

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 heurterait 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.

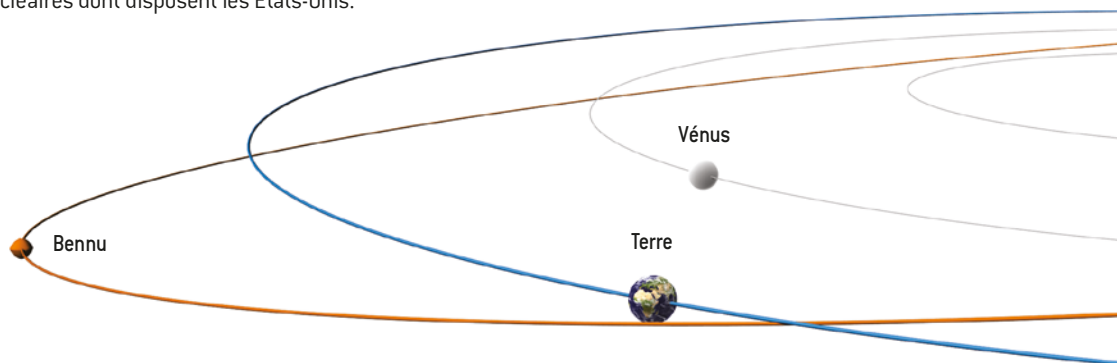
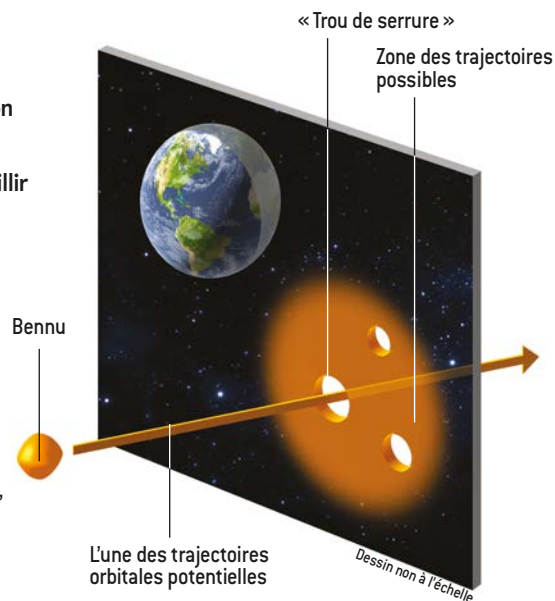
Ses principaux thèmes de recherche sont la formation de planètes habitables et l'apparition de la vie extraterrestre.

En septembre 2016, la sonde OSIRIS-REx de la Nasa a entrepris un voyage interplanétaire vers Benu, un astéroïde géocroiseur de 500 mètres de diamètre qui risque un jour de frapper la Terre ❶.

En améliorant nos connaissances sur les phénomènes qui perturbent l'orbite de Benu, OSIRIS-REx révélera si l'astéroïde va effectivement entrer en collision avec la Terre, et nous fournira des informations cruciales pour éviter une telle catastrophe ❷. L'objectif principal de la mission, cependant, consistera à recueillir un échantillon de la surface de Benu riche en molécules organiques, datant de l'époque de la formation du Système solaire ❸.

❶ Une proximité alarmante

En 2135, Benu frôlera la Terre et s'en approchera à moins de 300 000 kilomètres, soit une distance inférieure à celle qui nous sépare de la Lune. Au cours de cette traversée infralunaire, la trajectoire de l'astéroïde sera modifiée par le champ gravitationnel de la Terre. Parmi toutes les déviations possibles, certaines amèneraient Benu sur une trajectoire qui donnerait lieu à une collision lors d'un des prochains passages de l'astéroïde. Il existe ainsi quelques régions de taille kilométrique, tels des « trous de serrure » autour de la Terre, où Benu ne doit pas passer, au risque de devenir dangereux. S'il frappe la Terre, Benu libérerait autant d'énergie que l'explosion de toutes les ogives nucléaires dont disposent les États-Unis.

