

à Madagascar le premier crâne de gondwanathérien jamais découvert. L'espèce en question, *Vintana*, ressemblait à un castor et se nourrissait peut-être d'herbes – des végétaux familiers aujourd'hui, qui, au Crétacé tardif, étaient en train d'apparaître.

Il y a 66 millions d'années, à la toute fin du Crétacé, tout allait bien pour les mammifères. Après les dizaines de millions d'années d'évolution buissonnante des mammaliaformes au Trias, les multituberculés masticateurs de plantes et les gondwanathériens insérés dans le réseau alimentaire des dinosaures prospéraient. Ils restaient modestes toutefois, cantonnés aux sous-bois, et semblaient peu capables d'investir de nouveaux habitats.

Après le Crétacé, les placentaires se sont diversifiés très vite

Puis la situation a encore changé radicalement. Une nouvelle catastrophe biologique s'est produite : la crise Crétacé-Tertiaire. La chute d'un gros astéroïde, les incendies géants, les raz-de-marée monstrueux et les tremblements de terre associés, des éruptions volcaniques massives ont dévasté la Terre. Ils ont entraîné des changements climatiques et environnementaux insupportables pour la quasi-totalité des dinosaures. À l'exception des oiseaux, ce groupe, qui avait dominé la Terre pendant plus de 150 millions d'années, s'est alors éteint, ainsi que la plupart des types d'animaux. Nombre de genres de mammifères ont eux aussi disparu en masse.

La vaste étude de terrain entamée dans le Montana par William Clemens, de l'université de Californie à Berkeley, puis continuée par Gregory Wilson, documente ainsi leur déclin. Elle a mis en évidence que tous les grands mammifères dont la subsistance dépendait du réseau trophique des dinosaures ont disparu du registre fossile. C'est pourquoi les métagathériens, pourtant en plein essor à la fin du Crétacé, ont été presque tous éliminés. Quelques espèces seulement ont traversé la crise. Sinon, nous ne connaîtrions pas les marsupiaux actuels, leurs descendants...

Des mammifères placentaires se trouvaient aussi parmi les survivants. L'horloge moléculaire, cette technique qui mesure le temps écoulé en dénombrant les mutations (supposées se produire à un rythme régulier)

de l'ADN, suggère d'une part que l'ancêtre commun définissant le groupe des placentaires a vécu à l'ombre des dinosaures au Crétacé, et d'autre part que les principaux sous-groupes de placentaires – les rongeurs et les primates notamment – sont apparus dès la fin de la crise Crétacé-Tertiaire. En investissant les niches écologiques vacantes laissées par les dinosaures, ils se sont alors diversifiés très vite.

À quel point ? La durée de l'« arrivée au pouvoir » de ces mammifères se mesure en effet en milliers d'années, ce qui, à l'échelle géologique, est dérisoire. Ainsi, l'extinction des dinosaures apparaît comme le déclencheur de ce que l'on pourrait nommer la révolution placentaire.

L'un de nous (Stephen Brusatte) participe actuellement aux recherches de terrain visant à mieux saisir les facettes de ce moment crucial de l'évolution. Les Badlands, une région du massif de Nacimiento, au Nouveau-Mexique, regorgent d'informations sur la manière dont les mammifères ont prospéré après la disparition des dinosaures. Avec Thomas Williamson, du Musée d'histoire naturelle et des sciences du Nouveau-Mexique, qui fouille ces terrains depuis plus de vingt-cinq ans, ils cherchent à identifier les espèces de mammifères correspondantes et à mettre en évidence quels traits spécifiques les ont aidés à passer la crise de la fin du Crétacé et pourquoi. Ils ont constaté la présence de très nombreuses formes, allant d'insectivores de la taille d'une musaraigne à des carnassiers à dents de sabre, en passant par des herbivores gros comme des vaches. Or toutes ces espèces étaient déjà présentes 500 000 ans à peine après la chute de l'astéroïde, ce qui confirme la rapidité avec laquelle les placentaires se sont imposés.

Ces résultats rejoignent les constatations faites par Emmanuel Gheerbrant, du CNRS à Paris, dans les faunes de mammifères de cette époque au Maroc.

