

Nos recherches résolvent encore une autre énigme concernant les crocodiliens. Lors de nos mesures de la force de morsure du grand crocodile marin australien, nous avons constaté que les mâchoires de l'animal res-

La pression exercée par les dents du *T. rex* aurait atteint 30 tonnes par centimètre carré

taient resserrées sur le capteur dix minutes durant. Et que lorsqu'on faisait bouger le capteur, l'animal resserrait ses mâchoires avec presque la même intensité que pour la morsure initiale. J'ai personnellement constaté à 22 reprises de tels serrages, et attendu jusqu'à 25 minutes avant de pouvoir récupérer l'équipement – quand le crocodile daigne bien le rendre... Cela nous a conduits à nous interroger sur la signification de ce serrage et sur la façon dont il se produit.

À cette fin, nous avons raccordé un ordinateur à notre appareil de mesure de force de morsure et enregistré la force de serrage tout au long de mesures sur des alligators américains sauvages. Cette série de mesures a montré que les forces de serrage ne valaient qu'environ 10% des forces de morsure maximales. Nous estimons que ce comportement est lié à la façon dont les alligators noient les grandes proies. Dans la nature, les alligators mordent en général fortement leur gibier pour le transpercer puis, la prise étant assurée par les dents, réduisent l'effort et emportent la proie dans des eaux plus profondes pour la noyer. Si elle se débat, les alligators remordent à pleine force.

Les dissections effectuées par Paul Gignac ont révélé que ces capacités de prise et de serrage proviennent d'une remarquable spécialisation physiologique des muscles. Ce chercheur a noté que les puissants muscles refermant les mâchoires sont de couleur blanche, analogues aux muscles pectoraux de la dinde, lesquels peuvent engendrer un effort de courte durée pour le vol, mais s'épuisent rapidement par manque d'approvisionnement en sang. Il découvrit ensuite des muscles rouges et roses permettant en revanche d'assurer une prise durable à faible force. Ils sont

apparentés à la chair foncée trouvée dans les pattes de la dinde, qui sont fortement vascularisées et riches en myoglobine, ce qui rend possible une marche soutenue. Le modèle de Paul Gignac montre que ces muscles foncés non remarqués auparavant engendrent 10% de la force de morsure, juste assez pour garder les dents engagées dans la proie.

Nos travaux peuvent par ailleurs aider à comprendre l'alimentation d'autres animaux que les crocodiliens. Paul Gignac et moi avons utilisé nos résultats afin de mettre au point le premier modèle fiable de la force de morsure du tyrannosaure, *Tyrannosaurus rex*. Les estimations précédentes de la force de morsure de *T. rex* résultaient de modèles fondés sur des alligators, des lézards ou même des mammifères. Les résultats étaient disparates puisqu'ils variaient entre 8200 et 111200 kilogrammes. En revanche, notre modèle, qui est spécifique aux archosaures (le groupe comprenant les crocodiliens, les oiseaux et leurs parents éteints) a donné une valeur d'environ 3600 kilogrammes. C'est le double de ce que peuvent fournir les plus grands crocodiliens actuels. La pression dentaire du *T. rex*, qui atteindrait environ 30000 kilogrammes par centimètre carré, est en outre la plus forte pression jamais estimée chez un animal.

COMMENT LE TYRANNOSAURE PULVÉRISAIT LES OS DE SES PROIES

Ces nouvelles estimations, publiées en 2017, ont résolu la question sur la façon dont, comme l'indiquent les preuves fossiles, ce dinosaure emblématique pulvérisait les os de ses proies. Aujourd'hui, seuls les mammifères carnivores dont les dents supérieures et inférieures viennent en contact complet (occlusion) lors de la mastication peuvent accomplir un tel exploit.

