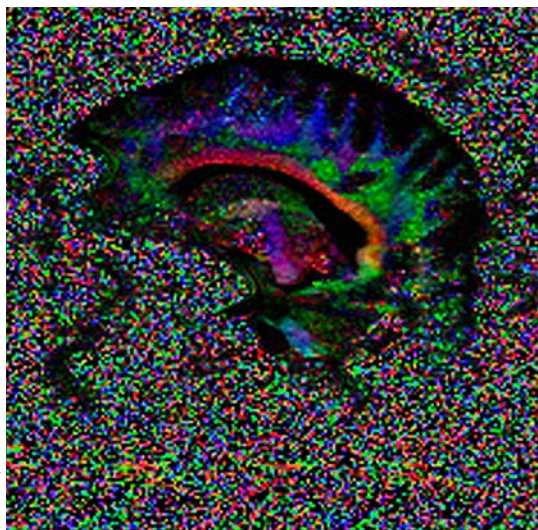




UNE ÉTUDE DE TRACTOGRAPHIE réalisée en IRM de diffusion sur le scanner IRM 7T de NeuroSpin à Saclay. Après reconstruction, ces données permettront de visualiser les faisceaux de fibres de la matière blanche du cerveau.

Horowitz, Anatole Abragam, Maurice Goldman, Maurice Guéron et André Syrota. Muni d'un aimant de deux teslas, cet appareil à haut champ – le premier au monde – est installé en 1984 au SHFJ, qui devient alors un centre pionnier de spectroscopie RMN *in vivo* et d'IRM.

Les utilisations de la RMN sont très diverses. On y recourait dès les années 1960 pour mesurer la diffusion de l'eau dans un milieu. En 1985, Denis Le Bihan et Éric Breton, au SHFJ, proposent d'en tirer une nouvelle modalité d'IRM,

en supposant que l'eau ne diffuse pas de la même manière dans tous les types de tissus biologiques. Cette « IRM de diffusion » trouve bientôt son utilité en clinique, d'abord pour la détection précoce des ischémies cérébrales, ainsi que l'a découvert l'Américain Michael Moseley, puis pour celle des tissus cancéreux. En 1990, Michael Moseley constate que, dans la matière blanche cérébrale, l'eau ne diffuse pas de la même manière dans toutes les directions. Il est probable qu'elle soit dirigée préférentiellement le long des axones. En 1992, Peter Basser et Denis Le Bihan s'appuient sur ce résultat pour esquisser « l'IRM par tenseur de diffusion », avec laquelle, grâce à de nouvelles applications informatiques, il deviendra possible dès la fin des années 1990 de retracer le trajet intégral des fibres nerveuses (c'est la « tractographie »).

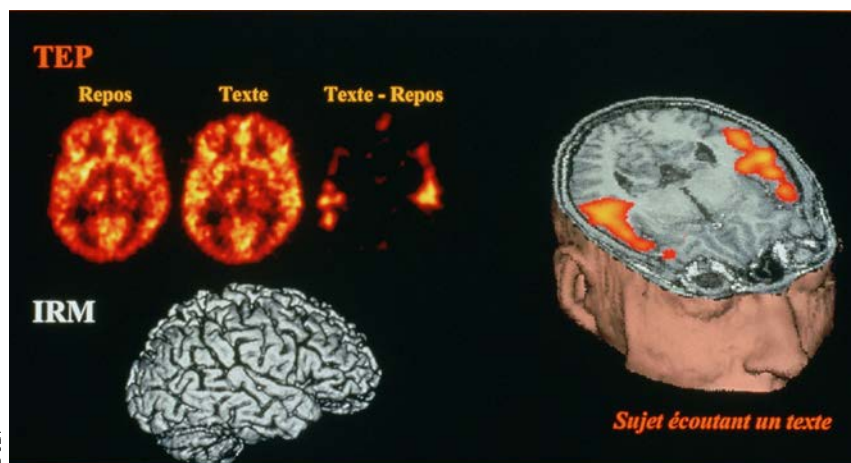
En 2007, l'ouverture de NeuroSpin à Saclay consacre l'expertise du CEA en matière d'IRM. Ce service rassemble toutes les techniques d'imagerie anatomique et fonctionnelle par RMN pour réaliser des études précliniques ou cliniques du cerveau. Le CEA y poursuit sa course vers l'IRM à très haut champ : depuis 2010, NeuroSpin dispose d'un aimant de 17,2 teslas de petit diamètre ; il s'apprête à en recevoir un autre, capable de délivrer 11,7 teslas dans un tunnel d'une largeur de 90 centimètres, suffisante pour y placer un être humain. L'imagerie du cerveau humain bénéficiera ainsi d'un niveau de performance unique au monde. Ce nouvel appareil est le fruit d'une collaboration entre Alstom, Siemens et le CEA, qui a mis à profit l'expertise en aimants supraconducteurs de son Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers. Il s'intègre dans un projet franco-allemand de développement des applications médicales de « l'IRM 11,7 T », dont l'IRM moléculaire.