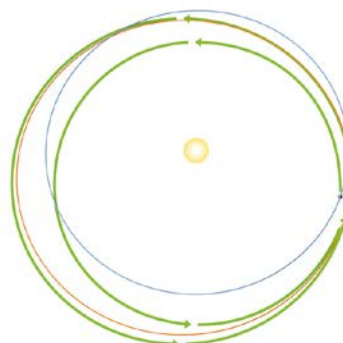


❸ Le voyage d'OSIRIS-REx

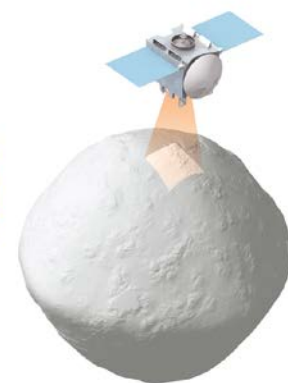
Après son lancement en septembre 2016, la sonde effectuera une croisière de deux ans jusqu'à Benu (avec un survol de la Terre pour acquérir un supplément de vitesse). En 2018, à son arrivée en orbite autour de Benu, OSIRIS-REx commencera à cartographier l'astéroïde afin d'identifier de possibles sites d'atterrissage. Selon les meilleures estimations, la sonde se posera brièvement sur l'un des sites vers la fin de 2020 et récupérera un échantillon grâce à son bras rétractable. Cinq secondes plus tard, la sonde décollera pour entamer son retour. Après deux années et demie de voyage vers la Terre, OSIRIS-REx éjectera la capsule d'échantillons qui rentrera dans l'atmosphère et s'échouera dans le désert de l'Utah, où elle sera récupérée.