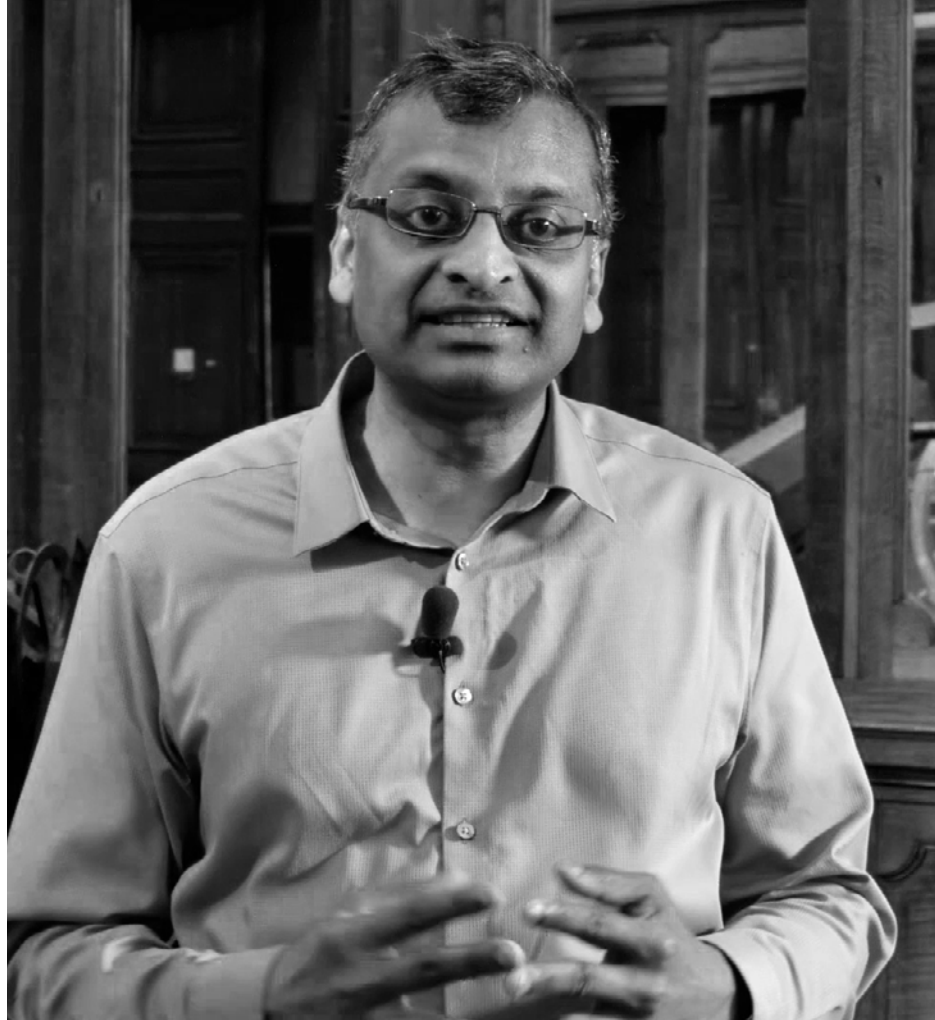
Si nous avons beaucoup progressé dans la compréhension du succès évolutif des crocodiliens, de nombreuses questions subsistent. Par exemple, il est possible que l'influence de la forme de leur museau sur la force de morsure diffère sous l'eau. Un point dont l'étude impliquera de répéter nos expériences, ce qui est plus facile à écrire qu'à faire: il nous faudra mettre au point de nouveaux appareils de mesure fonctionnant en milieu aquatique et nous associer à des ingénieurs pour comprendre comment l'écoulement de l'eau pourrait jouer sur la vitesse de fermeture des mâchoires et la force de morsure. Bien entendu, il nous faudra aussi mettre au point de nouveaux protocoles de sécurité en n'oubliant pas que, sous l'eau, les crocodiliens sont dans leur élément et qu'ils sont donc plus dangereux. Nous allons y arriver, même si cela nous demandera sans doute beaucoup de temps et d'efforts. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. M. Gignac et G. M. Erickson, **The biomechanics behind extreme osteophagy in *Tyrannosaurus rex***, *Scientific Reports*, vol. 7, article 2012, 2017.

G. M. Erickson et al., **Insights into the ecology and evolutionary success of Crocodilians revealed through bite-force and tooth-pressure experimentation**, *PLoS One*, vol. 7(3), article e31781, 2012.

**ALAIN
DORESSOUDIRAM**
est astrophysicien au
Laboratoire d'études spatiales
et d'instrumentation
en astrophysique (Lesia)
de l'Observatoire de Paris.
Il est responsable d'un
des instruments scientifiques
de la mission *BepiColombo*.



Mercure est bien loin d'être une Lune-bis

Le lancement de la mission spatiale *BepiColombo* est prévu pour ce mois d'octobre ou de novembre. Objectif : la planète Mercure, autour de laquelle les deux sondes embarquées se mettront en orbite en 2025. À quelles questions cette mission, la troisième seulement à visiter la planète la plus proche du Soleil, va-t-elle répondre ? Les explications de l'astrophysicien Alain Doressoundiram.

De toutes les planètes rocheuses du Système solaire, Mercure est celle qui a été la moins visitée. Pourquoi ?

