

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 1/2 700. 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 bolides 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 redécroche 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.