Outre l'augmentation du champ, un moyen de collecter davantage de signaux en une passe, afin de rendre l'IRM encore plus précise et rapide, consiste à polariser les noyaux pour rendre leur réponse plus intense. Cette voie fait l'objet de recherches très actives à l'Iramis (Institut rayonnement matière du CEA).

Un enjeu pour les neurosciences

Accroître ainsi les capacités de l'imagerie anatomique et fonctionnelle intéresse particulièrement les neurosciences. Il s'agit, par exemple, de relier les connaissances du fonctionnement des neurones issues de l'observation microscopique à celles des activations de différentes régions cérébrales à l'échelle de la seconde, ou de détecter les agrégats de protéines anormales qui sont typiques de certaines maladies neurodégénératives, telles que la maladie d'Alzheimer. À Fontenay-aux-Roses, le Mircen (*Molecular Imaging Research Center*), un institut commun au CEA et à l'Inserm, développe et valide des techniques d'imagerie dédiées à ces fins.

Toutes ces avancées témoignent de l'importance prise par les recherches transversales qui, en imagerie, associent physique, électronique, mathématiques, informatique et biologie, et par lesquelles le CEA répond à de grands enjeux de santé publique. ■



UN COUPLAGE DE TEP ET D'IRM. Grâce à la comparaison de deux images, l'une obtenue lors de l'audition d'un texte par le patient (*Texte*), l'autre acquise lors d'un moment de silence (*Repos*), la TEP met en évidence les zones cérébrales spécifiquement impliquées dans l'écoute. L'image résultante (*Texte - Repos*) est intégrée à une vue en coupe anatomique obtenue par IRM (*à droite*) afin de bien localiser ces zones dans le cerveau.



L'ESSENTIEL

- L'existence de tyrannosaures géants à la fin du Crétacé est connue depuis plus d'un siècle, mais les paléontologues ignoraient l'origine de ces animaux.
- De nouveaux fossiles viennent de fournir de précieux indices sur l'évolution des tyrannosaures.
- Les espèces de ce groupe étaient très modestes au début, il y a environ 170 millions d'années. Puis le groupe s'est diversifié et des superprédateurs géants sont apparus.



L'ascension des tyrannosaures

De nouveaux fossiles révèlent que les tyrannosaures sont passés, en 100 millions d'années, d'un groupe d'animaux de petites tailles à la famille de prédateurs géants qui a dominé la fin du Crétacé.

Stephen Brusatte

Été 2010, Ganzhou, ville chinoise de la province du Jiangxi. Un conducteur d'engin creuse des fondations quand sa pelle bute sur un obstacle. Quelque peu agacé, il descend inspecter, s'attendant à quelque vieille conduite métallique ou, pire, à une couche rocheuse qui retarderait les travaux de son équipe. Mais il est tout étonné de découvrir de vieux ossements, qu'il signale. S'il ne l'avait pas fait, nous aurions été privés d'une grande découverte paléontologique : le squelette presque complet d'une nouvelle espèce de tyrannosaure !

Quelques temps plus tard, mes collègues chinois me demandent de les aider à décrire ce cousin du *Tyrannosaurus rex*. En mai 2014, nous pouvons enfin annoncer la découverte de *Qianzhousaurus sinensis*. Le nom de ce dinosaure étant difficile à prononcer pour un Occidental, nous avons surnommé ce tyrannosaure à très long museau « Pinocchio rex ».