Septembre 2016



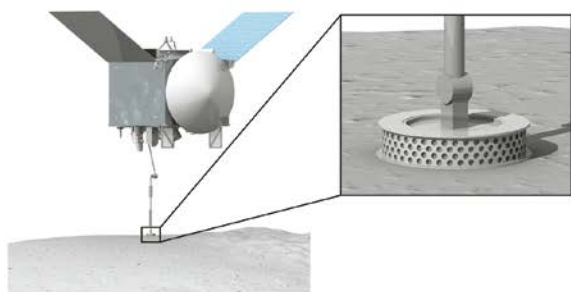
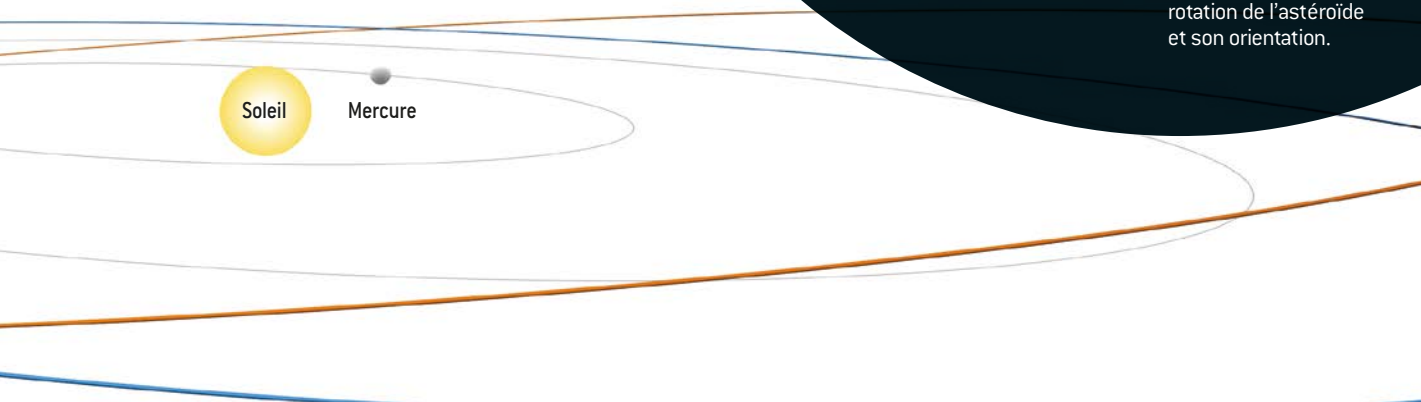
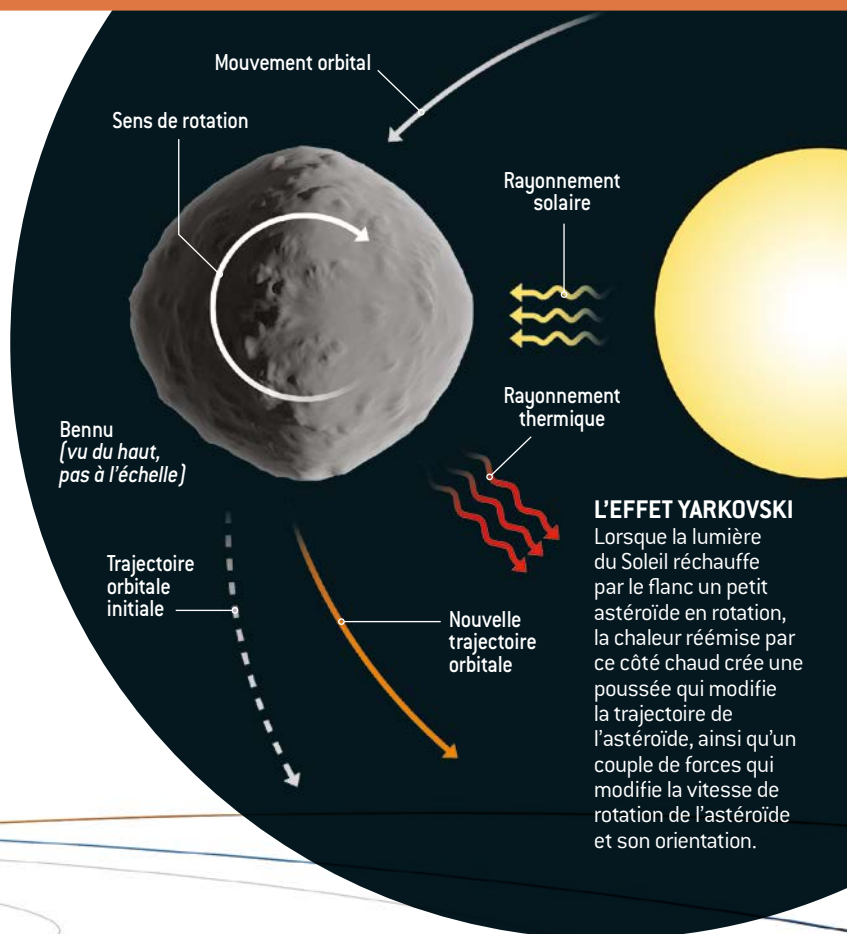
Voyage aller
de 2 ans