Jusqu'à présent, seules deux sondes ont survolé Mercure: *Mariner 10* entre 1974 et 1975, puis *Messenger* entre 2011 et 2015. *BepiColombo* sera donc la troisième sonde à visiter la planète la plus proche du Soleil. La première raison à cette rareté des explorations est qu'on a longtemps pensé que Mercure était juste une «Lune-bis», donc un corps *a priori* pas très intéressant. On sait maintenant que c'est tout le contraire: Mercure est très surprenante.

La seconde raison est technique. Même si Mercure est à environ 60 millions de kilomètres du Soleil et qu'elle n'est donc *a priori* pas si lointaine de la Terre (laquelle est à peine 2,5 fois plus distante de l'astre du jour), envoyer une sonde pour la mettre en orbite autour de Mercure demande beaucoup d'énergie. C'est donc une mission coûteuse, comparable aux missions qui explorent les parties externes du Système solaire.

Pourquoi faut-il beaucoup d'énergie ?

Lorsqu'elle se rapproche du Soleil, la sonde gagne en vitesse, puisqu'elle tombe vers l'étoile. Il faut donc freiner pour réduire la vitesse à environ 13 kilomètres par seconde, de façon que la sonde soit capturée par la gravité de Mercure. Et pour freiner, il faut de l'énergie. On pourrait utiliser des systèmes de propulsion classiques avec du carburant. Mais cela coûterait beaucoup trop cher, sachant que le carburant représente une grande part de la masse de la sonde au moment du décollage.

Quelle est donc la solution ?

Pour freiner, on adopte une autre approche: l'assistance gravitationnelle. Le parcours de la sonde est calculé de telle sorte qu'elle frôle une planète et mette à profit son champ gravitationnel afin de gagner ou perdre de la vitesse (selon la façon dont on s'approche de la planète). C'est une stratégie très utilisée dans l'exploration du Système solaire. Par exemple, la sonde *Rosetta* a profité de plusieurs assistances gravitationnelles pour atteindre la comète Tchouri après plus de dix ans de voyage. Avec neuf assistances gravitationnelles (un survol de la Terre, deux de Vénus et six de Mercure elle-même avant la mise en orbite), *BepiColombo* établit un record; cela explique aussi pourquoi la sonde mettra sept ans pour arriver à destination.

Pourquoi la mission *BepiColombo* a-t-elle été nommée ainsi ?

En hommage justement au scientifique italien Giuseppe «Bepi» Colombo, un spécialiste de l'assistance gravitationnelle. Il avait conçu la trajectoire de la sonde *Mariner 10*, qui a ainsi effectué trois survols de Mercure au lieu d'un grâce à l'assistance gravitationnelle. Ce

chercheur a aussi expliqué la résonance gravitationnelle particulière de Mercure, notée 3:2. La planète réalise trois tours sur elle-même (le jour mercurien dure 58,6 jours terrestres) en exactement deux révolutions autour du Soleil (une année mercurienne dure 88 jours terrestres). Ce phénomène s'explique par la proximité de Mercure au Soleil et les forces de marée qu'exerce l'étoile sur la planète. C'est le même mécanisme qui fait que la Lune présente toujours la même face à la Terre: notre satellite tourne sur lui-même en un temps exactement égal à celui qu'il lui faut pour faire un tour complet autour de la Terre.

Pourquoi pensait-on que Mercure était similaire à la Lune et donc d'un intérêt limité ?

Les premières images de la surface de Mercure, prises par *Mariner 10*, ont montré qu'elle est couverte de cratères d'impact. Quelque chose donc de très similaire à la Lune. Et par certains aspects, Mercure était même moins palpitante. Par exemple, on n'observait aucune trace d'activité volcanique actuelle ou passée, alors que les mers lunaires sont d'anciens bassins remplis de magma qui s'est refroidi. Mercure semblait donc assez inerte et bien moins intéressante que Mars, Vénus ou les géantes gazeuses.

Le seul point dans les observations de *Mariner 10* qui suscitait un peu de curiosité était la présence d'un champ magnétique planétaire. Son intensité était estimée à environ 1,1% de celle du champ magnétique terrestre. C'est suffisant pour dévier le vent solaire (le flux d'ions et d'électrons éjectés par la haute atmosphère du Soleil) et constituer une magnétosphère. Mais les données de la sonde étaient insuffisantes pour dire s'il s'agissait d'un champ rémanent, c'est-à-dire un champ magnétique qui aurait été préservé lors de la solidification de roche fondue, ou d'un champ magnétique actif.

Finalement, c'est un peu pour toutes ces raisons, coût de la mission et faible intérêt scientifique, qu'il a fallu attendre plus de trente ans pour qu'une nouvelle sonde, *Messenger*, aborde Mercure.

Et les observations de *Messenger* ont créé la surprise ?

