

d'obstacles, la masse omniprésente qu'ils représentent a ralenti l'agrégation de la matière noire, effet qui devrait être détectable aujourd'hui.

Plus les neutrinos sont massifs, plus ils auront freiné l'agrégation de la matière, ce qui a pour effet de brouiller les contours de la structure à grande échelle de l'Univers. Pour cette raison, il est possible de déduire les masses des neutrinos de la répartition de la matière dans l'Univers.

Cartographier la distribution de la matière (qui est pour l'essentiel de la matière noire invisible) n'est pas une mince affaire. Mais les chercheurs ont remarqué que le rayonnement résiduel du Big Bang, le « fond diffus cosmologique », est légèrement déformé à cause des effets gravitationnels des grumeaux de matière noire

qui remplissent l'espace entre le fond diffus cosmologique et nous, et qui courbent les rayons lumineux. L'analyse de ces « lentilles gravitationnelles » du fond diffus cosmologique est une approche très prometteuse pour mesurer la distribution de matière noire dans l'Univers.

Les nouvelles mesures précises du rayonnement fossile qui sont en cours nous permettront de mesurer les déformations par effet de lentille avec la meilleure précision qui soit, et ainsi de cartographier la matière noire autrement invisible. Si la matière noire est confinée à des structures à bords nets séparés par des vides, nous pourrions en déduire que la masse des neutrinos est petite ; en revanche, si les contours sont flous, nous saurons que la masse des neutrinos est

plus grande. La nouvelle génération d'expériences portant sur le fond diffus cosmologique devrait permettre de déterminer les masses des trois types de neutrinos à un cinq millionième de la masse de l'électron près.

Qu'il soit possible de mesurer la masse de la plus légère et la plus insaisissable des particules élémentaires en observant l'Univers entier illustre une fois de plus comment l'étude de la physique, à toutes les échelles, continue de surprendre et de pousser les astrophysiciens à sonder en profondeur les rouages de la nature.

Sudeep Das

Laboratoire américain d'Argonne (Illinois)

Tristan Smith

Centre de physique cosmologique de l'Université de Californie à Berkeley

neutrinos que leurs résultats conduisent parfois à des contradictions. Une piste expérimentale séduisante (et controversée) suggère l'existence d'un quatrième type de neutrinos : le neutrino stérile. Cette particule, qui aurait déplié à Pauli, ne serait détectable qu'indirectement, comme le neutrino droit ultramassif invoqué pour faire fonctionner le mécanisme de *seesaw*.

Néanmoins, plusieurs expériences ont peut-être repéré des traces du neutrino stérile. Des mesures effectuées auprès de réacteurs depuis 30 ans suggèrent en effet un déficit en neutrinos électroniques de quelque six pour cent. Par ailleurs, menée au Laboratoire de Los Alamos (États-Unis) dans les années 1990, l'expérience LSND a mis en évidence des indices (controversés) de conversions inhabituelles d'antineutrinos. L'expérience MiniBooNE du Fermilab (États-Unis), qui a livré ses premiers résultats en 2007, suggère aussi l'existence de telles conversions.

Cependant, toute une série d'expériences, par exemple CDHSW (CERN Dortmund Heidelberg Saclay Warsaw) et MINOS (au Fermilab, États-Unis) menées auprès d'accélérateurs, vont plutôt à l'encontre de l'hypothèse d'un neutrino stérile.

La théorie quantique n'autorise les neutrinos à changer de saveur que si chaque

saveur est associée à une masse différente. Les différentes masses des neutrinos pourraient déclencher des oscillations expliquant les signaux anormaux observés à LSND et à MiniBooNE, mais seulement s'il existe une autre différence de masse en plus de celles que nous connaissons déjà – en d'autres termes, seulement s'il existe quatre types de neutrinos et non trois.

Cependant l'existence d'un neutrino supplémentaire participant à l'interaction faible aurait pour conséquence une désintégration trop rapide du boson Z (l'un des médiateurs de l'interaction faible) ; il faut donc que le quatrième neutrino ne participe pas à l'interaction faible. C'est à cela que se réfère l'adjectif « stérile » : à un neutrino presque entièrement coupé du reste des autres particules élémentaires.

Un quatrième neutrino, qualifié de stérile ?