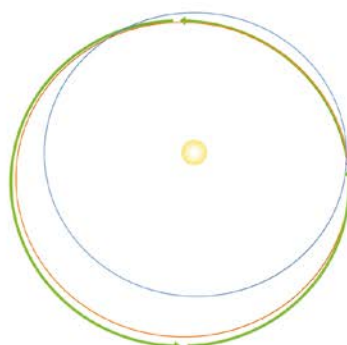
Août 2018

② Un astéroïde à la dérive

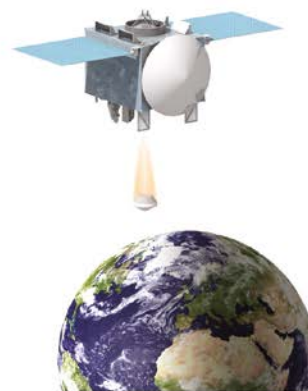
OSIRIS-REX mesurera les facteurs en jeu dans l'effet Yarkovski (*voir ci-contre*) avec une précision sans précédent. Prendre en compte ce phénomène dans le déplacement de l'astéroïde est crucial pour déterminer si Benu passera à travers l'un des « trous de serrure » en 2135 et, si c'est bien le cas, où sa trajectoire le mènera ensuite. L'effet Yarkovski entraîne, selon les cas, une dérive de l'astéroïde vers le Soleil ou vers l'extérieur du Système solaire. Il est ainsi à l'origine d'une dérive en direction du Soleil de 160 kilomètres de la trajectoire initiale mise au jour en 1999. L'effet Yarkovski sera évalué par OSIRIS-REX au fil de sa mission, lorsque la sonde mesurera la forme, la densité et la composition de la surface de Benu à la recherche d'un site d'atterrissage pour le prélèvement d'un échantillon.



Juillet 2020



À partir de mars 2021,
voyage retour de 2,5 ans



Fin 2023

considérons les distances et les forces en jeu. Bennu fait le tour du Soleil en 438 jours à une vitesse orbitale de plus de 28 kilomètres par seconde. En une seule orbite, cet astéroïde parcourt plus de un milliard de kilomètres. Au plus loin, l'astéroïde se trouve à quelque 340 millions de kilomètres de la Terre, et il s'en approche au plus près tous les six ans.

Une orbite bien mesurée, mais qui peut varier

Cette périodique proximité a permis aux astronomes d'étudier l'orbite de Bennu pour en faire l'astéroïde le plus précisément mesuré. L'incertitude sur le demi-grand axe de sa trajectoire elliptique est de seulement 6 mètres, sur une longueur totale de 168 505 699 049 kilomètres. Cela équivaldrait à mesurer la distance entre New York et Los Angeles avec une précision d'environ un tiers de millimètre. Mais la seule précision orbitale ne suffit pas pour anticiper les déplacements de Bennu, car de nombreuses forces externes sont susceptibles de modifier l'orbite de l'astéroïde.

Afin de déterminer la trajectoire de Bennu, l'équipe d'OSIRIS-REx utilise des modèles numériques de haute précision qui prennent en compte l'influence des forces externes agissant sur l'astéroïde, en particulier les effets gravitationnels du Soleil, de la Lune et des huit planètes, ainsi que d'autres gros astéroïdes et de la planète naine Pluton. Joue aussi le caractère légèrement aplati de la Terre, qui induit des variations notables de la trajectoire de l'astéroïde lorsque celui-ci passe à proximité.

Grâce à la précision de ces modèles, les astronomes prédisent que Bennu passera à moins de 300 000 kilomètres de la Terre en 2135. Ce qu'il adviendra ensuite est plus difficile à prévoir. Mais une chose est sûre : si Bennu traverse certaines régions particulières de l'espace infralunaire, les effets gravitationnels cumulés seront tels que l'astéroïde déviara et sa trajectoire présentera un risque de collision avec la Terre vers la fin du XXII^e siècle.

Nous n'en savons pas assez sur Bennu pour prédire s'il traversera effectivement l'une des zones de l'espace qui le déviaraient dangereusement. À ce jour, nous estimons

la probabilité d'un impact en 2196 à environ 1/10 000. Si l'on considère toutes les trajectoires d'impacts potentiels de l'astéroïde entre 2175 et 2196, la probabilité de collision augmente pour atteindre 1/2700. Heureusement, Bennu semble avoir tout autant de chances d'être complètement éjecté du Système solaire interne que de frapper la Terre. S'il évite l'une ou l'autre de ces issues, l'astéroïde a une probabilité équivalente de finir par tomber dans le Soleil et une probabilité un peu plus faible d'entrer en collision avec Vénus. Dans une moindre mesure, un accrochage avec Mercure, Mars ou Jupiter reste également possible.

La mission OSIRIS-REx nous fournira des informations sur la surface de Bennu et sa structure interne, ainsi que sur l'ensemble des perturbations que l'astéroïde subit. Ces données amélioreront la précision de nos prévisions.