Parmi les espèces de placentaires repérées par Thomas Williamson se trouve notamment *Torrejonina*, un animal au corps gracieux de la taille d'un chiot, qui devait s'accrocher aux branches à l'aide de ses longs doigts fins. Quand on contemple l'élégant squelette de ce proto-primate, on l'imagine presque sautant d'arbre en arbre malgré ses 63 millions d'années. Quelque 60 millions d'années d'évolution plus tard, des singes bipèdes, dont les ancêtres immédiats pratiquaient ce même mode de vie, seront devenus capables de philosopher. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

Q. J. Meng *et al.*, An arboreal Docodont from the Jurassic and Mammaliaform ecological diversification, *Science*, vol. 347, pp. 764-768, 2015.

T. E. Williamson *et al.*, The origin and early evolution of Metatherian mammals: The Cretaceous record, *ZooKeys*, article 465, en ligne le 17 décembre 2014.



Un vol de sept ans pour quelques grammes d'astéroïde

Dante Lauretta

L'astéroïde Bennu est-il une menace réelle pour la Terre ? Pour le savoir et pour étudier ce corps céleste de près, la sonde spatiale OSIRIS-REx part à sa rencontre. Cette mission rapportera aussi quelques grammes de roche afin de mieux comprendre l'origine de la vie.

De tous les corps célestes qui croisent périodiquement l'orbite de la Terre, l'astéroïde Bennu est l'un des plus menaçants. Découvert en 1999, ce bolide d'un demi-kilomètre de large a été baptisé du nom de l'oiseau Bénou, dieu de la création dans la mythologie égyptienne. En effet, Bennu regorge de composés organiques et de minéraux riches en eau qui lui donneraient la capacité de disséminer les graines fondamentales de la vie telle que nous la connaissons s'il tombait sur une planète stérile. Cependant, s'il heurtait la Terre, l'astéroïde sèmerait, au contraire, la mort.

Or les astronomes prévoient qu'en 2135, Bennu passera si près de la Terre (à une distance inférieure de celle qui nous

sépare de la Lune) que sa trajectoire en sera modifiée et rendrait alors inévitable une collision avec notre planète à la fin du XXII^e siècle. Bien que personne ne soit en mesure de prédire où l'astéroïde Bennu tomberait, des calculs simples montrent que l'énergie de l'impact libérerait l'équivalent de 3 000 mégatonnes de TNT. Dans un tel scénario catastrophe, les dirigeants mondiaux auront essentiellement deux options pour éviter un désastre : évacuer de vastes régions du monde, ou infléchir la trajectoire de l'astéroïde.

Les planificateurs du futur étudieront la faisabilité de ces interventions grâce, notamment, aux données recueillies plus d'un siècle auparavant par une sonde de la

Nasa nommée OSIRIS-REx. À l'heure où cet article est mis sous presse, cette sonde devait être lancée le 8 septembre. Son objectif est simple : rendre visite à Bennu et ramener sur Terre des échantillons de l'astéroïde.

La naissance d'OSIRIS-REx

Vestiges de la formation du Système solaire, les astéroïdes sont les messagers des époques les plus lointaines de notre histoire, uniques porteurs de données relatives à des événements antérieurs de plusieurs centaines de millions d'années à la formation de la Terre. Les échantillons d'astéroïdes apporteraient des réponses



L'ESSENTIEL

- Les astéroïdes sont des vestiges intacts de la naissance du Système solaire. Ils recèlent des informations sur la formation des planètes et sur l'origine de la vie.
- L'exploitation de leurs ressources minières est envisagée par des entreprises ou des États.
- Certains, tel Bennu, risquent de heurter la Terre.
- La mission OSIRIS-REx étudiera Bennu de près. Elle rapportera un petit échantillon du sol de cet astéroïde carboné, que les scientifiques pourront analyser.

TEL UN OISEAU-MOUCHE faisant du survol au-dessus d'une fleur pour la butiner, la sonde OSIRIS-REx prélèvera en 2020 un échantillon de la surface riche en carbone de l'astéroïde Bennu. C'est la mission de retour d'échantillons d'astéroïde la plus ambitieuse jamais tentée.