Les résultats surprenants obtenus à l'aide de détecteurs d'un nouveau type conçus pour enregistrer les neutrinos émis par des réacteurs nucléaires voisins indiquent peut-être l'existence d'un neutrino stérile. Les données de plusieurs expériences de réacteurs suggèrent une disparition anormale d'antineutrinos électroniques sur de courtes distances, ce qui, interprété en termes d'oscillations, suggère l'existence de neutrinos stériles. Cette anomalie est repérée depuis un moment, mais sa signification en faveur de l'existence d'un neutrino stérile n'a été comprise que récemment, après de nouveaux calculs du flux de neutrinos produits par les différents réacteurs.

Cependant, les indices en faveur de l'existence de neutrinos stériles restent vagues, indirects et sujets à controverse... MiniBooNE et une expérience rattachée nommée MicroBooNE, en préparation au Fermilab, pourraient bientôt livrer des éléments plus concrets sur la question.

Il est remarquable que le puissant LHC et les expériences à relativement basse énergie qui étudient l'humble neutrino se complètent aussi bien dans l'exploration des rouages intimes de la nature. Plus de 80 ans après l'introduction de la « particule qui ne peut pas être détectée » de Pauli, les neutrinos continuent à défendre leurs secrets et nous continuons à essayer de les percer. La lumière qui jaillira en physique fondamentale si nous y parvenons justifie sans doute amplement cette quête. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

H. Päs, *The Perfect Wave*, Harvard University Press, à paraître, 2014.

Th. Lasserre et D. Vignaud, *La mystérieuse identité des neutrinos*, *Dossier Pour la Science* n° 62, pp. 36-42, janvier-mars 2009.

H. Päs, *Neutrino masses and particle physics beyond the Standard Model*, *Annalen der Physik*, vol. 11(8), pp. 551-572, 2002.

W. Porod *et al.*, *Testing neutrino mixing at future collider experiments*, *Physical Review D*, vol. 63(11), 115004, 2001.

L'amour chez les dinosaures

Comment les dinosaures s'accouplaient-ils ?
Cette question, longtemps restée une énigme complète,
commence à être étudiée scientifiquement.

La vue d'un squelette de dinosaure sur une publicité vantant le Wi-Fi, à l'aéroport de Chicago, m'a figé sur place. J'ai alors contemplé cette réplique de brachiosaure – un sauropode du Jurassique – avec ses pattes en forme de piliers, ses épaules massives emmanchées d'un long cou terminé par une petite tête carrée, qui semblait surveiller les atterrissages et les décollages. Mentalement, je dotais ce squelette des organes internes, des muscles et de la peau d'un animal de 25 mètres de long. C'est alors qu'une question saugrenue envahit mon esprit : comment cet animal gigantesque s'accouplait-il ?

Du fond de ma torpeur, je me transportais par la pensée 150 millions d'années dans le passé, à côté d'un couple de brachiosaures sur le point de s'accoupler dans l'une des clairières d'une forêt jurassique. Je n'arrivais pas à imaginer comment ils allaient s'y prendre. Le mâle enfourcherait-il la femelle ? Par l'arrière ? La queue ne gênerait-elle pas ? La femelle pourrait-elle supporter 50 tonnes sur son arrière-train ? En montant dans l'avion, j'embarquais avec moi ces questions captivantes.

Les dinosaures étaient des vertébrés terrestres : ils avaient donc des relations sexuelles. Comme chez les reptiles et les oiseaux actuels, les dinosaures mâles déposaient leur sperme à l'intérieur des femelles,

Brian Switek

L'ESSENTIEL

- Comme tous les vertébrés terrestres, les dinosaures s'accouplaient.
- Étant donné leur morphologie et les contraintes biomécaniques, il est difficile d'imaginer comment le coït se déroulait.
- Toutefois, l'observation des accouplements chez les oiseaux et chez les crocodiliens permet d'échafauder quelques hypothèses plausibles.
- Ces hypothèses peuvent être ensuite testées à l'aide de simulations informatiques.

qui pondaient ensuite des œufs fécondés contenant des embryons. Au-delà, que dire ? Très peu d'informations ont été recueillies sur la sexualité des dinosaures, peut-être parce que ce type de questionnement a longtemps été tabou ; de plus, cette problématique a dû sembler hors de portée de l'investigation scientifique ! Comment, en effet, affirmer avec confiance quoi que ce soit sur le sujet ?