Qianzhousaurus fait partie de la série d'espèces découvertes qui est en train de changer notre vision des tyrannosaures. Au cours des quinze dernières années, une vingtaine d'espèces nouvelles de tyrannosaures ont été mises au jour dans le monde, que ce soit dans les déserts de Mongolie ou sous le cercle Arctique. Grâce à elles, les paléontologues ont reconstitué la généalogie de ce groupe. Le résultat est

TROIS DILONG, des tyrannosaures de petite taille, défendent leur proie face à un grand *Yutyrannus* dans une forêt jurassique de ce qui deviendra la Chine.

surprenant : pendant la plus grande partie de leur histoire, les tyrannosaures n'ont été qu'un groupe de modestes carnassiers. Ils n'ont acquis les grandes tailles et la position dominante au sommet de la chaîne alimentaire qu'on leur connaît qu'au cours des 20 derniers millions d'années de l'ère des dinosaures. Cette dernière, qui commence il y a 250 millions d'années, couvre le Trias, le Jurassique et le Crétacé ; elle s'achève il y a quelque 66 millions d'années, quand un astéroïde de 10 kilomètres de diamètre percute la Terre.

Des origines modestes

Ainsi, loin d'appartenir à une famille de prédateurs géants, le monstre *Tyrannosaurus rex* a des origines modestes : il est le dernier survivant d'un groupe de dinosaures qui se diversifia assez pour parvenir à se répandre sur la Terre entière.

Depuis sa découverte il y a plus d'un siècle, *T. rex* dominait le spectacle dinosaurien, mais diminuait son intérêt aussi. Il y a peu de temps encore, on se bornait à constater avec fascination que les membres de cette espèce de la fin du Crétacé atteignaient 13 mètres de long et 5 tonnes. En outre, les paléontologues du XX^e siècle ont découvert quelques cousins du *T. rex*, eux aussi impressionnants. Cela les a persuadés que *T. rex*, loin d'être seulement une curiosité paléontologique, était l'aboutissement de toute une branche dinosaurienne. Dès lors, ils ont voulu comprendre comment et quand cette branche était apparue. En

d'autres termes, ils ont cherché à découvrir des formes anciennes de tyrannosaures.

La découverte du *T. rex* est le premier élément de cette longue histoire. Au début du XX^e siècle, Henry Fairfield Osborn était l'un des paléontologues les plus en vue des États-Unis. Président du Muséum d'histoire naturelle de la ville de New York et de l'Académie américaine des arts et des sciences, il était régulièrement en couverture du magazine *Time*, tribune dont il se servait pour promouvoir ses idées racistes et eugénistes. Cela lui vaut aujourd'hui d'être vu comme un douteux fanatique. Toutefois, Osborn était un excellent paléontologue doublé d'un bon administrateur scientifique. C'est lui qui prit l'heureuse initiative d'envoyer le collecteur de fossiles Barnum Brown à la recherche de fossiles de dinosaures dans l'Ouest américain.

Brown était un personnage haut en couleur, souvent vêtu d'un long manteau de fourrure en plein été, il ne dédaignait pas d'arrondir ses fins de mois en espionnant pour le compte de divers gouvernements et compagnies pétrolières. Il avait du flair pour trouver des fossiles. En 1902, il fit dans le Montana l'une des plus célèbres découvertes de toute l'histoire de la paléontologie : le squelette complet d'un carnivore géant.

Lors de la description de ce spécimen, quelques années plus tard, Osborn le nommera *Tyrannosaurus rex*, c'est-à-dire « roi des lézards-tyrans ». Osborn et Brown avaient découvert le plus gros et le plus féroce de tous les prédateurs ayant jamais vécu sur Terre...

Le *T. rex* est ensuite devenu la coqueluche des muséums et une vedette de cinéma. Mais il est resté dans le même temps une énigme scientifique. D'où pouvait provenir une telle espèce ? Les paléontologues ont eu le plus grand mal à la situer dans le cours de l'évolution. *T. rex* est si énorme et si différent des prédateurs que l'on connaissait jusque-là qu'il paraissait presque aberrant.