À plus d'un titre! Les résultats des sept instruments scientifiques embarqués sur *Messenger* ont soulevé de nombreuses questions. L'une des plus importantes concerne le champ magnétique. La sonde a confirmé que le champ de Mercure est actif et qu'il est de même nature que celui de la Terre. Cela signifie qu'il est créé par un noyau de fer liquide dont les mouvements de rotation, de convection et de turbulence engendrent un effet dynamo. Or cette observation pose des questions. Pourquoi la Terre et Mercure ont-elles un champ magnétique alors ➤

> que Mars et Vénus n'en ont pas ou plus? Pour Vénus, la raison est probablement liée à sa faible vitesse de rotation. Pour Mars, c'est son refroidissement. La chaleur accumulée lors de sa formation s'est dissipée dans l'espace sous la forme de rayonnement infrarouge, et la différence de température entre le centre de la planète et sa surface est aujourd'hui insuffisante pour entraîner des mouvements de convection dans le noyau de fer. Or le temps de refroidissement est proportionnel au rayon de la planète, ce qui explique pourquoi Mars a perdu son champ magnétique et pas la Terre, qui est plus grosse. Mais comme Mercure est encore plus petite que Mars, on ne comprend pas pourquoi l'effet dynamo y subsiste encore.

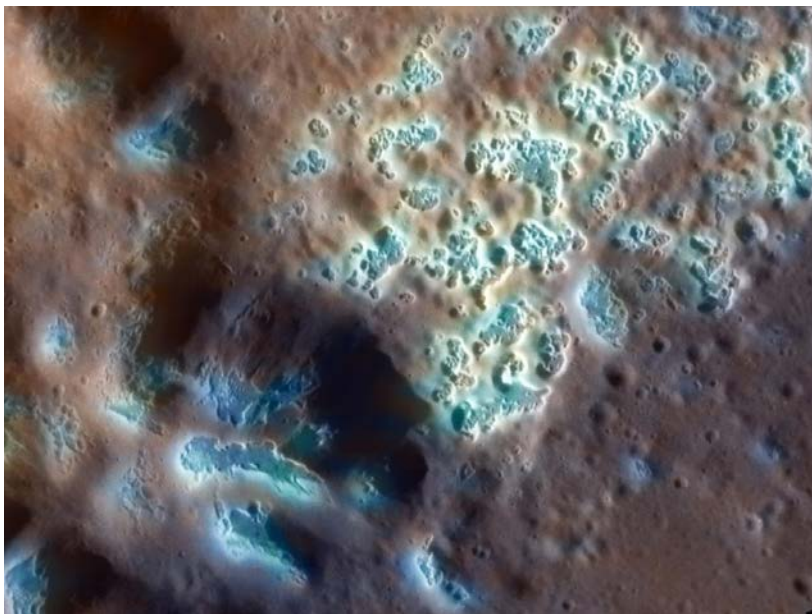
Que sait-on de la structure interne de Mercure?

À partir des données sur la masse de la planète et son diamètre, les scientifiques ont montré que c'est l'un des corps les plus denses du Système solaire. À titre de comparaison, Ganymède, une lune de Jupiter, est de taille comparable à Mercure alors que sa masse est deux fois moindre.

Pour expliquer une telle densité, le noyau de fer mercurien (plus lourd que la roche du manteau et de la croûte) doit représenter 60% de la masse totale de la planète. Le reste est constitué du manteau, d'environ 400 kilomètres d'épaisseur, et d'une croûte, épaisse de 50 kilomètres (sur un rayon total de 2440 kilomètres). Or pour la Terre ou Mars, le noyau de fer ne représente qu'environ 30% de la masse totale.

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer cette structure surprenante. Mercure aurait eu une masse deux fois plus importante, mais une collision avec un planétésimal aurait pulvérisé une partie de son enveloppe rocheuse

Ces dépressions irrégulières (en bleu) à la surface de Mercure sont nommées *hollows* (« creux » en anglais). Leur nature est encore inconnue. Il est possible qu'elles continuent de se former aujourd'hui, auquel cas la surface de Mercure est loin d'être aussi inerte qu'on ne le pensait.



en laissant le noyau intact. Autre solution: lors de sa naissance dans la nébuleuse de gaz et de poussière du Soleil en formation, la planète se serait formée dans une région pauvre en matériau rocheux. Ce dernier aurait été repoussé au loin par la chaleur de la protoétoile, laissant une majorité d'éléments lourds tels que le fer. Il reste à départager ces scénarios. D'autant plus que, pour l'instant, les modèles de formation des planètes n'expliquent pas les propriétés de Mercure. Cette dernière est un peu le chaînon manquant de la planétologie. Nous avons besoin de mieux comprendre Mercure pour affiner nos modèles. Par la même occasion, nous en saurons alors plus sur la formation de la Terre et des planètes extrasolaires.