Indices chez les oiseaux et les crocodiliens

Pour autant, tout espoir n'est pas perdu. D'une part, quelques fossiles livrent des indices intéressants, tels que l'âge de la maturité sexuelle ou certains caractères sexuels secondaires (des caractères jouant un rôle dans la parade nuptiale). D'autre part, l'étude des plus proches parents actuels des dinosaures – les oiseaux et les crocodiliens – laisse entrevoir les formes possibles des organes sexuels dinosaurens. On peut ensuite tester les hypothèses échafaudées à partir de l'étude des fossiles et des oiseaux ou des crocodiles actuels en mettant en images les modes d'accouplement envisagés.

Le registre fossile nous renseigne très peu sur la sexualité des animaux. Parmi les rares traces, citons le cas de ces tortues

mortes au cours de leur accouplement il y a quelque 47 millions d'années, ou encore celui de ce couple de requins brusquement enseveli pendant sa parade nuptiale il y a quelque 320 millions d'années. Malheureusement, aucun couple de dinosaures fossilisé pendant l'accouplement n'a jamais été découvert, et même les mieux préservés des fossiles de dinosaures ne portent aucun vestige des organes reproducteurs.

Un baiser cloacal ?

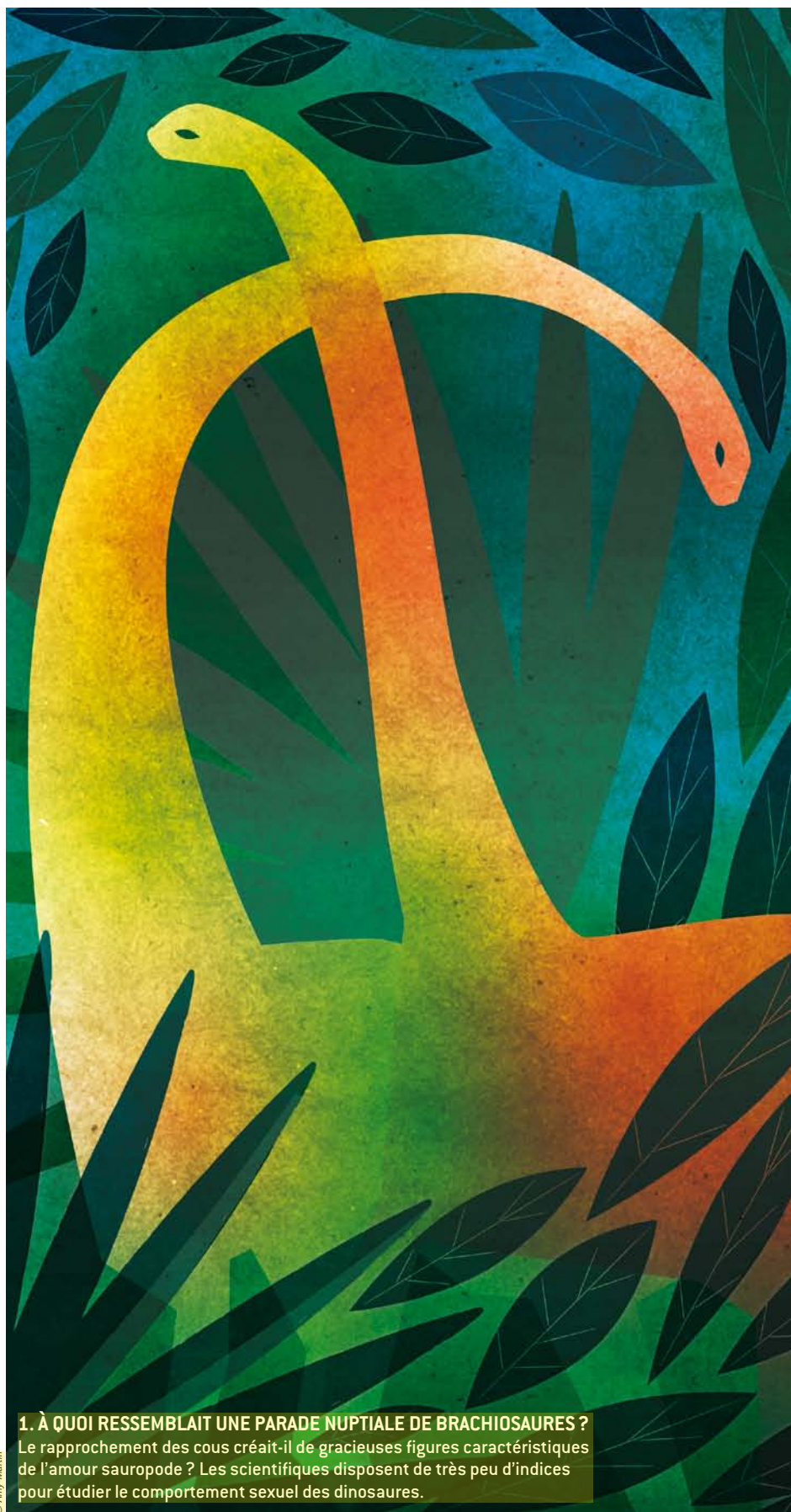
Pour en savoir plus sur les parties génitales des dinosaures, les chercheurs se sont donc tournés vers leurs parents actuels les plus proches : les oiseaux et les crocodiliens.