© Bryan Christie

sur la naissance du Soleil, sur la formation des planètes ou sur les origines de la vie terrestre. Par ailleurs, il est crucial d'étudier ces objets pour trouver des moyens de se protéger du cataclysme que provoquerait une collision avec l'un d'eux.

Mais pourquoi concevoir des missions complexes, longues et coûteuses consistant à envoyer une sonde sur un astéroïde et à en rapporter des échantillons, alors que des morceaux d'astéroïdes, les météorites, tombent régulièrement sur la Terre ? Malheureusement, peu de ces météorites, voire aucune, nous parviennent intactes. Elles s'enflamment en rentrant dans l'atmosphère et leur surface fond. En outre, la plupart ne sont découvertes que des années, des siècles ou des millénaires après leur chute, et leurs caractéristiques si particulières s'effacent peu à peu avec l'exposition prolongée à la pluie et au vent.

En revanche, dans l'environnement stérile de l'espace profond, la plupart des astéroïdes ont conservé leur état depuis des milliards d'années. Leur rendre visite est le seul moyen d'accéder aux informations qu'ils recèlent.

Bennu est un astéroïde des plus remarquables. Il s'est formé il y a environ un milliard d'années lorsqu'un agrégat de matière a été éjecté des restes d'une protoplanète dérivant entre Mars et Jupiter. Contrairement aux fragments de météorites qui remplissent les musées, composés de roche et de métal (des matériaux suffisamment robustes pour résister à la chute sur la Terre), Bennu est une masse noire constituée de matériaux carbonés fragiles. Ces composés seraient les précurseurs de la biochimie terrestre, fondée sur le carbone. Ainsi, Bennu est un système qui mérite toute l'attention des chercheurs et dont la trajectoire redoutable est paradoxalement la condition d'une possible mission d'échantillonnage avec retour.

L'histoire d'OSIRIS-REx débute en février 2004. J'étais alors maître de conférences et travaillais au Laboratoire lunaire et planétaire de l'université d'Arizona, aux États-Unis, dont le directeur était Michael Drake. Ce dernier s'est vu confier par la Nasa, conjointement avec l'entreprise aérospatiale Lockheed Martin, le poste de responsable scientifique d'une mission

dont l'objectif était d'aller chercher un échantillon d'astéroïde. À la demande de Michael Drake, j'intégrais également ce projet pour devenir son adjoint.

Ma tâche initiale consistait à définir la stratégie scientifique de la mission. Depuis plus d'une décennie, je travaillais sur les météorites et je connaissais toutes les questions en suspens auxquelles il ne serait possible de répondre que grâce à l'analyse d'un échantillon de matériau suffisamment gros et intact provenant d'un astéroïde. À l'époque, un seul autre projet était comparable au nôtre : la mission *Hayabusa* de l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise. Son rendez-vous avec l'astéroïde Itokawa, en 2005, en vue d'y prélever des échantillons, a été un succès mitigé. La sonde est parvenue à recueillir 1 500 grains microscopiques de minéraux, bien moins que prévu. En outre, Itokawa est un objet brillant et rocheux dont l'histoire et le potentiel scientifique

des ressources intéressantes susceptibles d'être un jour exploitées. Plus nous en apprendrons sur l'orbite, la composition et les autres caractéristiques de Bennu, meilleures seraient nos chances de déterminer s'il présente une menace pour la Terre, et les moyens éventuels d'en défléchir la trajectoire pour notre sécurité. Enfin, les données recueillies *in situ* par la sonde seraient comparées aux observations faites depuis la Terre et aux modèles théoriques : nous serions en mesure de cerner et de corriger les défauts qui entachent nos observations et nos modèles théoriques, ce qui consoliderait l'étude d'une grande variété d'astéroïdes du Système solaire.

Cette ébauche de liste est devenue le fil conducteur de la mission et l'origine de son acronyme. OSIRIS-REx signifie *Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security-Regolith Explorer*. Le 25 mai 2011, la Nasa a confirmé la mise en œuvre de la mission OSIRIS-REx. Malheureusement, Michael Drake est décédé peu après, en septembre 2011, et j'ai dû le remplacer en tant que responsable scientifique.