Au cours des décennies qui ont suivi la découverte de *T. rex*, quelques proches parents du grand prédateur ont été mis au jour. Ils lui sont contemporains, puisqu'on les a découverts sur des sites nord-américains datant de 84 à 66 millions d'années, donc du Crétacé supérieur. Ces grands tyrannosaures – *Albertosaurus*,

Gorgosaurus, *Tarbosaurus* – ressemblent beaucoup à *T. rex* : des superprédateurs qui semblent avoir profité des derniers moments de l'histoire dinosaurienne pour prospérer. Bien que très impressionnants, ces nouveaux fossiles n'ont pas permis d'élucider les origines des tyrannosaures.

L'histoire évolutive des tyrannosaures n'a été éclairée que récemment, grâce aux fossiles mis au jour par des aventuriers de la paléontologie qui ont bravé le froid, la chaleur, les serpents, la poussière, pour explorer l'Ouest américain, l'Argentine, les déserts de Gobi et du Sahara, le Grand Nord russe...

L'un de ces aventuriers est mon collègue Alexander Averianov de l'Institut zoolo-

au Jurassique moyen, il aurait pu écraser *Kileskus* comme un moucheron. Cependant, *Kileskus* présente d'incontestables similitudes avec *Guanlong* (voir l'arbre de parenté pages 80 et 81), un autre petit carnivore de Chine décrit en 2006 et postérieur de dix millions d'années à *Kileskus*. Par exemple, *Kileskus* et *Guanlong* ont en commun une crête osseuse sur la tête. Et *Guanlong*, connu par bien plus de spécimens complets que *Kileskus*, présente plusieurs traits tyrannosauriens, tels ces os nasaux fusionnés formant le museau.

Les traits communs à *Guanlong* et à *Kileskus* sont les signes d'une ascendance commune. Ces deux modestes formes, si peu dignes d'intérêt à première vue, constituent la souche ancestrale des tyrannosaures géants de la fin du Crétacé, tels *T. rex*.

Ces deux découvertes révèlent que, au contraire de ce que pensaient les paléontologues lors des premières découvertes de tyrannosaures, les plus anciens de ces dinosaures n'étaient pas des superprédateurs. Le groupe des tyrannosaures semble être issu d'une famille de carnassiers plutôt modestes dont les membres vivaient dans l'ombre de superprédateurs géants de leur époque, tels les allosaures et les cératosaures, qui ne leur étaient apparentés que de loin.

La découverte de *Kileskus* et de *Guanlong* nous révèle en outre que les tyrannosaures sont enracinés bien plus loin dans le temps qu'on ne l'aurait imaginé. *Kileskus* et *Guanlong* vivaient à l'époque où le supercontinent de la Pangée ne s'était pas encore totalement disloqué, de sorte que les lignées animales pouvaient se répandre sur les diverses masses continentales. Cette géographie disparue (voir les cartes pages 80 et 81) explique que l'on découvre les dinosaures les plus anciens en Russie ou en Chine, tandis que les espèces un peu plus tardives le sont en Amérique du Nord et au Royaume-Uni. Les espèces découvertes en Chine et en Russie prouvent aussi que des millions d'années ont été nécessaires avant que les tyrannosaures ne dominent. De fait, plus de 100 millions d'années se sont écoulées entre les premiers tyrannosaures et *T. rex*, soit bien plus que les 66 millions d'années qui séparent ce dernier de l'espèce humaine...

Kileskus est
**UN PETIT
TYRANNOSAURE**
qui vécut
il y a 170 millions
d'années.

gique de l'Académie russe des sciences, à Saint-Petersbourg. En 2010, son équipe annonce une découverte intéressante faite non loin de Krasnoïarsk, sur les vastes plateaux de la Sibérie centrale. L'amas d'ossements se révèle appartenir à un carnivore de stature comparable à celle d'un humain. Le terrain correspondant date d'environ 170 millions d'années, donc du Jurassique moyen, soit bien avant *T. rex*. Les chercheurs russes nomment leur trouvaille *Kileskus*, c'est-à-dire « lézard » en khakasse, la langue locale. Ce spécimen allait constituer un indice crucial.

Au premier abord, *Kileskus* n'est pas impressionnant et ne ressemble pas à *T. rex*. Si ce dernier avait vécu en Russie