Rappelons que les oiseaux sont des dinosaures aviens (spécialisés dans le vol), branche issue, il y a quelque 150 millions d'années, de ces dinosaures non aviens que sont les théropodes (des prédateurs). Leur lignée est le seul groupe dinosaurien qui a survécu à la grande crise de la fin du Crétacé, il y a 65 millions d'années. Quant aux crocodiliens actuels – c'est-à-dire les crocodiles, les alligators et les gavials –, ils sont les parents vivants les plus proches du groupe constitué des dinosaures éteints et des oiseaux actuels.

En raison de ces relations de parenté, il est vraisemblable qu'un trait présent chez les oiseaux et chez les crocodiliens actuels l'était aussi chez les dinosaures non aviens. L'un de ces traits communs est le cloaque, ouverture postérieure constituant le débouché des voies à la fois intestinale, génitale et urinaire. Les dinosaures avaient probablement aussi un cloaque. Dans ce cas, les organes génitaux des apatosaures (d'énormes herbivores), par exemple, n'étaient pas apparents, mais cachés dans le cloaque, lequel devait apparaître, vu de l'extérieur, comme une fente sous la queue.

La plupart des oiseaux mâles actuels n'ont pas de pénis dans leur cloaque. Ils transfèrent leur sperme en appliquant leur cloaque contre celui de la femelle, ce que l'on nomme un « baiser cloacal ». Quant aux espèces aviennes dont les mâles sont pourvus d'un pénis, on constate que leurs lignées sont toutes raccordées à la base de l'arbre généalogique des oiseaux.

Selon Patricia Brennan, de l'Université du Massachusetts à Amherst, cette observation montre que les mâles des espèces aviennes archaïques étaient dotés d'un



1. À QUOI RESSEMBLAIT UNE PARADE NUPTIALE DE BRACHIOSAURES ?

Le rapprochement des cous créait-il de gracieuses figures caractéristiques de l'amour sauropode ? Les scientifiques disposent de très peu d'indices pour étudier le comportement sexuel des dinosaures.

© Amy Martin

pénis, que nombre de lignées postérieures d'oiseaux ont perdu. Or les crocodiliens mâles ont un pénis; dès lors, il est à peu près certain que les dinosaures mâles en avaient un aussi. De plus, si l'on admet que l'appareil génital mâle des crocodiliens et des oiseaux reflète celui des dinosaures, alors le phallus de ces derniers était un organe unique et non double, muni d'un long canal conduisant le sperme. Cela dit, dans la mesure où il a existé plus de 1850 genres différents de dinosaures, les variations morphologiques des pénis dinosauriens ont dû être nombreuses.

Sexes à déterminer...

La reconstitution des accouplements dinosauriens exige plus que la détermination des organes reproducteurs. Il importe en particulier de distinguer les sexes, ce qui, sans la possibilité d'examiner les organes génitaux, n'a rien de facile. Longtemps, les chercheurs ont tenté de les distinguer à partir des squelettes, mais la plupart des indicateurs de sexe ainsi proposés se sont révélés douteux. Tel est le cas de la grande crête qui ornait le crâne des lambeosaures, herbivores d'il y a quelque 75 millions d'années.

Puisque les squelettes ne livrent pas d'indices concluants sur le sexe, que faire ? Des œufs retrouvés avec un squelette d'*Oviraptor* – un théropode de la fin du Crétacé d'Amérique du Nord et d'Asie – constituent un exemple d'indice plus fiable, puisqu'ils étaient dans le corps d'un individu manifestement femelle.

