970 par Stephen Hawking. Ce physicien britannique avait identifié un conflit profond entre les prévisions de la théorie quantique et celles de la relativité générale dans ces environnements extrêmes. Selon son raisonnement, il existe une faille soit dans la physique quantique, soit dans la représentation de l'espace-temps donnée par la relativité générale d'Einstein. Depuis, le débat oscille entre l'une et l'autre hypothèse.

Si notre proposition de mur de feu a été accueillie avec un certain scepticismisme,

L'AUTEUR



Joseph POLCHINSKI est professeur de physique à l'université de Californie

à Santa Barbara, et membre permanent de l'institut Kavli de physique théorique.

comme ce fut aussi le cas pour le résultat de Stephen Hawking, aucune alternative satisfaisante n'a encore émergé. En supposant que la physique quantique est correcte, le mur de feu en est une conséquence directe, bien que son existence soulève d'autres difficultés théoriques. Il semble que les physiciens doivent abandonner l'une de leurs théories fétiches, mais nous ne savons pas encore laquelle. Nous espérons cependant qu'une compréhension plus profonde de la physique quantique et de la relativité naîtra de cette confusion et, avec de la chance, qu'un moyen de résoudre les contradictions apparentes entre ces deux théories reines de la physique émergera.

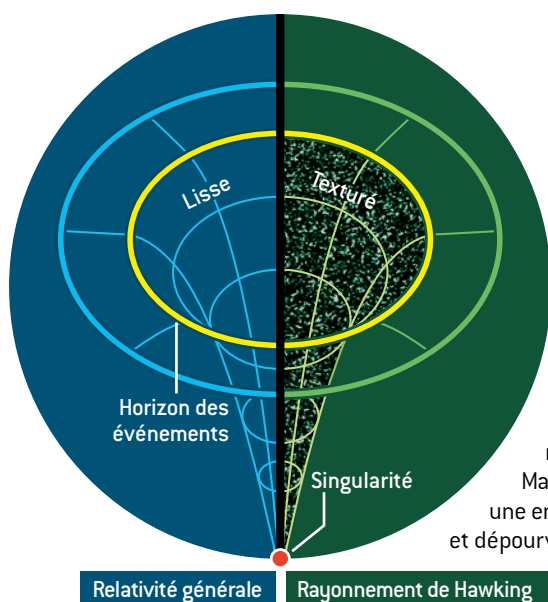
Pour bien comprendre le problème, il faut partir de la notion de trou noir. Cet objet est une prévision de la relativité générale, la théorie de la gravitation. Dans ce cadre, la matière, ou plus généralement l'énergie, déforme l'espace-temps. Pour le

cas le plus extrême, celui du trou noir, si la masse présente est suffisamment importante, la force gravitationnelle entraîne son effondrement en un point, nommé singularité du trou noir. À cet endroit, certaines quantités décrivant le champ gravitationnel deviennent infinies.

Autour de cette singularité, on définit l'horizon des événements comme la limite où le champ gravitationnel est si fort que même une particule se déplaçant à la vitesse de la lumière ne peut en sortir. Un voyageur spatial qui franchirait cette frontière serait alors dans l'impossibilité d'échapper à l'attraction gravitationnelle du trou noir. Cependant, pour un trou noir très massif, l'augmentation du champ gravitationnel est si progressive au niveau de l'horizon que l'astronaute ne se douterait de rien en le traversant. En vertu du principe d'équivalence de la relativité générale, l'horizon des événements est une région sans caractère

LES ÉNIGMES DE L'HORIZON DES TROUS NOIRS

EN 1974, STEPHEN HAWKING a montré de façon théorique qu'un trou noir émet un faible rayonnement. D'après la physique quantique, partout dans l'Univers et en permanence, des paires particule-antiparticule surgissent du vide et s'annihilent aussitôt ou presque. Stephen Hawking a remarqué que, si une telle « paire virtuelle » émerge du vide près de l'horizon d'un trou noir, l'une des deux particules tombe dans l'astre tandis que l'autre s'échappe, constituant le « rayonnement de Hawking ». Ce phénomène conduit à des difficultés portant sur les liens entre la relativité générale et la physique quantique.



Le problème de l'entropie

Le spectre du rayonnement de Hawking suggère que l'on peut attribuer une température à tout trou noir. En principe, la température d'un objet est liée aux mouvements de ses atomes. L'existence d'une température pour un trou noir implique que ce dernier a une sous-structure, des sortes d'éléments constitutifs internes. Ceux-ci peuvent s'organiser selon diverses configurations équivalentes, ce qui confère au trou noir une « entropie », une mesure du désordre reflété par le nombre de combinaisons possibles. Mais la théorie de la relativité générale interdit aux trous noirs d'avoir une entropie : d'après cette théorie, un trou noir est entièrement lisse et dépourvu de structure interne.