Le gros noyau de fer est-il la seule particularité de la structure de Mercure?

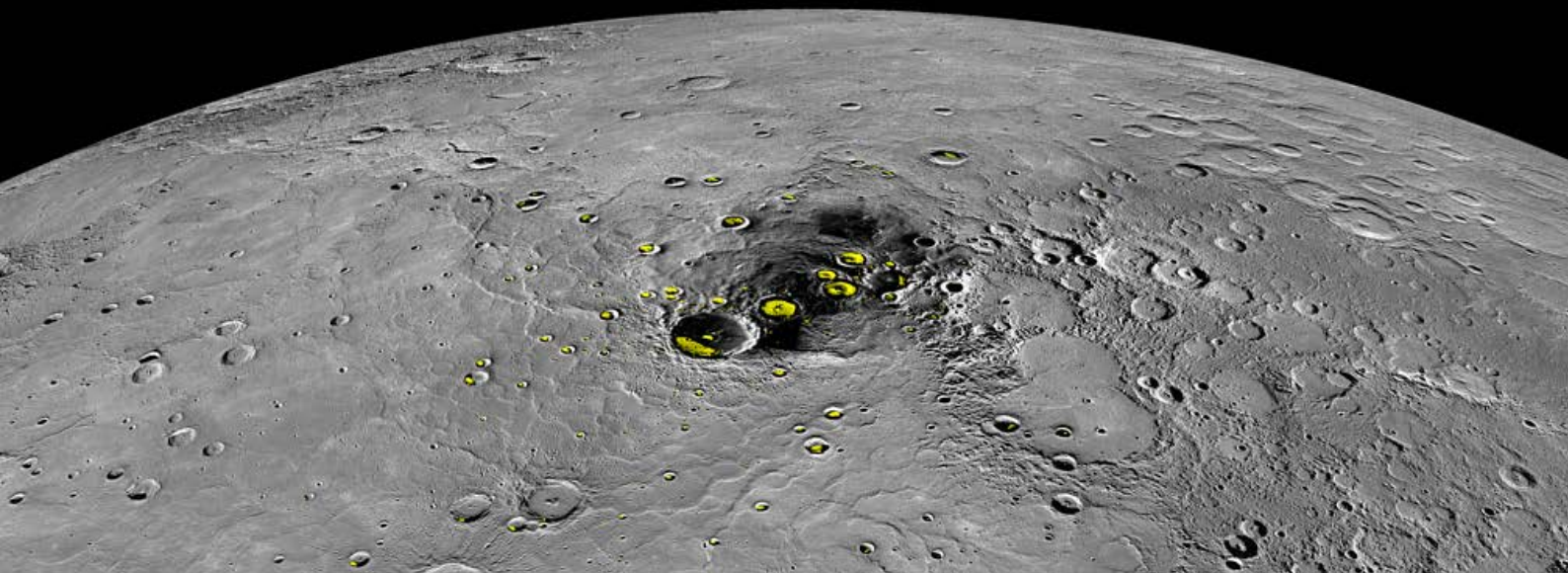
Si l'intérieur de Mercure est très riche en fer, à l'inverse, sa surface est très pauvre en éléments lourds, bien plus pauvre que la Lune par exemple. Là encore, nous n'avons pas d'explication. Et pour rajouter au paradoxe, la surface est riche en éléments volatils. Ces éléments légers devraient *a priori* s'échapper facilement de la planète; or ils sont toujours là sur Mercure, exposée au vent solaire et où la température peut monter jusqu'à 430 °C.

Autre différence avec la Lune, la surface de Mercure est deux fois plus sombre. On suppose qu'elle est recouverte d'une couche riche en carbone dont l'origine fait débat. Cette couche est peut-être due à la chute de météorites riches en carbone après la formation de la croûte. Mais elle pourrait aussi être plus ancienne: quand la surface de la planète en formation était recouverte d'un océan de magma, le carbone aurait flotté à la surface et y serait resté lorsque cet océan s'est refroidi et solidifié.

Vous indiquiez que *Mariner 10* n'avait pas détecté de traces de volcanisme sur Mercure. Cette inactivité a-t-elle été confirmée?

Non, au contraire. Dans les années 1990, grâce à de nouveaux outils d'analyse, Mark Robinson, de l'université d'État de l'Arizona, et Paul Lucey, de l'université d'Hawaï, ont décelé des plaines relativement lisses à la surface de la planète. En montrant que ces régions avaient une composition différente du reste de la surface, provenant probablement de matériaux de l'intérieur de la planète, ils ont montré que Mercure a eu une activité volcanique. D'après les données de *Messenger*, ce volcanisme aurait été de type explosif, à l'image du mont Saint Helens, et non effusif comme les volcans d'Hawaï, par exemple.