Plus intéressant est le cas d'un tyrannosaure (*Tyrannosaurus rex*, le plus grand des prédateurs théropodes) étudié par Mary Schweitzer, de l'Université de Caroline du Nord, dont les restes fossiles comportaient de l'os médullaire. Cette mince couche riche en calcium se développe à l'intérieur des diaphyses (partie médiane) des os longs des pattes postérieures de certaines espèces d'oiseaux et sert à la fabrication de la coquille des œufs. Le fait que M. Schweitzer en ait trouvé dans le fémur d'un tyrannosaure indique qu'il s'agissait d'une femelle gravide, et que du tissu médullaire accompagnait la gestation des théropodes, ancêtres des oiseaux. On a là un moyen d'identifier des femelles de dinosaures, du moins celles qui étaient gravides.

Deux chercheurs de Berkeley, Andrew Lee et Sarah Werning, se sont appuyés

sur la découverte de M. Schweitzer pour estimer l'âge de la maturité sexuelle chez les dinosaures. Des travaux précédents avaient établi que les sections des os de dinosaures présentent des anneaux, des « lignes d'arrêt de croissance » ; ces cernes sont associés aux ralentissements annuels de la croissance pendant les saisons difficiles, par exemple la saison sèche quand eau et nourriture manquent. D'après les courbes de croissance que l'on peut en déduire, de nombreux dinosaures grandissaient



2. LES CRÊTES DES MARGINOCÉPHALES, ici un chasmosaure, étaient semble-t-il trop fragiles pour avoir un quelconque rôle défensif, si ce n'est peut-être pour intimider les prédateurs. On peut leur imaginer un rôle dans la régulation thermique de l'animal. Mais il est aussi vraisemblable qu'elles aient été ornées de couleurs vives, afin de signaler la vitalité de leur propriétaire pendant la saison des amours.

très vite en début de vie, puis ce rythme ralentissait à mesure qu'ils approchaient de la maturité squelettique.

Les chercheurs ont étudié les lignes d'arrêt de croissance du tyrannosaure, ainsi que celles d'un ténontosaure (un herbivore à bec du Crétacé inférieur) et d'un allosaure (un carnivore du Jurassique supérieur), tous deux trouvés avec de l'os médullaire. Ils ont ainsi établi que le ténontosaure était mort vers 8 ans, l'allosaure vers 10 ans, et le tyrannosaure à 18 ans. Or aucune de ces trois femelles en gestation n'avait

de squelette pleinement développé. On peut en conclure que ces dinosaures sont morts en cours de croissance, mais peu après un accouplement dont témoigne leur os médullaire. À leurs morts, tous trois étaient des individus adolescents déjà actifs sexuellement.

Les dinosaures grandissaient vite et mouraient souvent jeunes. Selon A. Lee et S. Werning, c'est le signe certain d'une vie dangereuse. Plus les individus d'une espèce sont menacés, plus la sélection naturelle favorise la précocité des accouplements, afin d'augmenter les chances que leurs lignées perdurent. S'accoupler tôt devait être très favorable chez les plus grands des dinosaures. Si un apatosaure, qui met un quart de siècle à atteindre les 25 mètres de long de sa maturité squelettique, avait attendu autant pour se reproduire, son espèce aurait probablement vite disparu ! Les observations de A. Lee et S. Werning prouvent donc que les grands dinosaures s'accouplaient dès leur stade adolescent.

La parade nuptiale dinosaurienne, un festival de couleurs ?

Un autre aspect essentiel de la sexualité animale est la parade. De nombreux animaux actuels ont des caractères sexuels secondaires, parfois spectaculaires (voir la figure 2), qui ont évolué avant tout pour attirer un partenaire. Les paléontologues se sont souvent demandés si certains attributs dinosauriens extravagants (crêtes, pointes, plaques, cornes et plumes, etc.) avaient une fonction sexuelle. Le long cou des sauropodes en avait-il une ? Même si les cous démesurés de ces herbivores ont d'évidence évolué parce qu'ils procuraient un avantage pour se nourrir, ils ont aussi pu être impliqués dans la parade, par exemple en étant ornés de motifs colorés signalant leur bonne santé. C'est d'autant plus plausible que les grands sauropodes n'avaient pas besoin, étant donné leur taille dissuasive, de se cacher.

Il est clair que bien des dinosaures devaient se parer à la saison des amours. Le kentrosaure était-il émoustillé par les plaques et les piques arborées par sa femelle ? Les femelles amargasaures sélectionnaient-elles les mâles d'après la longueur des piques qu'ils portaient au cou ? Quoi qu'il en soit, de tels attributs ont sûrement dû compliquer le coût !