Au cours
de ses trois ans en orbite,
OSIRIS-REx ne se posera que
5 secondes
sur Bennu

Cependant, la plus grande contribution d'OSIRIS-REx portera sur l'étude d'un phénomène non gravitationnel récemment découvert, l'effet Yarkovski (voir page 43). Celui-ci décrit la force exercée sur un petit astéroïde de forme irrégulière lorsqu'il absorbe la lumière solaire et renvoie l'énergie vers l'espace sous forme de chaleur. S'il n'est pas distribué de façon homogène sur l'ensemble de l'astéroïde, le rayonnement thermique réémis agit comme un minuscule propulseur et entraîne une

lente dérive de l'orbite. Les astéroïdes dont la rotation est de sens direct (qui tournent d'ouest en est, comme la Terre) s'éloignent du Soleil sous l'effet de cette poussée. À l'inverse, les astéroïdes à la rotation rétrograde, tel Bennu, dérivent vers l'intérieur du Système solaire.

Nous avons déjà utilisé des télescopes terrestres et spatiaux pour mesurer l'effet Yarkovski sur Bennu et démontré que son orbite s'est décalée de plus de 160 kilomètres depuis sa découverte en 1999. Cela signifie que Bennu a probablement des origines plus lointaines dans la ceinture d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter, et qu'il aurait par la suite migré vers l'intérieur de la ceinture et atteint sa position actuelle.

L'effet Yarkovski agit aussi sur la rotation de Bennu : la lumière frappe de façon asymétrique la surface de l'astéroïde et le rayonnement réémis crée un couple de forces qui augmente sa vitesse de rotation. L'une des conséquences de ce phénomène est la déformation du corps : du matériau de surface des pôles se déplace vers l'équateur sous l'effet de la force centrifuge qui se renforce (ce qui explique la forme en toupie de Bennu). Le remaniement à grande échelle de la surface qui en résulte a peut-être exposé du matériau frais, non érodé, à la surface de Bennu, ce qui serait idéal pour prélever un échantillon.

En mesurant la rotation de Bennu, sa superficie et son émission thermique, OSIRIS-REx effectuera une étude détaillée de l'effet Yarkovski et de son impact sur l'astéroïde. L'amélioration de nos connaissances sur l'effet Yarkovski permettra de mieux évaluer les risques liés aux astéroïdes géocroiseurs. En outre, une meilleure compréhension de ce phénomène sera cruciale pour les éventuelles futures missions de déflexion des astéroïdes, un moyen envisagé pour repousser ces bolidés spatiaux vers une trajectoire moins menaçante.

Depuis son élaboration au milieu des années 2000 jusqu'à sa conclusion dans les années 2020, le programme OSIRIS-REx représente un investissement de centaines de millions de dollars et de nombreuses heures de travail pour une équipe de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens. Tous



ces efforts et ces dépenses seront à l'esprit de l'ensemble des acteurs du projet lors de la phase cruciale qui ne durera pas plus de cinq petites secondes, lorsque OSIRIS-REx devra se poser pour redécoller aussitôt après avoir prélevé un échantillon à la surface de l'astéroïde.

Toute cette opération reposera sur l'instrument TAGSAM (*Touch-And-Go Sample Acquisition Mechanism* ou « mécanisme d'acquisition d'échantillon par posé-décollé »). Ce dernier est constitué de deux principaux éléments : une tête de prélèvement et un bras de positionnement articulé. La tête émettra un jet d'azote gazeux qui « fluidifiera » un fragment de sol et le propulsera dans une chambre de prélèvement. TAGSAM contient assez d'azote pour trois tentatives d'échantillonnage – trois, pas une de plus. Le bras articulé positionnera la tête pour le prélèvement, puis la ramènera pour une analyse visuelle et la placera dans une capsule pour le retour sur Terre.

Comme solution de secours, 24 pastilles de contact avec la surface sont réparties sous le socle de TAGSAM. Elles récolteront du matériau à grains fins au moment où elles toucheront la surface de l'astéroïde.