L'activité volcanique semble avoir duré assez longtemps, mais nous n'avons pas une chronologie précise de l'histoire géologique de



Le radiotélescope d'Arecibo a détecté des zones très réfléchissantes (en jaune) au fond des cratères d'impact situés aux pôles de Mercure. Privées en permanence de la lumière directe du soleil, ces dépressions sont très froides et pourraient ainsi contenir de la glace d'eau.

la planète. Autre témoignage de ce passé, la sonde *Messenger* a observé ce qu'on nomme des escarpements lobés. Ces failles peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres de long et présenter un dénivelé de un à deux kilomètres. On en trouve ailleurs dans le Système solaire, sur la Lune par exemple, mais pas aussi importantes que sur Mercure. Ces failles sont le résultat d'une contraction brutale lors du refroidissement de Mercure. Le rayon de la planète aurait diminué d'une dizaine de kilomètres en peu de temps. La croûte n'aurait pas suivi le mouvement assez vite et se serait craquelée sous les contraintes mécaniques.

Encore une fois, nous n'avons pas davantage de précisions sur les échelles de temps de cette contraction. L'un des objectifs de *BepiColombo* est de photographier en détail ces escarpements lobés afin de tenter de reconstruire l'histoire géologique de la planète.

Y a-t-il d'autres structures étonnantes que *BepiColombo* pourra étudier ?

Deux autres éléments de la surface de Mercure nous intéressent particulièrement. Le premier concerne la région des pôles. Il y existe des endroits qui ne sont jamais éclairés par le Soleil. En effet, l'inclinaison de la planète est nulle, c'est-à-dire que son axe de rotation est bien perpendiculaire au plan de l'orbite (contrairement à la Terre, dont l'axe Nord-Sud penche de 23,5 degrés). Il n'y a donc pas de saisons sur Mercure. Par conséquent, le fond des cratères d'impact situés aux pôles ne voit jamais la lumière du jour. Il est à peine réchauffé par les parois rocheuses et la température y est très basse, environ -230 °C. Il y fait donc plus froid que du côté nuit de la planète, où la température descend jusqu'à -180 °C à peu près.

Dans les années 1990, le radiotélescope d'Arecibo, à Porto Rico, a observé les régions polaires de Mercure. La planète est assez proche de la Terre pour que l'on puisse y

envoyer un signal radio et analyser l'écho qui nous revient. Ces données ont montré que le fond des cratères polaires contient un matériau très réfléchissant (voir l'image ci-dessus). Il pourrait s'agir de glace d'eau, une hypothèse que les instruments de *BepiColombo* pourront confirmer ou infirmer. Si c'est bien de l'eau, elle se serait accumulée pendant des milliards d'années, grâce à l'apport des comètes riches en glace. Il est captivant de se dire qu'il pourrait y avoir de l'eau si proche du Soleil. Ces cratères pourraient être une cible de choix pour une future mission comprenant un atterrisseur.

Et en dehors des régions polaires ?

L'autre particularité de la surface de Mercure qui a attiré notre attention concerne des dépressions irrégulières et peu profondes, nommées *hollows*, des « creux » (voir la photographie page ci-contre). Sur les images en fausses couleurs, elles apparaissent d'un bleu intense, mais elles sont effectivement un peu bleutées et très brillantes. On les connaît depuis *Mariner 10*, mais ce sont les images de *Messenger* qui ont permis d'en répertorier des milliers et d'en voir les détails. Les *hollows* semblent assez jeunes et continuent peut-être à se former aujourd'hui. Ce serait le signe que la surface de Mercure évolue encore et qu'elle n'est pas inerte comme on l'a longtemps pensé. Ces petites structures, à des échelles inférieures au kilomètre (les plus grandes ont un diamètre d'environ 1,6 kilomètre), se trouvent partout à la surface de la planète et surtout dans des cratères d'impact, mais pas uniquement. On en trouve aussi dans les plaines, hors des cratères.

On est loin de comprendre leur formation et leur composition. Il s'agit peut-être d'un matériau souterrain qui s'est retrouvé en surface et qui se serait ensuite sublimé (passant de l'état solide à gazeux), ce qui expliquerait la forme irrégulière des *hollows*.

La sonde européenne MPO (Mercury Planetary Orbiter), l'une des deux composantes de la mission BepiColombo, lors de son arrivée à la base de Kourou, en Guyane.