Le voyage d'OSIRIS-REx a débuté il y a quelques semaines par le lancement de la sonde depuis Cap Canaveral, en Floride, sur une fusée Atlas V. Elle voyagera à travers le Système solaire durant près de deux ans avant de rejoindre Bennu en août 2018. Elle se mettra en orbite autour de l'astéroïde pendant plus de trois ans, pour le cartographier de façon exhaustive et y prélever un échantillon d'au moins 60 grammes.

Cet échantillon témoignera d'événements qui se sont déroulés tout au long de l'histoire du Système solaire. Les plus vieux minéraux contenus dans la structure de Bennu sont des grains « présolaires » microscopiques qui se sont formés dans les vents stellaires émis par des étoiles mourantes. Ces grains sont les constituants primordiaux des planètes. Les constituants les plus jeunes de Bennu sont des minéraux et des composés qui ont été modifiés à l'échelle du micromètre et au fil du temps par l'exposition aux rayons cosmiques et aux éruptions solaires. L'étude par OSIRIS-REx de ces processus d'« érosion spatiale » sur un astéroïde carboné sera sans précédent.

L'échantillon collecté par OSIRIS-REx sera un témoin de la jeunesse du Système solaire ; il devrait contenir des précurseurs de la biochimie terrestre

sont très différents des astéroïdes carbonés sombres tels que Bennu.

Un soir, j'ai décidé de coucher sur le papier les principaux thèmes scientifiques de la mission. J'ai écrit quatre mots : origines, spectroscopie, ressources et sécurité. Des échantillons parfaitement conservés d'un astéroïde nous en apprendraient davantage sur les origines des planètes et l'apparition de la vie. Des études spectroscopiques de sa surface révéleraient si le sol renferme



L'ÉPOPÉE D'OSIRIS-REx a débuté douze ans avant son lancement en septembre 2016. La sonde a tout d'abord été assemblée (a), puis testée dans une chambre à vide (b) et dans des laboratoires d'acoustique (c) au sein du complexe Space Systems de Littleton, dans le Colorado, aux États-Unis.

À l'instar des autres astéroïdes carbonés, Bennu est majoritairement constitué de molécules organiques et de minéraux argileux riches en eau. Une partie de cette eau a été liquide autrefois, chauffée au cœur de l'astéroïde par la désintégration d'éléments radioactifs à courte durée de vie tels que l'aluminium 26 et le fer 60.

Les composés organiques et l'eau constituent la matière première brute des éléments de base de la vie sur Terre que sont l'ADN, l'ARN et les protéines. Un nombre immense d'astéroïdes carbonés a dû tomber sur la Terre dans sa jeunesse, d'où la question : ces corps ont-ils semé des germes de vie sur notre planète ? Il est difficile de répondre, car il ne reste pas de roches non altérées suffisamment anciennes pour raconter cette histoire.

La mission OSIRIS-REx n'a pas pour seul objectif de découvrir les briques originelles de la vie. Elle recueillera aussi des informations importantes pour notre avenir. Plusieurs entreprises privées et de nombreux États étudient la possibilité

d'une exploitation minière des astéroïdes pour pallier la rareté ou l'épuisement des ressources terrestres. Ces acteurs évaluent les techniques à mettre en place pour extraire des métaux précieux afin de les utiliser ensuite sur notre planète, mais également des méthodes utilisant de la glace d'eau afin de produire, directement dans l'espace, du carburant destiné aux fusées. Grâce à sa capacité à cartographier précisément un astéroïde et à manœuvrer autour de celui-ci, OSIRIS-REx servira de précurseur pour de futures missions d'exploitation minière sur des astéroïdes carbonés.

La menace Bennu

Un autre volet de la mission d'OSIRIS-REx consiste à améliorer les techniques de prévision d'éventuelles collisions d'astéroïdes avec la Terre et les méthodes de prévention. En effet, pour déterminer si un astéroïde percutera la Terre, il faut mesurer son orbite avec une précision extrême. Pour apprécier la difficulté de cette tâche,

■ L'AUTEUR



Dante LAURETTA est professeur de planétologie à l'université d'Arizona.

Ses principaux thèmes de recherche sont la formation de planètes habitables et l'apparition de la vie extraterrestre.