La préparation de cette manœuvre finale occupera la plus grande part des trois années de révolution de la sonde autour de Bennu. Avec ses caméras, ses lasers, ses antennes radio et ses spectromètres, OSIRIS-REx effectuera de multiples relevés à haute résolution de l'astéroïde dans son intégralité. À partir de ces données, les équipes terrestres reconstruiront une carte de Bennu et détermineront un site principal de prélèvement (et un autre de secours), en fonction de la sécurité, de la facilité d'extraction et de la valeur

OSIRIS-REx À L'APPROCHE DE BENNU.

Sur cette image de synthèse, la sonde semble bien petite à côté de l'astéroïde d'un demi-kilomètre d'envergure. Par sa taille, ce corps céleste serait dangereux si son orbite croisait la trajectoire de la Terre. Cependant, du fait de sa composition primitive, Bennu constitue une cible intéressante et accessible pour une mission d'extraction et retour d'un échantillon.

scientifique attendue du matériau présent. Les sites les plus intéressants sur le plan scientifique devraient contenir une variété de composés organiques, de minéraux riches en eau et d'autres matériaux susceptibles de nous aider à savoir si les astéroïdes ont contribué à l'origine de la vie sur Terre.

Dès que l'équipe d'OSIRIS-REx aura choisi le site de prélèvement et effectué toutes les répétitions générales de rigueur, la manœuvre finale sera lancée. Bennu sera alors probablement aux confins de son orbite par rapport à la Terre, à plus de 18 minutes-lumière. L'équipe du projet n'aura alors plus aucun moyen d'intervenir et devra attendre que le processus automatique se déroule.

En trois poussées réparties sur quelques heures, OSIRIS-REx quittera son orbite, s'alignera avec le site d'atterrissage et descendra lentement vers la surface de l'astéroïde. Il se posera à une vitesse relative de 10 centimètres par seconde au plus. TAGSAM disposera de 5 secondes pour recueillir ses échantillons avant que la sonde ne redécolle et s'élève à une altitude d'environ 10 kilomètres au-dessus de Bennu. Là, l'instrument fera une série de tests pour s'assurer du succès de l'échantillonnage.

La mission s'achèvera en 2023... si tout va bien

En 2021, la sonde allumera ses moteurs principaux pour rapporter son précieux échantillon sur Terre. Fin 2023, après avoir largué la capsule de retour d'échantillon dans l'atmosphère terrestre, OSIRIS-REx allumera une ultime fois ses moteurs et rejoindra définitivement une orbite autour du Soleil. La capsule de retour d'échantillon pénétrera le haut de l'atmosphère terrestre à une vitesse avoisinant 45 000 kilomètres par heure, sous la protection d'un bouclier thermique capable d'évacuer 99 % de son énergie de rentrée. À une altitude de 3 000 mètres, la capsule déploiera un parachute pour atterrir en douceur dans le désert de l'Utah, sept ans après le début de son voyage.

L'échantillon sera récupéré et transporté jusqu'au centre spatial Johnson de la Nasa où il sera stocké de façon optimale. Des morceaux en seront ensuite distribués auprès de la communauté scientifique pour étude, ce qui occupera des chercheurs pendant plusieurs décennies. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

Météorites, astéroïdes, comètes, *Dossier Pour la Science*, n° 90, janvier-mars 2016.

D. S. Lauretta et al., *The OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu*, *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 50 (4), pp. 834-849, 2015.

A. Rubin, *Les secrets des météorites primitives*, *Pour la Science*, n° 425, mars 2013.

D. S. Lauretta et H. Y. McSween (Éds.), *Meteorites and the early Solar system II*, University of Arizona Press, 2006.

R. Schweickart et al., *Remorqueur d'astéroïdes*, *Pour la Science*, n° 319, mai 2004.

LA FIXATION POSTMORTEM D'UN CERVEAU
à l'aide d'un hydrogel permet d'observer chaque
neurone de la structure et ses connexions,
comme ici dans le cortex préfrontal d'une souris.