> Quels sont les atouts de BepiColombo, par rapport à la mission Messenger?

Messenger a recueilli beaucoup d'informations et révélé la grande singularité de Mercure, qui est loin d'être une « Lune bis » contrairement à ce que l'on pensait au début de l'exploration du Système solaire. Mais les découvertes de Messenger ont soulevé beaucoup de questions restées sans réponses. C'est en fait assez normal. Messenger était une mission du programme Discovery de la Nasa; ces projets dédiés à l'exploration robotisée du Système solaire (à l'exception du satellite Kepler spécialisé dans la recherche d'exoplanètes) ont un budget limité à moins de 500 millions de dollars. L'idée était de faire des missions fréquentes, aux objectifs variés et à un coût limité. C'est pourquoi Messenger n'avait que sept instruments à son bord – deux caméras, des spectromètres, un altimètre et un magnétomètre.

La sonde BepiColombo, dont le budget est presque triple, embarque 16 instruments scientifiques, plus sensibles et plus précis. Ils devraient nous permettre de collecter de nombreuses données et de répondre aux grandes questions sur Mercure, son histoire, sa structure interne, son champ magnétique et son exosphère.

Exosphère? De quoi s'agit-il?

L'atmosphère de Mercure est si ténue que l'on parle plus volontiers d'exosphère. La différence entre une atmosphère et une exosphère est que, dans la seconde, une molécule de gaz a plus de chance de percuter la surface de la planète qu'une autre molécule de gaz. On est typiquement à 10^{-12} bar, soit un millionième de millionième de la pression atmosphérique à la surface de la Terre.

L'exosphère de Mercure contient de l'hydrogène, de l'hélium, de l'oxygène, du sodium, du potassium, du calcium et des traces d'autres éléments. Leur distribution n'est pas homogène et elle varie au cours du temps. Par exemple, on trouve le sodium et le potassium surtout près des pôles et le calcium vers l'équateur.

L'atmosphère primordiale de la planète a probablement été perdue assez rapidement du fait de la faible gravité de la planète, de la température élevée et de l'action du vent solaire. L'exosphère perd son contenu en permanence, mais elle est alimentée par différents processus. L'hydrogène et l'hélium viendraient principalement du vent solaire. Et les autres éléments seraient arrachés à la surface, selon un mécanisme qui reste à préciser: érosion par le vent solaire? Variations thermiques entre les zones éclairées à 430 °C et à l'ombre à -180 °C? Impacts des météorites?

Cette exosphère interagit avec le vent solaire, mais aussi avec la magnétosphère de la planète. Mercure est un système vraiment intéressant pour étudier comment ces différents éléments se comportent les uns avec les autres. Par exemple, le sodium est arraché de l'exosphère par la pression de radiation du Soleil, et forme une queue comparable à celle d'une comète, sur plus de deux millions de kilomètres.

Comment BepiColombo étudiera-t-elle l'exosphère et la magnétosphère?

Cette mission est en réalité constituée de deux sondes, fruits d'une collaboration entre l'Agence spatiale européenne (ESA) et l'Agence spatiale japonaise (Jaxa), ce qui est une première. L'idée était d'avoir deux sondes aux missions complémentaires, avec une stratégie

scientifique et une coordination optimale. Les sondes effectueront le voyage fixées l'une à l'autre et elles se sépareront à l'arrivée en orbite autour de Mercure. La sonde japonaise MMO (*Mercury Magnetospheric Orbiter*), rebaptisée *Mio*, sera placée sur une orbite lointaine et elliptique, à l'extérieur du champ magnétique, tandis que la sonde européenne MPO (*Mercury Planetary Orbiter*) évoluera sur une orbite basse, dans la magnétosphère. Nous aurons ainsi deux points de vue sur le champ magnétique et nous pourrons étudier sa dynamique et voir comment il se comporte face au vent solaire.

La sonde MMO comprend cinq instruments scientifiques : un magnétomètre, un appareil pour étudier la dynamique de la magnétosphère et divers dispositifs pour analyser le contenu en particules et en poussière du milieu entourant la planète.

Quant à la sonde MPO, sa mission s'étend aussi à la compréhension de la surface et de l'intérieur de la planète. Elle est équipée de onze instruments dont un altimètre, un accéléromètre, un magnétomètre, des spectromètres sensibles à différentes gammes de longueurs d'onde et un transpondeur radio.

Mercury a joué un rôle historique dans l'acceptation de la théorie de la relativité générale. La mission BepiColombo comporte-t-elle un volet lié à cette théorie ?

Oui, en effet. Rappelons que la relativité générale d'Einstein fait apparaître la force gravitationnelle comme le résultat d'une déformation de l'espace-temps par des objets massifs. Mercure, par sa proximité au Soleil, y est particulièrement sensible. En expliquant correctement, et surtout quantitativement, pourquoi le périhélie de Mercure (le point de sa trajectoire le plus proche du Soleil) avance à chaque révolution d'une fraction d'angle, Einstein a montré la supériorité de sa théorie sur celle de Newton. La sonde MPO permettra d'en faire un test supplémentaire : grâce à l'accéléromètre très précis dont elle est équipée, nous pourrons mesurer la courbure de l'espace-temps au niveau de l'orbite de Mercure et ainsi détecter un petit écart éventuel aux prédictions de la relativité générale.

À quelles difficultés la conception de la mission BepiColombo s'est-elle heurtée ?

Cette mission, dont la réalisation a été décidée en 2000, est bien connue des spécialistes de l'exploration spatiale pour ses multiples reports. Nous avons dû en effet relever des défis techniques assez importants. En général, lorsqu'on conçoit une sonde, on utilise des dispositifs déjà éprouvés. Or avec *BepiColombo*, seuls 17% des éléments l'étaient ; il a fallu inventer tout le reste.

L'une des raisons est la température élevée près de Mercure. Nous avons développé un

revêtement qui isole la sonde du chaud, mais aussi du froid. Même chose pour les panneaux solaires : les dispositifs utilisés pour les satellites en orbite autour de la Terre ou sur les toits des maisons ne résistent pas aux températures

Seuls 17% des éléments de la sonde BepiColombo étaient de conception éprouvée. Il a fallu inventer tout le reste

mercuriennes. Et pour toute l'électronique des instruments, il a fallu la repenser pour qu'elle soit capable de supporter la température, mais aussi les radiations ambiantes.

Enfin, un autre défi technique était la propulsion. *BepiColombo* utilise un moteur ionique. Les propulseurs classiques sont remplacés par un dispositif qui éjecte à grande vitesse des ions de xénon. Cela ne permet pas de produire des poussées courtes et rapides, mais le moteur opère en continu. Ainsi, en cumulé, on obtient une poussée très élevée. C'est la technique idéale pour l'exploration du Système solaire, voire d'autres systèmes stellaires. La Nasa a déjà testé le moteur ionique avec la sonde *Dawn*, l'ESA seulement avec *Smart-1*, à destination de la Lune. *BepiColombo* est donc, pour l'ESA, la première grande mission utilisant cette propulsion. Et déjà d'autres sont programmées comme *Solar Orbiter*, qui décollera en 2019.

Avez-vous des projets en direction du grand public, en liaison avec BepiColombo ?

La sonde décollera de Kourou, en Guyane, sur une fusée Ariane. Avec des collègues européens et japonais, scientifiques et ingénieurs, nous avons décidé de partager ce moment avec les enfants guyanais au travers du projet « Planètes en Guyane ». L'idée de cette initiative est de visiter les classes pour promouvoir les sciences et l'astronomie, les métiers du spatial, notamment auprès des filles, en insistant aussi sur la dimension internationale de ces projets. Il est primordial d'apporter le goût du savoir au jeune public. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR SEAN BAILLY

BIBLIOGRAPHIE

Site internet de la mission BepiColombo de l'Observatoire de Paris :
<https://www.planete-mercure.fr/>

D. E. Smith et al., **Gravity field and internal structure of Mercury from Messenger**, *Science Express*, 2012.

S. Murchie et al., **Mercury : une planète dans la fournaise**, *Pour la Science*, n° 402, avril 2011.

R. Vervack et al., **Mercury's complex exosphere : results from Messenger's third flyby**, *Science*, vol. 329, pp. 672-675, 2010.

B. Anderson et al., **The magnetic field of Mercury**, *Space Science Reviews*, vol. 152, n° 1-4, pp. 307-339, 2010.

B. Denevi et al., **The evolution of Mercury's crust : a global perspective from Messenger**, *Science*, vol. 324, pp. 613-618, 2009.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 491 (sept. 18)
réf. PL491



N° 490 (août 18)
réf. PL490



N° 489 (juillet 18)
réf. PL489



N° 488 (juin 18)
réf. PL488



N° 487 (mai 18)
réf. PL487



N° 486 (avril 18)
réf. PL486



N° 485 (mars 18)
réf. PL485



N° 484 (févr. 18)
réf. PL484



N° 483 (janv. 18)
réf. PL483



N° 482 (déc. 17)
réf. PL482



N° 481 (nov. 17)
réf. PL481



N° 480 (oct. 17)
réf. PL480

À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
 6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



**RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR**