

MERCURE

Caractéristiques

Découvertes et exploration par les sondes

- Les sondes Mariner
- Messenger
- BepiColombo

Iconographie



GAP 47 • Olivier Sabbagh • Février 2015 - Révision Mars 2023

Mercure

I Généralités

Mercure est la planète la plus proche du Soleil et la moins massive du Système solaire. Son éloignement au Soleil est compris entre 0,31 et 0,47 unité astronomique (soit 46 et 70 millions de kilomètres), ce qui correspond à une excentricité orbitale de 0,2, plus de douze fois supérieure à celle de la Terre, et de loin la plus élevée pour une planète du Système solaire. Elle est visible à l'œil nu depuis la Terre avec un diamètre apparent de 4,5 à 13 secondes d'arc, et une magnitude apparente de 5,7 à $-2,3$; son observation est toutefois rendue difficile par son élongation toujours inférieure à $28,3^\circ$ qui la noie le plus souvent dans l'éclat du soleil. En pratique, cette proximité avec le soleil implique qu'elle ne peut être vue que près de l'horizon occidental après le coucher du soleil ou près de l'horizon oriental avant le lever du soleil, en général au crépuscule. Mercure a la particularité d'être en résonance spin-orbite 3:2, sa période de révolution (~88 jours) valant exactement 1,5 fois sa période de rotation (~59 jours), et donc la moitié d'un jour solaire (~176 jours). Ainsi, relativement aux étoiles fixes, elle tourne sur son axe exactement trois fois toutes les deux révolutions autour du Soleil.

Mercure est une planète tellurique, comme le sont également Vénus, la Terre et Mars. Elle est près de trois fois plus petite et presque vingt fois moins massive que la Terre mais presque aussi dense qu'elle, avec une gravité de surface pratiquement égale à celle de Mars, qui est pourtant près de deux fois plus massive. Sa densité remarquable, dépassée seulement par celle de la Terre, qui lui serait d'ailleurs inférieure sans l'effet de la compression gravitationnelle, est due à l'importance de son noyau métallique, qui occuperait plus de 85 % de son rayon, contre seulement 55 % pour la Terre.

Comme Vénus, Mercure est quasiment sphérique, son aplatissement pouvant être considéré comme nul, en raison de sa rotation très lente. Dépourvue de véritable atmosphère pouvant la protéger des météorites (il n'existe qu'une exosphère exerçant une pression au sol de moins de 1 nPa ou 10^{-14} atm), sa surface est très fortement cratérisée et globalement similaire à la face cachée de la Lune, indiquant qu'elle est géologiquement inactive depuis des milliards d'années. Cette absence d'atmosphère combinée à la proximité du Soleil engendre des températures en surface allant de 90 K (-183°C) au fond des cratères polaires (là où les rayons du Soleil ne parviennent jamais) jusqu'à 700 K (427°C) au point subsolaire au périhélie. La planète est par ailleurs dépourvue de satellites naturels.

Seules deux sondes spatiales ont étudié Mercure. Mariner 10, qui survole à trois reprises la planète en 1974–1975, cartographie 45 % de sa surface et découvre l'existence de son champ magnétique. La sonde MESSENGER, après trois survols en 2008-2009, se met en orbite autour de Mercure en mars 2011 et réalise une étude détaillée notamment de sa topographie, son histoire géologique, son champ magnétique et son exosphère. La sonde BepiColombo a pour objectif de se mettre en orbite autour de Mercure en décembre 2025.

La quasi-absence d'atmosphère [il s'agit en fait d'une exosphère exerçant une pression au sol de l'ordre de 1 nPa (10^{-14} atm)] combinée à la proximité du Soleil (dont l'irradiance à la surface de Mercure varie entre 4,6 et 10,6 fois la constante solaire (soit $12\,300\text{ W/m}^2$ de surface mercurienne)) engendre des températures en surface allant de 90 K (-183°C) au fond des cratères polaires (là où les rayons du Soleil ne parviennent jamais) jusqu'à 700 K (427°C) au point subsolaire au périhélie.

La planète Mercure doit son nom au dieu Mercure du commerce et des voyages, également messager des autres dieux dans la mythologie romaine. La planète a été nommée ainsi par les Romains à cause de la vitesse à laquelle elle se déplaçait. Le symbole astronomique de Mercure est un cercle posé sur une croix et portant un demi-cercle en forme de cornes (Unicode : ☿). C'est une représentation du caducée du dieu Hermès. Mercure laissa également son nom au troisième jour de la semaine, mercredi (« Mercurii dies »).



Mosaïque de Mercure (Mariner 10)



Photo de Mercure par Messenger

Mercure ♀



Mercure vue par la sonde MESSENGER, le 14 janvier 2008

Caractéristiques orbitales

Demi-grand axe	57 909 176 km (0,38709893 UA)
Aphélie	69 817 079 km (0,46669835 UA)
Périhélie	46 001 272 km (0,30749951 UA)
Circonférence orbitale	359 976 739 km (2,406 UA)
Excentricité	0,20563069
Période de révolution	87,96934 d
Période synodique	115,8776 d
Vitesse orbitale moyenne	47,36 km/s
Vitesse orbitale maximale	58,98 km/s

Vitesse orbitale minimale	38,86 km/s
Inclinaison sur l'écliptique	7,00487°
Nœud ascendant	48,33167°
Argument du périhélie	29,12478°
Satellites connus	0
Caractéristiques physiques	
Rayon équatorial	2 439,7 km (0,383 Terre)
Rayon polaire	2 439,7 km (0,384 Terre)
Rayon moyen volumétrique	2 439,7 km (0,383 Terre)
Aplatissement	0
Périmètre équatorial	15 329,1 km (0,383 Terre)
Superficie	75×10 ⁶ km ² (0,147 Terre)
Volume	60,83×10 ⁹ km ³ (0,056 Terre)
Masse	330,2×10 ²¹ kg (0,055 Terre)
Masse volumique globale	5 427 kg/m ³
Gravité de surface	3,701 m/s ² (0,377 g)
Vitesse de libération	4,435 km/s
Période de rotation (jour sidéral)	58,6462 d
Vitesse de rotation (à l'équateur)	10,892 km/h
Inclinaison de l'axe	0,0352 ± 0,0017°
Albédo géométrique visuel	0,106
Albédo de Bond	0,119
Irradiance solaire	9 126,6 W/m ² (6,673 Terres)
Température d'équilibre du corps noir	433,9 K (160,9 °C)
Température de surface :	
Maximum :	700 K (427 °C)
Moyenne :	442 K (169 °C)
Minimum :	90 K (-183 °C)
Caractéristiques de l'atmosphère	
Pression atmosphérique	~ 10 ⁻⁹ Pa
Masse totale	Moins de 1 000 kg
Potassium K	31,7 %
Sodium Na	24,9 %
Oxygène O'	9,5 %
Argon Ar	7,0 %
Hélium He	5,9 %
Dioxygène O₂	5,6 %
Azote N	5,2 %
Dioxyde de carbone CO₂	3,6 %
Eau H₂O	3,4 %
Hydrogène H₂	3,2 %

II Caractéristiques détaillées

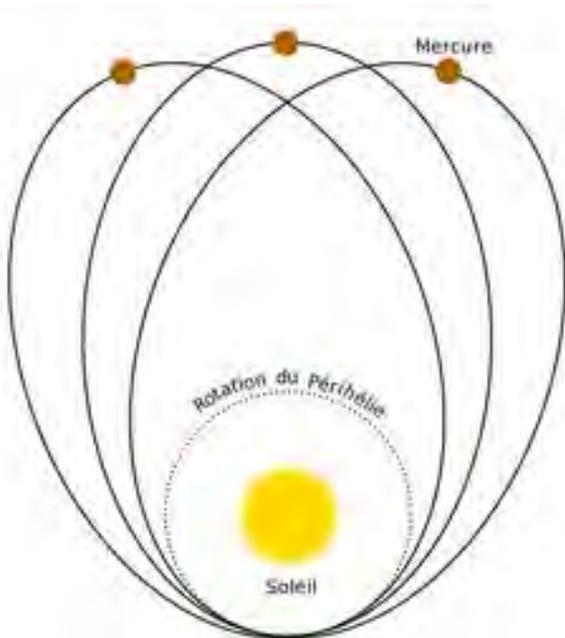
A) Orbite, excentricité

Excentricité

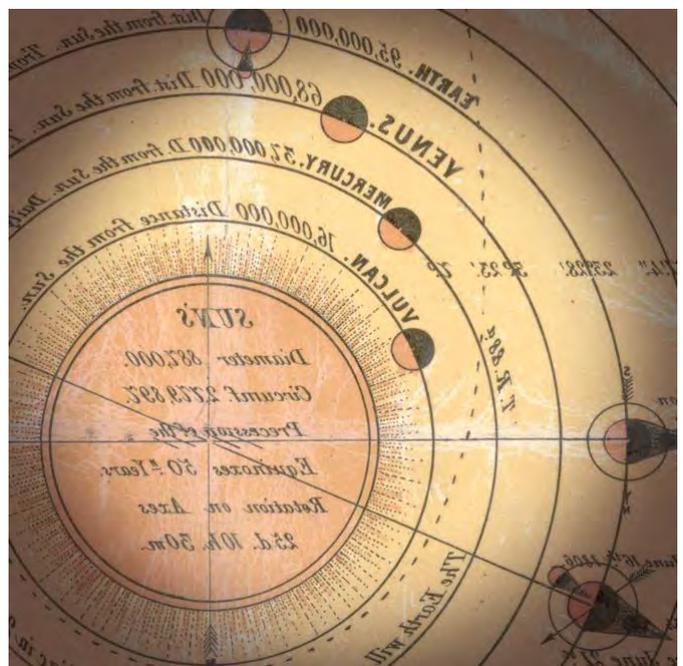
Mercure a une excentricité orbitale qui fait varier sa distance au Soleil de 46 à 70 millions de kilomètres. L'excentricité de l'orbite de Mercure varie de manière chaotique de 0 (orbite circulaire) à une valeur très importante de 0,46 sur plusieurs millions d'années. En 1989, Jacques Laskar, du Bureau des longitudes, a démontré que les planètes intérieures du système solaire avaient toutes des courses chaotiques. Cependant Mercure est celle dont le mouvement est le plus chaotique.

Précession du périhélie

Comme pour l'ensemble des planètes du Système solaire, l'orbite de Mercure connaît une très lente précession du périhélie autour du Soleil, c'est-à-dire que son orbite est elle-même en rotation autour du Soleil. Cependant, contrairement aux autres planètes, la période de précession du périhélie de Mercure ne concorde pas avec les prédictions faites à l'aide de la mécanique newtonienne. En effet, Mercure connaît une précession légèrement plus rapide (5600 secondes par siècle) que celle à laquelle on peut s'attendre en appliquant les lois newtoniennes de la mécanique céleste (5557 secondes par siècle), et se trouve en conséquence en avance d'environ 43 secondes d'arc par siècle.



L'orbite de Mercure tourne très lentement autour du Soleil (ici, l'excentricité est exagérée)



Vulcain, la planète hypothétique.

Recherche d'une planète tierce

Les astronomes ont donc, dans un premier temps, pensé à la présence d'un ou de plusieurs corps entre le Soleil et l'orbite de Mercure dont l'interaction gravitationnelle perturberait le mouvement de cette dernière. L'astronome français Urbain Le Verrier, qui avait découvert en 1846 la planète Neptune à partir d'anomalies dans l'orbite d'Uranus, se penche sur le problème et suggère la présence d'une planète inconnue ou d'une seconde ceinture d'astéroïdes entre le Soleil et Mercure. Des calculs effectués, en prenant en compte l'influence gravitationnelle de ces corps, devaient alors concorder avec la précession observée.

Le 28 mars 1859, Le Verrier est contacté par le médecin français Edmond Lescarbault à propos d'une tache noire qu'il aurait vu passer devant le Soleil deux jours avant et qui était probablement, selon lui, une planète intramercurienne. Le Verrier postule alors que cette planète (qu'il nomme Vulcain) est responsable des anomalies du mouvement de Mercure et se met en tête de la découvrir. À partir des informations de Lescarbault, il conclut que Vulcain tournerait autour du Soleil en 19 jours et 7 heures à une distance moyenne de 0,14 UA. Il déduit également un diamètre d'environ 2.000 km et une masse de

1/17^e de celle de Mercure. Cette masse est cependant bien trop faible pour expliquer les anomalies, mais Vulcain reste une bonne candidate au corps le plus gros d'une hypothétique ceinture d'astéroïdes interne à l'orbite de Mercure.

Le Verrier profite alors de l'éclipse de Soleil de 1860 pour mobiliser tous les astronomes français afin de repérer Vulcain, mais personne ne put la trouver. La planète fut ensuite recherchée pendant des décennies, sans succès même si certains astronomes pensèrent l'avoir vue, jusqu'à ce qu'une explication relativiste soit proposée.

Explication par la relativité générale

En 1916, Albert Einstein avance la théorie de la relativité générale. En appliquant les paramètres dits post-képlériens de sa théorie au mouvement de Mercure, Einstein fournit l'explication de la précession observée en formalisant la gravitation comme étant affectée par la courbure de l'espace-temps. La formule de précession subie par l'orbite obtenue par Einstein est :

$$\varphi_{\text{Einstein}} = \frac{6 \pi G M_S}{c^2 a (1 - e^2)} = \frac{24 \pi^3 a^2}{T^2 c^2 (1 - e^2)}$$

où **a** est le demi-grand axe de l'ellipse, **e** son excentricité, **G** la constante gravitationnelle, **M_s** la masse du Soleil, et **T** la période de révolution sur l'ellipse.

Avec pour valeurs numériques, $G \simeq 6.67 \cdot 10^{-11}$ SI, $M_S \simeq 2.0 \cdot 10^{30}$ kg, $a \simeq 5.8 \cdot 10^{10}$ m, $e \simeq 0.2$ et $T \simeq 88$ jours on retrouve 0,1035 secondes d'arc par révolution, ce qui correspond, avec les 415,2 révolutions de Mercure par siècle, à : $\varphi_{\text{Einstein}} \simeq 42,980 \pm 0,001$ secondes d'arc par siècle

L'effet est faible : seulement ~43 secondes d'arc par siècle pour Mercure, il faut donc environ 2,8 millions d'années pour un tour complet en excès^{N 5} (ou douze millions de révolutions), mais coïncide bien avec l'avance du périhélie précédemment mesurée. Cette prédiction validée constitue un des premiers grands succès de la relativité générale naissante⁵². Des effets similaires, mais plus faibles, existent aussi pour les autres planètes : 8,6247 secondes d'arc par siècle pour Vénus, 3,8387 pour la Terre et 1,351 pour Mars.

Finalement, l'énigme fut résolue en 1916 avec la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein. En appliquant la relativité générale au mouvement de Mercure, on en arrive à la précession mesurée.

Orbite

L'orbite de Mercure est inclinée de 7 degrés par rapport au plan de l'orbite terrestre (écliptique), comme le montre le schéma de droite. Par conséquent, les transits de Mercure devant le Soleil ne peuvent avoir lieu que lorsque la planète traverse le plan de l'écliptique, au moment où elle se trouve entre la Terre et le Soleil, c'est-à-dire en mai ou en novembre. Cela se produit environ tous les sept ans en moyenne.

L'inclinaison de l'axe de rotation de Mercure sur son plan orbital est la plus faible du Système solaire, à peine 2 minutes d'arc, soit environ 0,03 degré. Cela est significativement plus faible que celle de Jupiter, qui a la deuxième plus petite inclinaison axiale de toutes les planètes, à 3,1 degrés. Cela signifie que pour un observateur aux pôles de Mercure, le centre du soleil ne s'élève jamais à plus de 2 minutes d'arc au-dessus de l'horizon.

En certains points de la surface de Mercure, un observateur pourrait voir le soleil se lever à un peu plus des deux tiers de l'horizon, puis se coucher avant de se lever à nouveau, le tout au cours de la même journée mercurielle. En effet, quatre jours terrestres avant le périhélie, la vitesse orbitale angulaire de Mercure est égale à sa vitesse de rotation angulaire, de sorte que le mouvement apparent du soleil cesse ; plus près du périhélie, la vitesse orbitale angulaire de Mercure dépasse alors la vitesse de rotation angulaire. Ainsi, pour un observateur hypothétique sur Mercure, le soleil semble se déplacer dans une direction rétrograde. Quatre jours terrestres après le périhélie, le mouvement apparent normal du soleil reprend et il se lève à nouveau à l'est pour se coucher à l'ouest.

Pour la même raison, il y a un couple de points sur l'équateur de Mercure (l'un d'entre eux étant situé dans le bassin Caloris), distants de 180 degrés en longitude, où à chacun desquels, un an mercurien sur deux (ce qui équivaut à une fois par jour mercurien), le soleil passe au-dessus d'est en ouest, puis inverse son mouvement apparent et passe à nouveau au-dessus d'ouest en est (lors du mouvement rétrograde), puis inverse son mouvement une seconde fois et passe au-dessus une troisième fois d'est en ouest. Au cours de

l'année mercurienne alternée, c'est à l'autre point de ce couple que ce phénomène se produit. L'amplitude du mouvement rétrograde étant faible en ces points, l'effet global est que, pendant deux ou trois semaines, le soleil est presque stationnaire au-dessus du point, et est à son plus haut niveau de brillance parce que Mercure est au périhélie. Cette exposition prolongée au moment où la planète est au plus proche du Soleil fait de ces deux points les endroits les plus chauds sur Mercure (d'où le nom Caloris, signifiant « chaleur » en latin). Un de ces points a servi de référence pour le méridien 0°.

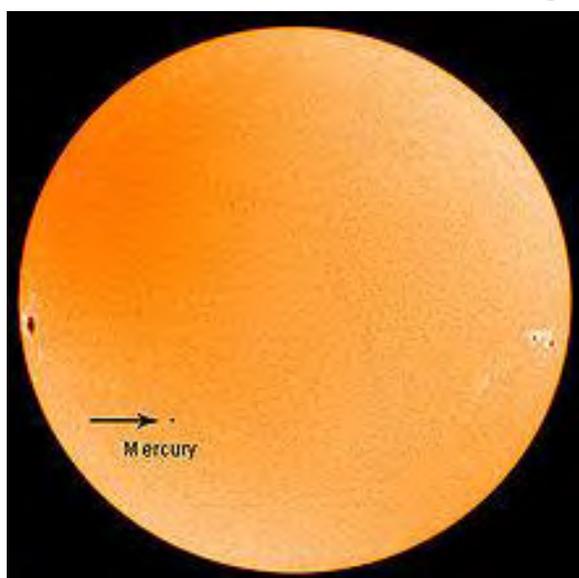
Inversement, il y a deux autres points sur l'équateur, à 90 degrés de longitude de distance des premiers, où le soleil ne passe au-dessus que lorsque la planète est à l'aphélie, une année mercurienne sur deux, à un moment où le mouvement apparent du soleil dans le ciel de Mercure est relativement rapide. Ces points reçoivent ainsi beaucoup moins de chaleur solaire que ceux du couple décrits ci-dessus. Il en résulte une journée mercurienne également « étrange » pour un observateur qui y serait situé. Celui-ci verra le soleil se lever puis se recoucher, puis se relever à l'horizon Est ; et à la fin de la journée à l'Ouest, le soleil se couchera puis se relèvera, pour se recoucher. Ce phénomène s'explique aussi par la variation de la vitesse orbitale de Mercure : quatre jours avant le périhélie, la vitesse (angulaire) orbitale de Mercure étant exactement égale à sa vitesse (angulaire) de rotation, le mouvement du soleil semble s'arrêter.

Mercure atteint sa conjonction inférieure (point où elle est au plus proche de la Terre) tous les 116 jours terrestres en moyenne (ce qu'on appelle la période synodique), mais cet intervalle peut aller de 105 jours à 129 jours, en raison de l'orbite excentrique de la planète. Entre 1900 et 2100, Mercure s'est approchée au minimum, (et ne s'approchera donc pas plus), de la Terre d'environ $82,1 \times 10^6$ kilomètres (soit 0,55 unité astronomique), le 31 mai 2015. Sa période de mouvement rétrograde peut varier de 8 à 15 jours terrestres de part et d'autre de la conjonction inférieure. Cette grande amplitude est aussi due à l'excentricité orbitale élevée de la planète.

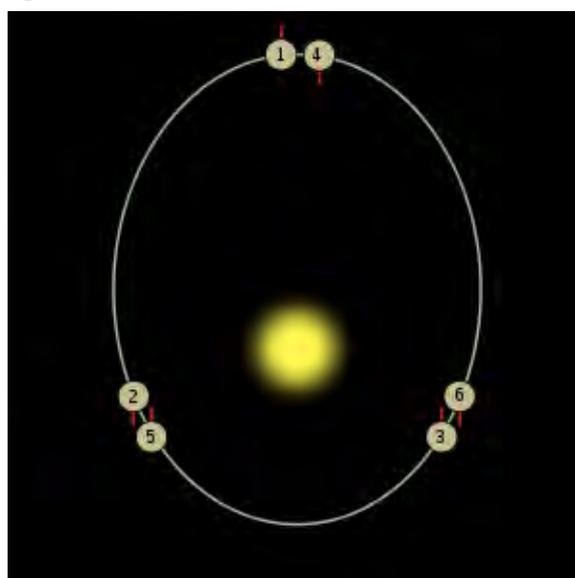
De par sa proximité avec le Soleil, c'est Mercure, et non Vénus, qui est la planète la plus proche de la Terre en moyenne, même si l'orbite de Vénus est la plus proche de celle de la Terre. Ce raisonnement peut même être étendu, et Mercure est en réalité la planète la plus proche en moyenne pour chacune des autres planètes du Système solaire, y compris Uranus et Neptune (orbitant respectivement à 19 et 30 UA).

B) Transit de Mercure

Le transit de Mercure peut se produire en mai ou en novembre lorsque Mercure se situe entre la Terre et le Soleil. Les transits de Mercure, vus depuis la Terre, sont beaucoup plus fréquents que ceux de Vénus, avec une fréquence d'environ 13 ou 14 par siècle, en raison de la proximité de la planète au Soleil, ce qui implique une période de révolution plus courte que celle de Vénus. Ils peuvent se produire en mai à des intervalles de 13 ou 33 ans, ou en novembre tous les 7, 13 ou 33 ans. Les deux derniers transits de Mercure datent de 2016 et 2019 ; les deux prochains se produiront en 2032 et 2039.



Transit de Mercure du 8 novembre 2006



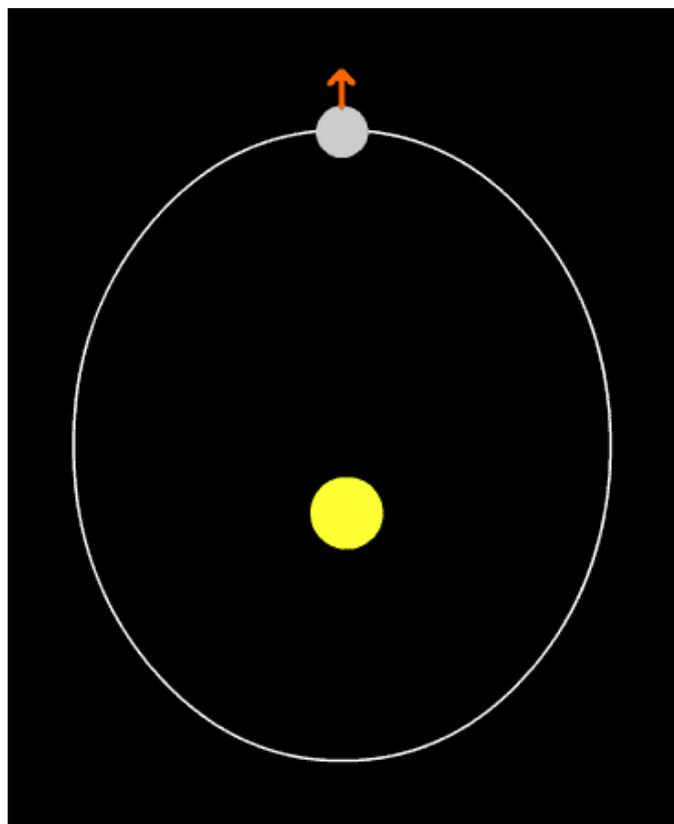
La révolution et la rotation de Mercure sont couplées : à chaque révolution, la planète effectue 1,5 rotation

C) Rotation

Alors qu'il étudiait Mercure afin d'en dresser une première carte, Schiaparelli avait remarqué après plusieurs années d'observation que la planète présentait toujours la même face au Soleil, comme la Lune le fait avec la Terre. Il en conclut alors en 1889 que Mercure était synchronisée par effet de marée avec le Soleil et que sa période de rotation équivalait à une année mercurienne, soit 88 jours terrestres. Cette durée était cependant erronée et il fallut attendre les années 1960 avant que les astronomes ne la revoient à la baisse.

En 1962, des observations par radar à effet Doppler ont été effectuées par le radiotélescope d'Arecibo sur Mercure afin d'en apprendre plus sur la planète et de vérifier si la période de rotation était bien égale à la période de révolution. Les températures relevées du côté de la planète censé être toujours exposé à l'ombre étaient trop importantes, ce qui suggéra que cette face sombre était parfois exposée au Soleil. En 1965, les résultats obtenus par Gordon H. Pettengill et Rolf B. Dyce révèlent que la période de rotation de Mercure est en fait de 59 jours terrestres, avec une incertitude de 5 jours. Cette période sera ajustée plus tard, en 1971, à 58,65 jours à $\pm 0,25$ jours grâce à des mesures plus précises (toujours par radar) effectuées par R.M. Goldstein. Trois ans plus tard, la sonde Mariner 10 apportera une meilleure précision, mesurant la période de rotation à $58,646 \pm 0,005$ jours. Il se trouve que cette période est exactement égale à $2/3$ de la révolution de Mercure autour du Soleil ; ce qu'on appelle une résonance spin-orbite 3:2.

Cette résonance 3:2, une spécificité de Mercure, est stabilisée par la variance de la force de marée le long de l'orbite excentrique de Mercure, agissant sur une composante dipolaire permanente de la distribution de masse de Mercure et par le mouvement chaotique de son orbite. Dans une orbite circulaire, il n'y a pas de telle variance, donc la seule résonance stabilisée pour une telle orbite est 1:1 (par exemple, Terre-Lune). Au périhélie, là où la force de marée atteint son maximum, elle stabilise les résonances, comme 3:2, en obligeant la planète à pointer son axe de moindre inertie (là où le diamètre de la planète est le plus grand) approximativement vers le Soleil.



La révolution et la rotation de Mercure sont couplées : à chaque révolution, la planète effectue une rotation et demie. Ainsi, après deux révolutions complètes, le même hémisphère est éclairé à nouveau.

La raison pour laquelle les astronomes pensaient que Mercure était verrouillée avec le Soleil est que, à chaque fois que Mercure était la mieux placée pour être observée, elle se trouvait toujours au même point sur son orbite (en résonance 3:2), présentant ainsi la même face à la Terre ; ce qui serait aussi le cas si elle était totalement synchronisée avec le Soleil. Cela est dû au fait que la période de rotation réelle de Mercure de 58,6 jours est presque exactement la moitié de la période synodique de Mercure valant 115,9 jours (c'est-à-dire le temps mis par Mercure pour revenir à la même configuration Terre–Mercure–Soleil)

par rapport à la Terre. L'erreur de Schiaparelli peut aussi être imputée à la difficulté d'observation de la planète avec les moyens de l'époque.

En raison de sa résonance 3:2, bien qu'un jour sidéral (la période de rotation) dure environ 58,7 jours terrestres, le jour solaire (durée entre deux retours successifs du Soleil au méridien local) dure 176 jours terrestres, c'est-à-dire deux années mercuriennes. Cela implique qu'une journée et une nuit durent chacune exactement une année sur Mercure, soit 88 jours terrestres (presque un trimestre).

Une modélisation précise basée sur un modèle des marées a démontré que Mercure a été capturé dans l'état de spin-orbite 3:2 à un stade très précoce de son histoire, entre 10 et 20 millions d'années après sa formation. De plus, des simulations numériques ont montré qu'une future résonance séculaire avec Jupiter pourrait faire croître l'excentricité de Mercure jusqu'à un point où il y aurait 1 % de chance que la planète entre en collision avec Vénus d'ici à 5 milliards d'années. La prédiction à long terme de l'orbite de Mercure s'inscrit dans la mécanique du chaos : certaines simulations démontrent même que la planète pourrait être éjectée du Système solaire.

D) Atmosphère

L'atmosphère de Mercure s'est dissipée rapidement après la formation de la planète sous l'action conjuguée de la faible gravité de la planète, la haute température de surface, et les effets du vent solaire. Néanmoins, de nos jours, il y a encore des traces d'une atmosphère extrêmement ténue, contenant de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'hélium, du sodium, du calcium, du potassium et de la vapeur d'eau, avec un niveau de pression combiné mal connu : la NASA estime qu'il varie de 10^{-15} bar (0,1 nPa) qui pourrait être considéré négligeable à 200 nPa. Cela donne une masse grossièrement estimée à $1,6 \cdot 10^6$ kg.

Composition atmosphérique

Cette atmosphère n'est pas faite d'atomes stables, mais elle est continuellement perdue et réapprovisionnée par différentes sources. Les atomes d'hydrogène et d'hélium proviennent probablement du vent solaire, se diffusant dans la magnétosphère de Mercure avant de s'échapper à nouveau dans l'espace. La radioactivité des éléments enfouis dans la croûte de Mercure est une autre source d'hélium, aussi bien que de sodium et de potassium.

Exosphère

Les premiers composants découverts furent l'atome d'hydrogène (H), l'hélium (He) et l'atome d'oxygène (O), qui ont été détectés par le luxmètre à ultraviolet de Mariner 10 en 1974. En 2008, la sonde MESSENGER confirma la présence d'atome d'hydrogène avec une concentration supérieure à l'estimation de 1974. L'hydrogène et l'hélium exosphériques de Mercure sembleraient provenir du vent solaire, tandis que l'oxygène proviendrait de la croûte. Le quatrième composant détectés dans l'atmosphère est le sodium (Na). Il fut découvert en 1985 par Drew Potter et Tom Morgan, qui observaient les raies d'émission Fraunhofer à 589 et 589.6 nm. La densité moyenne de cet élément est de $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. D'après les observations, le sodium se concentre près des pôles, formant des taches blanches. Sa concentration semble augmenter près du terminateur. Certaines recherches démontreraient une corrélation entre l'abondance de sodium et certaines caractéristiques de la surface tel que le bassin Caloris; cependant ces résultats restent controversés. Un an après la découverte du Sodium, Potter et Morgan découvrirent que le potassium (K) est aussi présent dans l'atmosphère de Mercure, avec une densité deux fois importante que celle du sodium. Cependant, les propriétés et la distribution spatiale de ces deux éléments sont similaires. En 1998, un autre élément, le calcium (Ca), fut détecté (3 fois moins présent que le sodium). Les observations de MESSENGER de 2009 montrent que le calcium se concentre principalement à l'équateur (en opposition au cas du sodium et du potassium, localisés aux pôles). Le 3 juillet 2008, il fut annoncé que la sonde MESSENGER avait découvert de la vapeur d'eau dans les niveaux supérieurs de l'atmosphère de Mercure. Elle se serait formée sur place, par l'intermédiaire d'hydrogène issue du vent solaire et d'oxygène provenant des minéraux de la croûte de Mercure.

Près de la surface

Près de la surface, les concentrations respectives des atomes d'hydrogène (H) et d'oxygène (O) varierait, selon les estimations, entre 230 cm^{-3} pour l'hydrogène à $44,000 \text{ cm}^{-3}$ pour l'oxygène (l'hélium ayant une valeur intermédiaire).

Température

Les variations de la température de surface sur les astres sans atmosphère, ou avec une atmosphère extrêmement ténue, sont très prononcées. Lors d'un jour mercurien, la température de surface atteint 420°C, alors que pendant la nuit elle tombe à environ -180°C. À cause de ces énormes changements de température, les stress thermiques peuvent causer des effets notables sur la surface de Mercure.



Calcium et magnésium dans l'exosphère de la planète Mercure

Mariner 10 mit en évidence une ionosphère d'au plus un cent-millième de celle de la Terre. Le vent solaire et le dégazage du sol expliquent cette exosphère transitoire, d'une très faible pression de 200 nPa et la variation considérable de la composition de l'atmosphère. Les atomes composant principalement l'exosphère de Mercure (potassium et sodium) ont une durée de vie (de présence) estimée à trois heures avant d'être libérés dans l'espace et une heure et demie lorsque la planète est au périhélie c'est-à-dire au plus proche du Soleil. Les atomes se renouvellent constamment puisque des ions provenant du vent solaire sont capturés par la magnétosphère de la planète. De plus, les météorites qui tombent à la surface aident à l'approvisionnement en atomes de sodium et de potassium. Le sodium et le potassium, ainsi que l'argon et une bonne part du néon proviennent du dégazage résiduel des roches, alors que l'hydrogène et l'hélium proviennent principalement de la capture des ions du vent solaire par la magnétosphère de Mercure. Les impacts météoritiques (résiduels), comprenant les poussières du nuage zodiacal, qui éjectent des particules arrachées à la surface de la planète, contribuent aussi à la formation de cette infime « atmosphère ». Ces météorites apportent elles-mêmes de la matière et pourraient d'ailleurs être la source principale du potassium et du sodium détectés dans cette exosphère.

E) Conditions climatiques

Mercure est une planète très chaude. La température moyenne à la surface est 179 °C (452 K). C'est la température de stabilisation en dessous du régolite, où le sous-sol n'est plus soumis à l'alternance des « ondes » thermiques de la journée et de la nuit (égales à l'année mercurienne). Dans l'hémisphère nocturne, elle se stabilise vers 90 K (-183 °C) à la surface. Mais, elle monte jusqu'à 700 K (427 °C) dans l'hémisphère diurne, lorsque le soleil se trouve aux alentours du zénith. Du fait de l'inclinaison quasi nulle de son axe de rotation, ses zones polaires ne reçoivent les rayons solaires que rasants, ce qui doit entraîner une température d'équilibre en sous-sol bien inférieure à celles des latitudes plus basses, et induit des températures de surface inférieures à 50 K (-223 °C) dans le fond des cratères polaires, où la lumière solaire ne pénètre jamais. De la glace pourrait y être conservée, car à ces températures elle ne se sublime quasiment plus (la pression partielle de vapeur de la glace est quasiment nulle). Par comparaison, la température sur Terre varie seulement d'environ 11 K (sans tenir compte du climat ou des saisons, uniquement par l'effet du rayonnement solaire). Depuis sa surface, le Soleil apparaît en fonction de l'orbite elliptique de Mercure entre 2,1 et 3,3 fois plus gros que depuis la Terre, et sa lumière est environ 7 fois plus intense, avec un flux de rayonnement solaire de 9 126,6 W/m².

F) Géologie

La surface de Mercure est dominée par des cratères d'impacts, et des plaines de laves similaires, en certains points, aux maria lunaires. Les autres caractéristiques notables de la surface de Mercure incluent les escarpements et les gisements de minéraux (éventuellement de la glace) à l'intérieur des cratères des pôles. Actuellement, la surface est présumée être géologiquement inactive. Il faut cependant noter qu'à présent, seuls 55 % de la surface ont été cartographiés avec suffisamment de détail pour en dire plus à propos de sa géologie (grâce aux sondes Mariner 10 en 1974-75 et MESSENGER en 2008). L'intérieur de Mercure contient un très grand noyau métallique qui occupe environ 42 % de son volume. Une partie de ce noyau pourrait encore être liquide comme le prouve une magnétosphère faible mais globale.

Difficultés d'exploration

De toutes les planètes telluriques au sein du système solaire, la géologie de Mercure est la moins bien comprise. Cela s'explique tout d'abord par la proximité de cette planète avec le Soleil, qui rend l'approche de l'astre par des sondes techniquement délicat et les observations depuis la Terre difficiles. L'essentiel de ce qu'on sait de la géologie de Mercure repose sur les données recueillies par la sonde Mariner 10, qui effectua trois survols en 1974 et 1975. Atteindre Mercure depuis la Terre est un défi technique, car la planète orbite très près du Soleil. Un engin spatial à destination de Mercure, lancé depuis la Terre, doit voyager sur 91 millions de kilomètres dans le puits de potentiel gravitationnel du Soleil. À partir de la vitesse orbitale au niveau de l'orbite terrestre (de 30 km/s), la sonde doit acquérir un différentiel de vitesses (le « delta v », noté Δv) bien plus important que pour toute autre mission interplanétaire afin d'emprunter une orbite de transfert la conduisant à proximité de Mercure.



La sonde Mariner 10

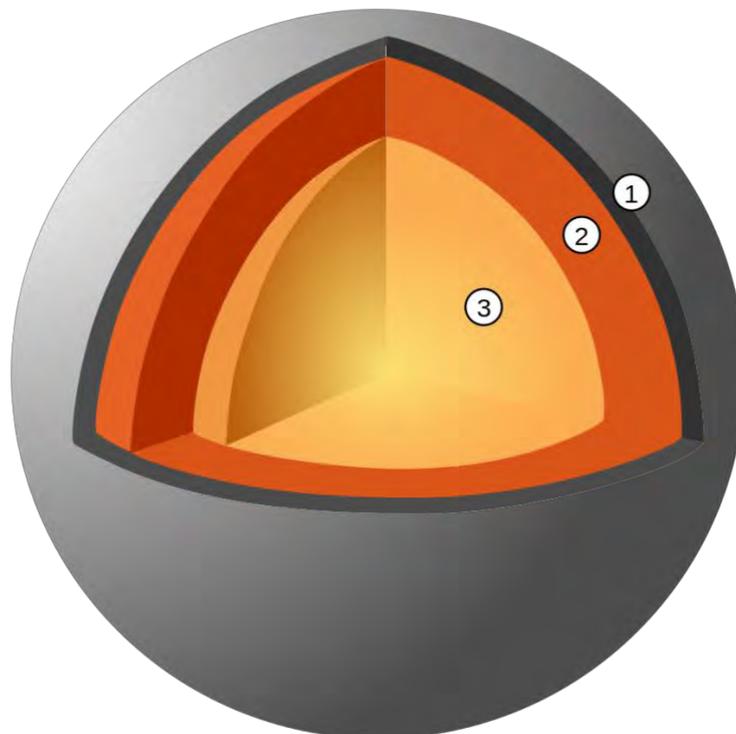
De plus, l'énergie potentielle libérée en se rapprochant du Soleil (et donc en descendant dans le puits de potentiel du Soleil) se convertit en énergie cinétique imprimant à la sonde une accélération qui doit être compensée par un important Δv supplémentaire pour ne pas dépasser trop vite Mercure : la somme de ces Δv dépasse celui permettant d'atteindre depuis la Terre la vitesse de libération du système solaire. Cette dissipation d'énergie cinétique est d'autant plus problématique que la planète ne possède pas d'atmosphère significative, à la différence par exemple de Vénus dont l'atmosphère épaisse permet un aérofreinage efficace : le seul moyen de freiner suffisamment pour se placer au niveau de Mercure consiste à utiliser des rétrofusées, ce qui accroît sensiblement la quantité de propergol nécessaire pour ce type de mission. Ainsi, seules deux sondes, Mariner 10 et MESSENGER, produites par la NASA, sont parvenues à atteindre Mercure à ce jour. De surcroît, l'environnement spatial de Mercure pose le double problème de l'intense rayonnement solaire et des températures élevées qui règnent si près de notre étoile. Historiquement, la période de rotation élevée de Mercure (58 jours terrestres) a compliqué l'exploration de la planète, en la limitant chaque fois à l'hémisphère éclairé. Ainsi, bien que Mariner 10 ait survolé Mercure trois fois durant les années 1974 et 1975, elle n'a pu observer que la même zone à chaque passage, car la période orbitale de la sonde était quasiment égale à trois jours sidéraux de Mercure, de sorte que la même face de l'astre était éclairée à chaque fois. Il en résulte que moins de 45 % de la surface de la planète a pu alors être cartographiée. Les observations depuis la Terre sont rendues délicates par la proximité constante de Mercure au Soleil. Cela a plusieurs conséquences :

1. Lorsque le ciel est suffisamment sombre pour permettre l'usage d'un télescope, Mercure est à proximité de l'horizon, ce qui dégrade la qualité des observations en raison des facteurs atmosphériques (plus importante épaisseur de l'atmosphère traversée par la lumière, plus importante quantité d'humidité, plus grande probabilité de couverture nuageuse, etc.).
2. Le télescope spatial Hubble et les autres observatoires spatiaux ne peuvent pas être dirigés vers le soleil, pour éviter tout risque de dégradation (les instruments sensibles pointés vers le Soleil pourraient subir des dommages irréversibles).

Dans ce contexte, la sonde MESSENGER de la NASA, lancée en août 2004, devait grandement contribuer à notre compréhension de Mercure quand elle entrera en orbite autour de la planète en mars 2011.

Histoire géologique de Mercure

Comme c'est le cas pour la Terre, la Lune et Mars, l'histoire géologique de Mercure est divisée en ères. De la plus ancienne à la plus récente, elles sont nommées pre-Tolstoïen, Tolstoïen, Calorien, Mansurien, et Kuiperien. Ces âges sont basés sur le seul principe de datation relative. La formation de Mercure, qui s'inscrit dans celle du reste du système solaire il y a 4,6 milliards d'années, fut suivie par un important bombardement d'astéroïdes et de comètes. La dernière phase intense de bombardement, le grand bombardement tardif, se termina il y a environ 3,9 milliards d'années. Plusieurs régions ou massifs furent remplis par des éruptions de magma issu du cœur de la planète, parmi lesquelles figure l'un des plus importants bassins, le Bassin Caloris. Cela créa des plaines lisses entre les cratères, similaires aux maria trouvées sur la Lune. Par la suite, alors que la planète se contractait en refroidissant, sa surface a commencé à se fissurer et à former des crêtes; ces fissures de surface et ces arêtes affectent plusieurs autres types de reliefs, tels que les cratères et les plaines lisses, ce qui indique clairement que les fissures sont postérieures aux plaines et aux cratères. L'activité volcanique de Mercure prit fin lorsque le manteau de la planète se fut suffisamment contracté pour empêcher que la lave ne perce la surface. Cela s'est probablement produit au bout de 700 à 800 millions d'années, c'est-à-dire il y a environ 3,7 milliards d'années. Depuis lors, la principale activité de surface a été provoquée par des impacts de surface.



1. Croûte - épaisse de 100 à 200 km
2. Manteau - épais de 600 km
3. Noyau - 1 800 km de rayon

Chronologie

Une analyse morphologique de la surface de Mercure aboutit à proposer l'échelle des temps géologiques suivante, constituée de cinq ères aux datations relatives largement estimatives :

- de -4,5 à -3,9 milliards d'années : ère pré-Tolstoïenne;
- de -3,9 à -3,85 milliards d'années : ère Tolstoïenne;
- de -3,85 à -3,80 milliards d'années : ère Calorienne;
- de -3,80 à -3 milliards d'années : ère du Calorien supérieur;
- de -3 milliards d'années à nos jours : ère du Mansurien/Kuipérien.

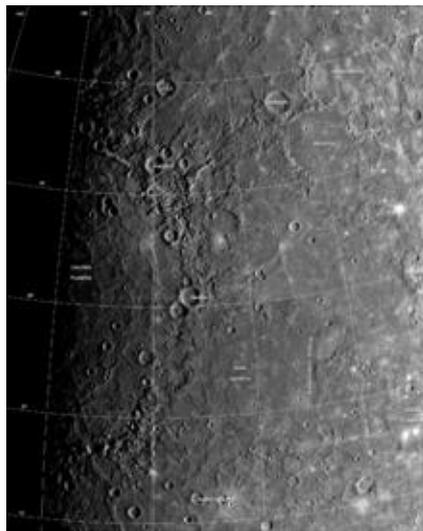
G) Caractéristiques de la surface

Les terrains en surface de Mercure sont globalement similaires, en apparence, à ceux de la Lune, avec de vastes plaines, sortes de maria, criblées de cratères semblables aux hautes terres lunaires.

a) Bassins et cratères d'impacts



Terrain chaotique, surnommé « terrain bizarre » (“weird terrain” en anglais), aux antipodes de l'impact qui forma le bassin Caloris



Le Bassin Caloris à la surface de Mercure, est l'un des plus grands bassins d'impact du système solaire



Un double anneau ceinturant un bassin d'impact sur Mercure

Les cratères de Mercure couvrent une large gamme de diamètres, de celui d'un petit bol jusqu'à celui d'une centaine de kilomètres de diamètre formant un bassin d'impact annelé. Ils apparaissent dans toute la gamme des états de dégradation possibles, certains sont relativement récents et d'autres ne sont que de très vieux restes de cratères complètement dégradés. Les cratères de Mercure diffèrent, dans les détails, des cratères lunaires. L'étendue de leurs couvertures d'éjectas est beaucoup plus petite, ce qui est une conséquence directe de la gravité de Mercure, 2,5 fois plus forte que celle de la Lune. La plus grande structure d'impact connue sur Mercure est le vaste bassin Caloris, qui a un diamètre de 1 550 km. L'existence d'un bassin d'une taille comparable est suspectée, sur la base des images en basse résolution obtenues depuis la Terre à l'Observatoire de Skinakas, en Crète, d'où le surnom donné à cette structure : le bassin Skinakas. Il se situerait sur l'hémisphère qui n'a pas été photographié par la sonde Mariner. Il n'a cependant pas encore été observé sur les images que la sonde MESSENGER a transmises de cette zone. L'impact à l'origine du bassin Caloris était si puissant qu'il est possible d'en observer les répercussions sur la totalité de la planète. Il a provoqué des éruptions de lave et un anneau concentrique d'une hauteur de 2 km au-dessus du cratère d'impact. Aux antipodes du bassin Caloris se trouve une zone au relief inhabituel, parcourue de sillons et de buttes entremêlés, généralement appelée *terrain chaotique* et surnommée par les Anglo-Saxons « *weird terrain* » (« terrain bizarre »). L'hypothèse privilégiée pour expliquer l'origine de cette unité géomorphologique est que les ondes de choc générées lors de l'impact ont voyagé sur toute la surface de la planète, et que lorsqu'elles ont convergé aux antipodes du bassin, les contraintes élevées que la surface a subi sont parvenues à la fracturer. Une idée beaucoup moins souvent retenue est que ce terrain a été formé à la suite de la convergence des éjectas, aux antipodes du bassin. En

outre, la formation du bassin Caloris semble avoir produit une dépression peu profonde autour de ce bassin, qui a été comblée plus tard par des plaines lisses. Dans l'ensemble, environ 15 bassins d'impacts ont été identifiés dans la région photographiée de Mercure. Parmi les autres bassins notables figurent le bassin Tolstoï, de 400 km de large, en anneaux multiples, qui a une couverture d'éjectas s'étendant jusqu'à 500 km depuis son pourtour, avec un fond comblé par les matériaux formant une plaine lisse. Le bassin Beethoven a également une taille similaire avec une couverture d'éjectas de 625 km de diamètre. À l'instar de ceux de la Lune, les cratères récents de Mercure montrent des structures rayonnées plus lumineuses que leur voisinage. Cela est la conséquence du fait que les débris éjectés restent relativement frais et tendent à être plus lumineux, parce qu'ils sont moins affectés par l'érosion spatiale que les terrains plus anciens.

b) Cratères à cavités d'effondrement

Le fond de certains cratères d'impact sur Mercure est marqué par des cavités irrégulières ou des fosses non-circulaires. De tels cratères nommés *pit-floor craters* ou encore *subsidence crater* en anglais, littéralement « cratères à cavités d'effondrement » ou « cratère d'affaissement » : cette dénomination vient de l'interprétation de ces formations par l'équipe MESSENGER comme résultant de l'effondrement de chambres magmatiques sous les cratères concernés. Si cette hypothèse est exacte, les dépressions observées témoigneraient de processus volcaniques à l'œuvre sur Mercure. Les cavités de ces cratères sont abruptes et sans rebord, de forme souvent irrégulière, ne présentent pas d'éjectas ni d'écoulements de lave, mais ont une couleur différente des terrains environnants. Ainsi, celles de Praxitèle ont une teinte orangée. Ces cavités pourraient avoir été formées par l'effondrement de chambres magmatiques souterraines dont le contenu, une fois exprimé hors de ces chambres, n'avait plus la pression nécessaire pour soutenir le poids des matériaux situés au-dessus. Des cratères majeurs tels que Beckett, Gibran et Lermontov présentent de telles cavités d'effondrement.

c) Plaines

Il y a deux types de plaines, géologiquement distinctes, sur Mercure :

- Les *plaines inter-cratères* sont les plus vieilles surfaces visibles, précèdent l'apparition des terrains fortement cratérisés. Elles sont légèrement vallonnées ou montagneuses et sont placées dans des régions entre les cratères. Les plaines inter-cratères semblent avoir effacées de nombreux cratères qui les ont précédés, et montrent un manque général de cratères plus petits, inférieurs à environ 30 km de diamètre. Leur origine, volcanique ou d'impact n'est pas clairement déterminée. Les plaines inter-cratères sont distribuées à peu près uniformément sur la surface entière de la planète.
- Les *plaines lisses* sont de vastes zones plates ressemblant aux mers (marea) lunaires, qui remplissent des dépressions de tailles variées. Elles remplissent notamment un large anneau entourant le bassin Caloris. À la différence des marées lunaires, les plaines lisses de Mercure ont le même albédo que les plaines inter-cratères pourtant plus âgées. Malgré un manque de caractéristiques volcaniques indiscutables, leur localisation et leur unité de couleurs aux formes lobées appuient fortement une origine volcanique. Tous les plaines lisses de Mercure ont été formées beaucoup plus tard que le bassin Caloris, comme en témoigne la densité de cratères sensiblement plus petite que sur la couverture d'éjecta Caloris.

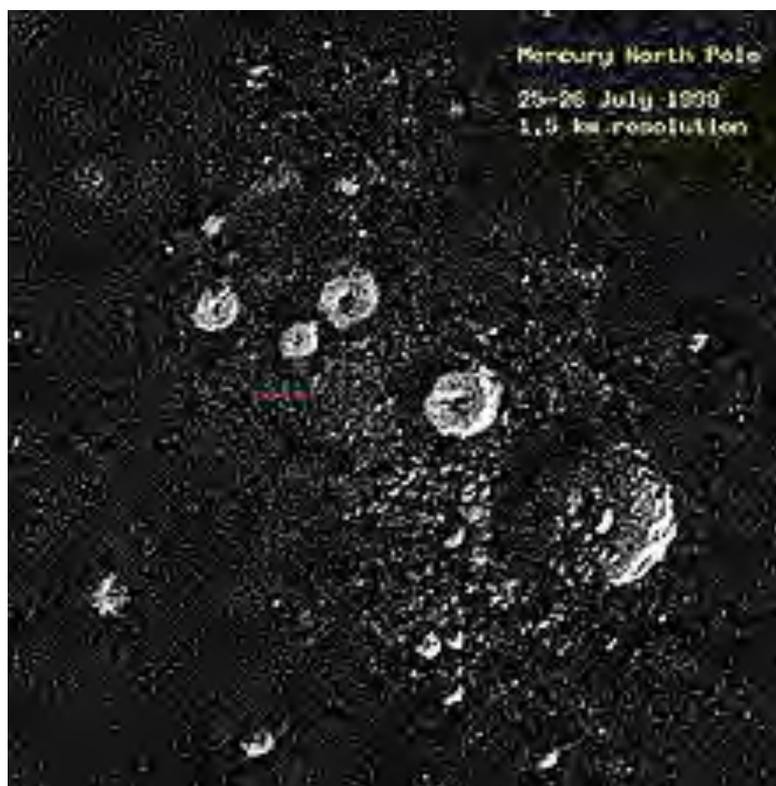
Le sol du bassin Caloris est également occupé par une plaine plate géologiquement distinctes, brisée par des falaises et des fractures formant une structure approximativement polygonale. Il n'a cependant pas pu être clairement déterminé si ce sol était le produit de laves volcaniques issue de l'impact, ou s'il s'agissait d'une large plaque résultant de la surface fondue par la violence de l'impact lui-même.

Caractéristiques tectoniques

Une caractéristique que l'on trouve peu communément sur d'autres planètes est le nombre important de plis de compression qui cisailent les plaines. On suppose que au moment où l'intérieur de la planète s'est refroidi, celle-ci s'est contractée et a déformé la surface. Ces plis peuvent être observés au-dessus d'autres reliefs, cratères ou plaines lisses, ils sont donc postérieurs à la formation de ces derniers. La surface de Mercure est aussi fléchie par d'importantes forces de marée dues à la proximité du Soleil. En effet, les forces de marée du Soleil sont environ 17 % plus fortes que celles qu'exerce la Lune sur la Terre.

d) La glace

Les premières observations radar de Mercure étaient effectuées par les radiotélescopes d'Arecibo et au centre de communications spatiales longues distances de Goldstone, avec l'assistance du Very Large Array (VLA) du National Radio Astronomy Observatory au Nouveau-Mexique. Les transmissions envoyées depuis le Deep Space Network de la NASA situé à Goldstone, étaient d'un niveau de puissance de 460 kW à 8,51 GHz; les signaux reçus par le VLA ont détecté des points de réflectivité radar (luminosité radar) avec des vagues de dépolarisation issues du pôle nord de Mercure. La cartographie radar de la surface de la planète était réalisée en utilisant le radiotélescope d'Arecibo. L'enquête était menée dans les ondes radios ultra haute fréquence de 420 kW à 2,4 GHz qui permet une résolution de 15 km. Cette étude n'a pas seulement confirmé l'existence de zones de haute réflectivité et de dépolarisation, mais a aussi permis de trouver un certain nombre de nouvelles zones (portant le total à 20) et a permis l'étude des pôles. Il a alors été proposé qu'une surface de glace puisse être responsable de ces phénomènes. L'idée que Mercure puisse avoir de la glace à sa surface pouvait paraître absurde au premier abord, étant donné la proximité du Soleil. Néanmoins, il est possible que de la glace soit responsable des niveaux de luminosité élevés, car les roches de silicate qui composent l'essentiel de la surface de Mercure ont exactement l'effet contraire sur la luminosité. La présence de glace ne peut s'expliquer par une autre découverte faite par les radars depuis la Terre : aux latitudes élevées de Mercure, Les cratères peuvent être assez profonds pour protéger la glace des rayons du soleil. Au pôle Sud, l'emplacement d'une vaste zone de haute réflectivité coïncide avec l'emplacement du cratère Chao Meng-Fu et d'autres petits cratères contenant des zones réfléchives ont aussi été identifiés. Au pôle Nord, un certain nombre de cratères plus petits que Chao Meng-Fu ont aussi ces propriétés réfléchives. Mais la réflectivité radar constatée sur Mercure est minime par rapport à ce qui se produirait avec de la glace pure. Cela pourrait être dû à des dépôts de poussières qui ne couvriraient pas complètement la surface du cratère ou à d'autres causes, par exemple une fine couche de surface. Toutefois la preuve de la présence de glace sur Mercure n'est pas encore faite. Ces propriétés réfléchissantes anormales peuvent aussi être dues à l'existence de gisements de sulfates métalliques ou d'autres matériels avec une haute réflectivité.



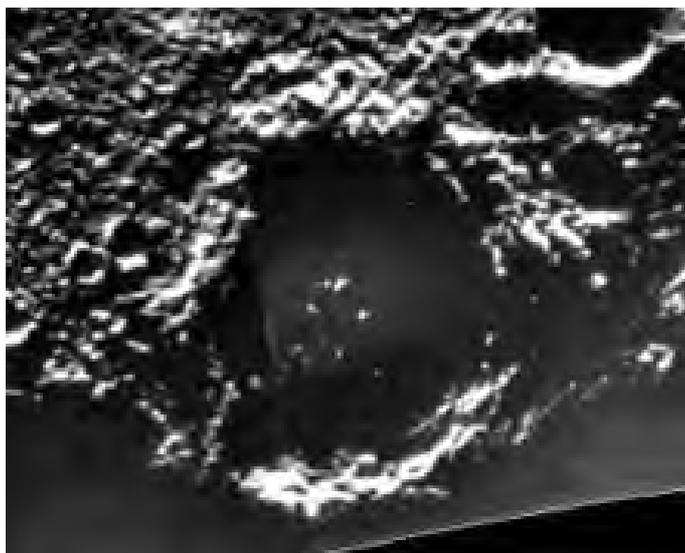
Origine de la glace

Mercury n'est pas la seule à avoir des cratères dont la surface reste en permanence dans l'ombre : dans un large cratère (Aitken) au pôle sud de la Lune, des signes d'une possible présence de glace ont été observés (bien que leur interprétation soit encore discutée). La glace de la Lune et de Mercure proviendrait, selon les astronomes, de sources externes, principalement d'impacts de comètes. Elles sont connues pour contenir de grandes quantités de glace, voire pour en être majoritairement composées. Il est donc envisageable pour les impacts que des météorites aient déposé de l'eau dans les cratères plongés dans une ombre permanente, où elle ne sera peut-être pas chauffée par les rayonnements solaires pendant des milliards d'années, en raison de l'absence d'une atmosphère capable de diffuser efficacement la chaleur, mais aussi du fait de l'orientation stable de l'axe de

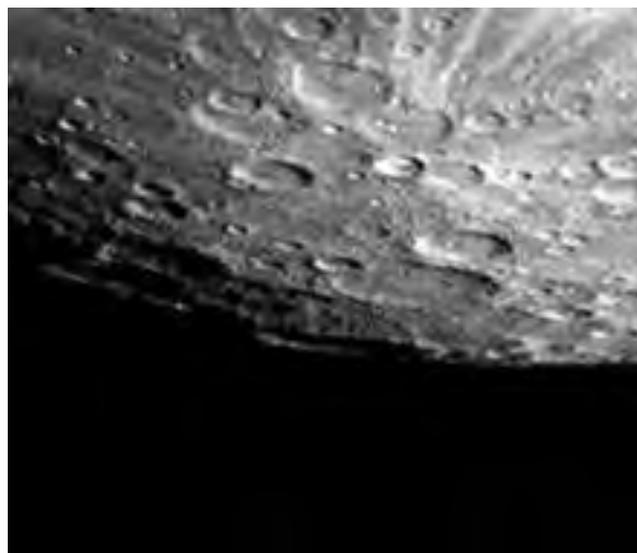
rotation de Mercure. Malgré le phénomène de sublimation de la glace dans le vacuum spatial, la température dans des régions d'ombre permanente est si basse que cette sublimation est suffisamment lente pour préserver des dépôts de glace pendant des milliards d'années. À l'intérieur des cratères, (sans lumière solaire) la température tombe à -171°C contre -106°C sur les plaines polaires.

Images radar des possibles glaces aux pôles mercuriens

e) Quelques détails de Surface



Cratère de Chao Meng-Fu



Surface de Mercure

La surface de Mercure est couverte d'un tapis poussiéreux de minéraux (silicates), de cassures et de cratères. La planète ressemble beaucoup en apparence à la Lune, ne présentant *a priori* aucun signe d'activité interne. Pour les astronomes, ces cratères sont très anciens et racontent l'histoire de la formation du système solaire, lorsque les planétésimaux entraient en collision avec les jeunes planètes pour fusionner avec elles. La découverte des plaines volcaniques sur la surface permet de remettre en cause des chutes d'énormes astéroïdes atteignant le manteau, et pouvant créer en même temps des éruptions volcaniques à l'opposé de la planète. Le plus remarquable de ces cratères (du moins, sur la portion qui a pu être photographiée) est le Bassin Caloris, un impact météoritique d'un diamètre d'environ 1 300 km, qui fut formé après la chute d'un astéroïde d'une taille avoisinant les 150 km, il y a près de 3,85 milliards d'années. Son nom (« Caloris », chaleur en latin) vient du fait qu'il est situé sur l'un des deux « pôles chauds » de la surface de Mercure, pôle qui fait directement face au Soleil lorsque la planète est au plus proche de celui-ci. Un cratère d'un diamètre supérieur à 200 km, appelé « bassin Caloris ». Il s'agit d'une grande dépression circulaire, avec des anneaux concentriques. Plus tard, de la lave a certainement coulé dans ce grand cratère, et en a lissé la surface. Seule la partie est a pu être photographiée par la sonde Mariner 10, la partie ouest étant plongée dans l'ombre au moment du survol de Mercure. L'impact aurait « creusé » jusqu'au manteau planétaire de Mercure, créé des ondes de choc qui ont perturbé et traversé le noyau, puis causé des plissements à l'opposé de ce cratère sur la planète.



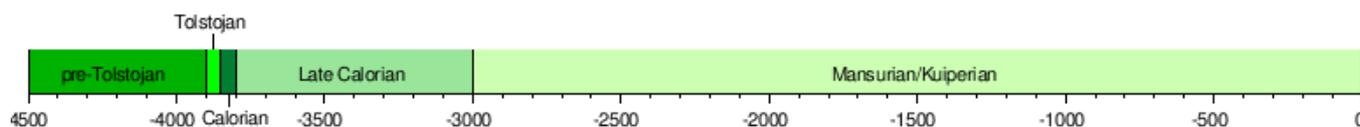
Discovery Scarp (au centre), l'un des plus importants escarpements photographiés par Mariner 10. Il mesure 350 km de long et coupe deux cratères de 35 et 55 km de diamètre

À l'opposé du bassin Caloris se trouve une région très accidentée, de la taille de la France et de l'Allemagne réunies, formée de blocs rocheux désordonnés. Les scientifiques pensent que ces fractures sont le résultat du choc qui produisit le bassin Caloris. Les ondes de choc produites par l'impact météoritique ont déformé la face opposée, soulevant le sol à une hauteur de 800 m à 1 000 m, et déformant la surface de Mercure, produisant cette région chaotique. Par ailleurs, les photographies prises par Mariner 10 révèlent la présence d'escarpements lobés dus à une contraction de la planète lors de son refroidissement. Ce refroidissement entraîna une diminution du rayon de la planète d'environ 2 km, produisant des cassures dans la croûte, pour former des crêtes et des plis. Ces escarpements traversent les cratères, les montagnes et les vallées, et peuvent atteindre une longueur de 500 km. Certaines crêtes atteignent des hauteurs d'environ 4 000 m. L'ancienneté de ces escarpements montre que la planète n'a pas connu d'activité tectonique depuis son jeune âge.

Les différentes caractéristiques de la surface de Mercure sont :

- les cratères — voir liste des cratères de Mercure;
- les *Albedos* (régions marquées par une réflexion plus forte ou plus faible) — voir liste des albedos de Mercure;
- les *Dorsa* (crête) — voir liste des crêtes de Mercure;
- les *Montes* (montagnes) — voir liste des monts de Mercure;
- les *Planitiae* (plaines) — voir liste des plaines de Mercure;
- les *Rupes* (escarpements) — voir liste des escarpements de Mercure;
- les *Valles* (vallées) — voir liste des vallées de Mercure.

H) Les Périodes géologiques de Mercure



L'évolution géologique de Mercure peut être divisée en cinq grandes périodes ou époques.

- La première s'étend du tout début de l'histoire du système solaire à la période de bombardements intenses. La nébuleuse solaire primitive s'est condensée et a commencé à former de la matière solide; d'abord de petite masse qui a force de s'accumuler (processus d'accrétion) a produit des corps de plus en plus gros, ayant une force d'attraction de plus en plus importante, jusqu'à former la principale masse de Mercure. La nature homogène ou hétérogène de cette accumulation de matière reste encore inconnue : on ne sait pas si Mercure s'est formée à partir d'un mélange de fer et de silicate qui se sont ensuite dissociés pour former séparément un noyau métallique et un manteau de silicate, ou si le noyau s'est formé en premier, à partir de métaux, puis le manteau et la croûte ne sont venus qu'après, lorsque les éléments lourds comme le fer sont devenus moins abondants aux environs de Mercure. Il y a peu de chance pour que Mercure ait possédé une atmosphère initiale (juste après l'accumulation de matière), ou alors elle se serait évaporée très tôt avant l'apparition des plus anciens cratères. Si Mercure avait eu une atmosphère, on aurait pu remarquer une érosion des cratères par les vents, comme sur Mars. Les escarpements présents majoritairement dans les régions « inter-cratères » (qui sont des surfaces plus anciennes que les cratères) et qui traversent parfois certains des plus vieux cratères, montrent que le refroidissement du noyau et la contraction de la planète se sont produits entre la fin de la première période et le début de la seconde.
- La seconde période est caractérisée par un fort bombardement météoritique par des corps relativement gros (des résidus du processus d'accrétion), couvrant la surface de Mercure par des cratères et des bassins (cratères larges de plus de 200 km de diamètre), et se termine à la formation du bassin Caloris. Il n'est pas certain que cette période soit la phase terminale de l'accrétion de Mercure; il est possible qu'il ne s'agisse que d'un second épisode de bombardement indépendant de cette accumulation. D'autant plus que c'est l'époque du grand bombardement tardif.
- La formation du bassin Caloris marque la séparation entre la seconde et la troisième période. L'impact météoritique a donné lieu à de fortes transformations de la surface de Mercure : la création de l'anneau montagneux Caloris Montes autour du cratère produit par l'impact et les déformations

chaotiques de l'autre côté de la planète. Cet évènement s'est produit il y a environ 3,8 milliards d'années. L'asymétrie de la répartition interne des masses qu'il a occasionnée, à l'échelle de la planète, a été le pivot sur lequel se fonde la synchronisation des périodes rotation/révolution : le bassin Caloris est (avec son antipode) un des « pôles équatoriaux chauds ».

- La quatrième époque géologique de Mercure débute après la collision donnant lieu au bassin Caloris et couvre la période de volcanisme qui s'ensuit. Des coulées de lave ont formé une partie des grandes plaines lisses, grossièrement similaires aux *maria* lunaires. Cependant, les plaines lisses recouvrant le bassin Caloris (Suisei, Odin, et Tir Planitia) auraient été formées par des éjectas lors de l'impact Caloris. On estime que cette période s'est déroulée il y a entre 4 et 3 milliards d'années.
- La dernière époque s'étend d'il y a 3 milliards d'années à aujourd'hui. Hormis de petits impacts météoritiques, peu d'évènements se sont produits sur Mercure durant cette période.



Vue d'artiste d'un grand bombardement tardif

D) Le volcanisme

La présence de plaines plus jeunes (les plaines lisses) est la preuve que Mercure a connu dans son passé une activité volcanique. L'origine de ces plaines a été mise en évidence à la fin des années 1990 par Mark Robinson et Paul Lucey en étudiant les photographies de Mercure. Le principe était de comparer les surfaces lisses — formées à partir de coulées de laves — avec les autres, non lisses (et plus anciennes). S'il s'agissait bien d'éruptions volcaniques, ces régions devaient être d'une composition différente de celle qu'elles recouvraient, puisque composées de matériaux venant de l'intérieur de la planète.

Les images prises par Mariner 10 ont d'abord été recalibrées à partir d'images prises en laboratoire avant le lancement de la sonde, et d'images prises durant la mission des nuages de Vénus (Vénus présente une texture plutôt uniforme) et de l'espace profond. Robinson et Lucey ont ensuite étudié divers échantillons de la Lune — qui aurait connu une activité volcanique similaire — notamment la réflexion de la lumière afin de faire un parallèle entre la composition et la réflexion de ces matériaux. À l'aide de techniques avancées de traitement d'images numériques (qui n'étaient pas possibles à l'époque de la mission Mariner 10), ils ont appliqué un code de couleurs aux images afin de différencier les matériaux minéraux sombres des matériaux métalliques. Trois couleurs ont été utilisées : le rouge pour caractériser les minéraux opaques, sombres (plus le rouge est prononcé, moins il y a de minéraux sombres); le vert pour caractériser à la fois la concentration d'oxyde de fer (FeO) et l'intensité du bombardement de micrométéorites, également appelé « maturité » (la présence de FeO est moins importante, ou la région est moins mature, sur les portions plus vertes); le bleu pour caractériser le rapport UV/lumière visible (l'intensité de bleu augmente avec le rapport). La combinaison des trois images donne des couleurs intermédiaires. Par exemple, une zone en jaune peut représenter une combinaison d'une forte concentration en minéraux opaques (rouge) et une maturité intermédiaire (vert).



Mercury en fausses couleurs. Les couleurs mettent en évidence des régions de composition différente, notamment les plaines lisses issues de coulées de lave (en bas à gauche, en orange)



Une plaine lisse recouvrant un ancien bassin de 190 km de diamètre

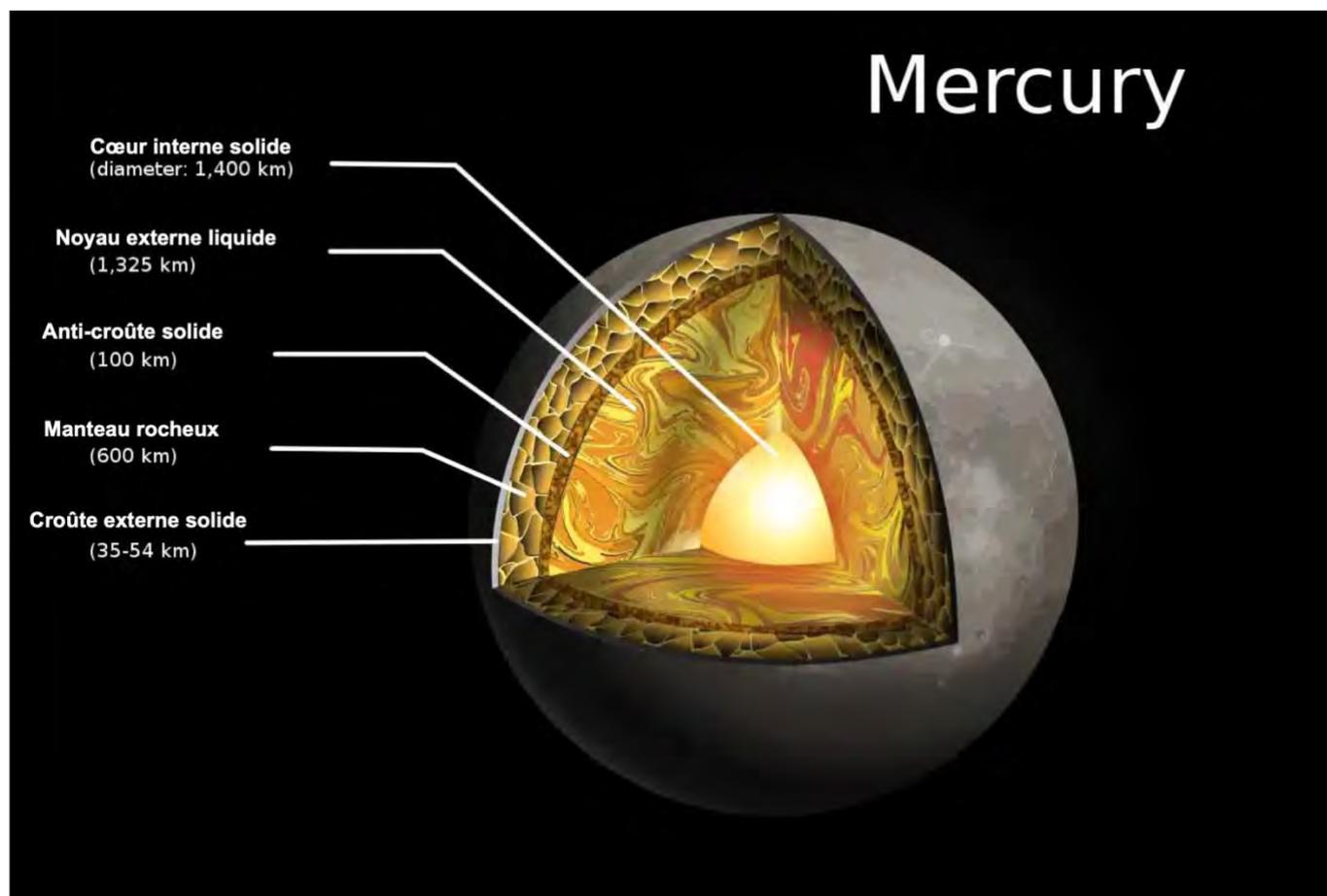
Robinson et Lucey ont alors remarqué que les plaines étaient marquées de couleurs différentes par rapport aux cratères et ont pu en déduire que ces plaines étaient de composition différente par rapport aux surfaces plus anciennes (caractérisées par la présence de cratères). Ces plaines ont dû, à l'instar de la Lune, être formées par des coulées de lave. De nouvelles questions se posent alors quant à la nature de ces remontées de roche en fusion : s'agit-il de simples épanchements fluides, ou d'éruptions explosives ? Cependant, toutes les plaines n'ont peut-être pas pour origine des coulées de lave. Il est possible que certaines se soient formées à partir de retombées de poussières et de fragments du sol, éjectés lors de gros impacts météoritiques. Certaines éruptions volcaniques ont pu se produire à la suite de grosses collisions. Dans le cas du Bassin Caloris, le cratère généré par l'impact devait avoir à l'origine une profondeur de 130 km, atteignant probablement le manteau qui a dû entrer partiellement en fusion lors du choc (pression et température très importantes). Le manteau est ensuite remonté lors du réajustement du sol, comblant le cratère. Ainsi, sachant qu'une partie de la surface de Mercure provient de son intérieur, les scientifiques ont pu en apprendre plus sur la composition interne de la planète.

J) La structure interne

Mercure est l'une des quatre planètes telluriques du Système solaire, et possède un corps rocheux comme la Terre. C'est également la plus petite, avec un rayon équatorial de 2 439,7 km. Mercure est également plus petite (bien que plus massive) que deux satellites naturels du Système solaire, Ganymède et Titan. Mercure est composée d'environ 70 % de métaux (principalement dans le noyau) et de 30 % de silicate (principalement dans son manteau). La densité de Mercure est la deuxième plus élevée dans le Système solaire, avec 5,427 g/cm³, soit à peine moins que la densité de la Terre, qui est de 5,515 g/cm³. Si l'effet de la compression gravitationnelle devait être ignoré, c'est Mercure qui serait plus dense avec 5,3 g/cm³ contre 4,4 g/cm³ pour la Terre, du fait d'une composition avec des matériaux plus denses.

La densité de Mercure peut être utilisée pour déduire des détails sur sa structure interne. Bien que la haute densité de la Terre résulte sensiblement de la compression gravitationnelle, en particulier au niveau du noyau terrestre, Mercure est beaucoup plus petite et ses régions internes ne sont pas aussi comprimées. Par conséquent, pour qu'elle ait une densité aussi élevée, son noyau doit être volumineux et riche en fer. Les géologues estiment que le noyau de Mercure occupe environ 85 % de son rayon, ce qui représenterait ainsi environ 61,4 % de son volume contre 17 % pour la Terre par exemple. Des recherches publiées en

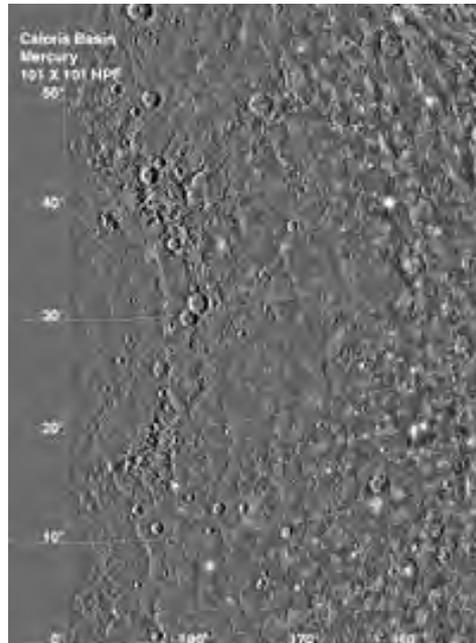
2007 ont un temps suggéré que le noyau de Mercure était totalement liquide (nickel et fer). Plus récemment, d'autres études utilisant des données de la mission MESSENGER, achevée en 2015, amènent cependant les astronomes à penser que le noyau interne de la planète est en réalité solide. Autour du noyau se trouve une couche centrale externe solide de sulfure de fer et un manteau composé de silicates. D'après les données de la mission Mariner 10 et les observations terrestres, la croûte de Mercure aurait une épaisseur entre 35 et 54 km. Une caractéristique distinctive de la surface de Mercure est la présence de nombreuses crêtes étroites, s'étendant jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de longueur. On pense qu'elles se sont formées lorsque le noyau et le manteau de Mercure ont refroidi et se sont contractés à un moment où la croûte s'était déjà solidifiée.



Structure interne de Mercure telle que supposée en 2020. On relève notamment le noyau représentant près de 85 % de son rayon, un noyau interne solide et une fine croûte.

K) Métallicité

La proportion en fer de Mercure (proportion plus importante que celle de tout autre objet du système solaire) intrigue toujours les astronomes. La réponse à cette question permettrait certainement d'en apprendre beaucoup sur la nébuleuse solaire primitive et les conditions dans lesquelles le système solaire s'est formé. Trois hypothèses ont été proposées pour expliquer la haute métallicité de Mercure et son noyau gigantesque.



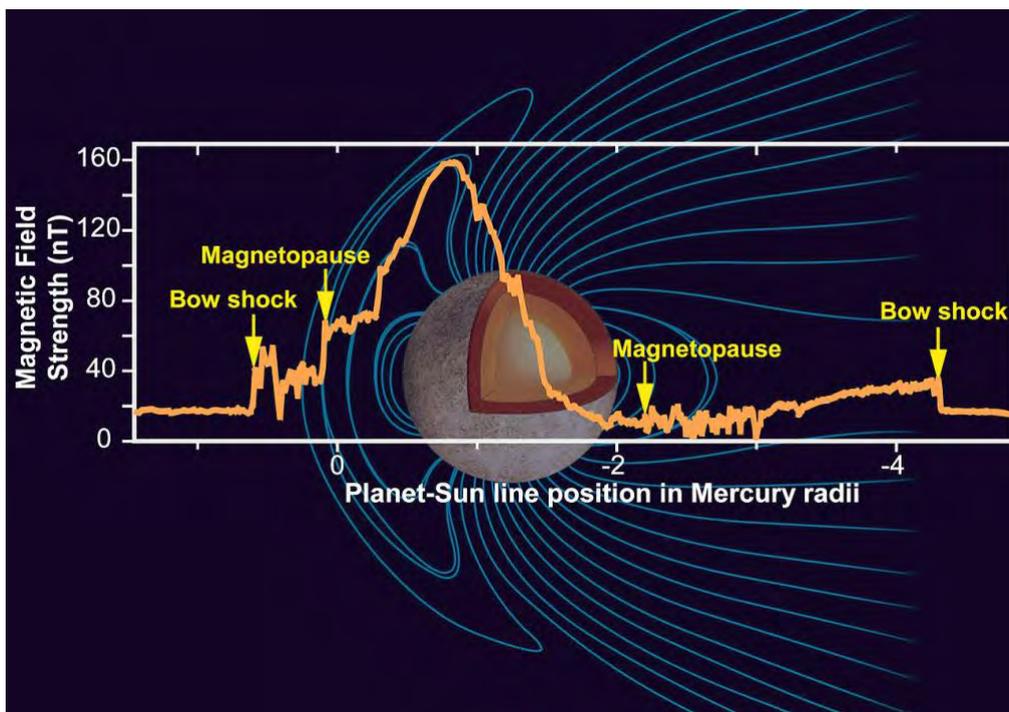
Le bassin Caloris situé dans l'ombre du terminateur (à gauche), cratère formé à la suite d'un impact météoritique, et mesurant 1 350 km de diamètre

L'une d'entre elles suggère que Mercure avait à l'origine un rapport métal/silicate semblable à celui des chondrites et une masse d'environ 2,25 fois la masse courante. Tôt dans l'histoire du système solaire, Mercure aurait été frappée par un planétésimal d'environ 1/6^e de cette masse. L'impact aurait arraché à la planète une grande partie de sa croûte (la croûte terrestre est la partie superficielle et solide du matériau dont est faite Mercure) et de son manteau, ne laissant derrière que le noyau (métallique), qui aurait fusionné avec celui du planétésimal, et un mince manteau. Une hypothèse assez semblable au scénario (très probable) retenu pour expliquer la formation de la Lune. Une seconde hypothèse propose que le taux d'éléments lourds, comme le fer, présents dans la nébuleuse solaire était plus important au voisinage du Soleil, voire que ces éléments lourds étaient distribués graduellement autour du Soleil (plus on s'en éloignait, moins il y avait d'éléments lourds). Mercure, proche du Soleil, aurait donc amassé plus de matériaux lourds que les autres planètes pour former son noyau. Alternativement, Mercure aurait pu s'être formée très tôt dans l'histoire, avant même que l'énergie dégagée par le Soleil ne se soit stabilisée. Mercure aurait eu à sa formation le double de sa masse courante, mais à mesure que la proto-étoile se contractait, la température aux alentours de Mercure augmentait et aurait pu atteindre 2500–3500 K, voire 10 000 K. À de telles températures, une grande partie de la surface de Mercure aurait été vaporisée, formant une atmosphère de « vapeurs rocheuses », qui aurait été ensuite transportée ailleurs par les vents solaires. Une hypothèse similaire propose que les couches extérieures de Mercure aient été érodées par les vents solaires, durant une plus longue période.

L) Champ magnétique

Révélee par la sonde Mariner 10 lors de sa première approche, en mars 1974, la présence d'un champ magnétique faible surprit les astronomes qui pensaient jusque-là que Mercure était dépourvue de toute magnétosphère. Vingt minutes avant de survoler la planète au plus près, les magnétomètres de Mariner 10 détectèrent l'onde de choc d'étrave produite par la collision de ce champ avec celui du Soleil et le mesurèrent à 1 μ T, ce qui représente un peu moins d'un soixantième du champ magnétique terrestre. La source du champ magnétique, encore incertaine, a été déterminée durant un second passage de Mariner 10 comme étant intrinsèque à Mercure, et non pas provoquée par l'action des vents solaires. Avant la mission Mariner 10, les astronomes ne pensaient pas que Mercure possédât un champ magnétique du fait de sa vitesse de rotation (trop lente pour pouvoir l'engendrer par effet dynamo) et de sa petite taille (qui laissait penser que le noyau de Mercure s'était solidifié depuis longtemps). Il fallut donc admettre que ce noyau est partiellement fondu et connaît des mouvements de convection qui seraient à l'origine de ce champ. Néanmoins, les estimations récentes suggèrent que le noyau de Mercure n'est pas assez chaud pour que le fer–nickel soit présent sous forme liquide. En revanche, il est possible que d'autres éléments soient

présents, comme le soufre; qui se sont concentrés dans la phase liquide résiduelle, abaissant ainsi le point de fusion du mélange. Il se peut également que le champ magnétique de Mercure soit le reste d'un ancien effet dynamo qui a maintenant cessé, devenu « figé » dans les matériaux magnétiques solidifiés du noyau (la période de rotation ayant pu être beaucoup plus courte par le passé).



Champ magnétique de Mercure

Par ailleurs, le champ magnétique de Mercure est une version réduite du champ magnétique terrestre. Norman Ness, qui était alors chargé de l'étude du champ magnétique, put prédire (en supposant d'avance qu'il s'agissait d'une version réduite du champ terrestre) les moments précis où la sonde traverserait l'onde de choc, la magnétopause ainsi que la zone où le champ est maximal. Ces prédictions concordaient avec les mesures relevées par les instruments de Mariner 10. Des expériences menées par la sonde ont montré que, tout comme celle de la Terre, la magnétosphère de Mercure possède une queue séparée en deux par une couche neutre.

III Observations et Exploration

A) Observations dans l'Antiquité



Mercuré, le messager des dieux

Mercuré est connue depuis que les hommes s'intéressent au ciel nocturne; la première civilisation à en avoir laissé des traces écrites est la civilisation sumérienne (III^e millénaire av. J.-C.) qui la nommait « *Ubu-idim-gud-ud* », mais elle était probablement connue depuis bien avant. Les premiers écrits d'observations détaillées de Mercuré nous viennent des Babyloniens. Les Babyloniens donnaient à cet astre, qu'ils associaient au dieu Nabû du savoir dans la mythologie mésopotamienne, le nom de « *gu-ad* » ou « *gu-utu* ». Ils sont également les premiers à avoir étudié le mouvement apparent de Mercuré, qui est différent de celui des autres planètes.

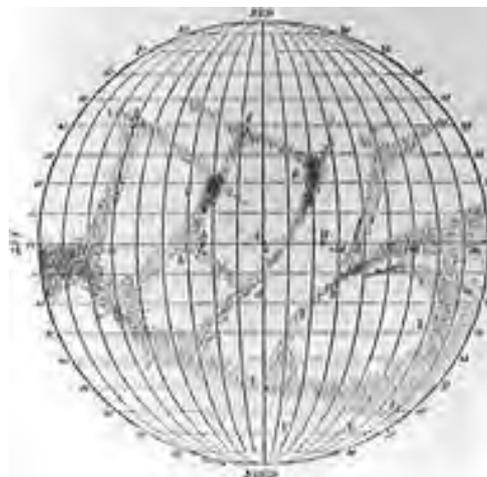
Plus tard, dans l'Antiquité, les Grecs considérèrent jusqu'au IV^e siècle av. J.-C. que Mercure visible avant le lever du Soleil d'une part et Mercure visible après son coucher d'autre part relevaient de deux astres distincts, appelés respectivement du nom des dieux Apollon (Ἀπόλλων) et Hermès (Ἑρμῆς) de la mythologie grecque; bien que Pythagore aurait « démontré » qu'il s'agissait du même astre. Les Égyptiens procédèrent de même en donnant le nom de Sat à l'étoile du soir et Horus à celle du matin. Le nom « Mercure » est issu de la mythologie romaine. Mercure, ou Hermès dans la mythologie grecque, est le messager des dieux ainsi que le dieu protecteur des commerçants, des médecins et des voleurs. L'association de la planète au dieu Mercure semble provenir du fait que la planète se déplace rapidement dans le ciel, rappelant la célérité de la divinité gréco-romaine. Auguste Wahlen écrit dans son Dictionnaire : « Pourquoi donc une planète aussi peu importante dans le système dont elle fait partie porte-t-elle le nom du messager des dieux dans l'Olympe mythologique ? C'est qu'elle se trouve assez fréquemment en conjonction avec les autres planètes entre lesquelles ces rapprochements sont beaucoup plus rares. Comme la durée de sa révolution autour du Soleil ou son année n'est que le quart de l'année terrestre, dans ce court espace de temps on la voit se diriger vers une planète et après s'en être approchée s'éloigner pour faire une autre visite aussi promptement terminée. La fréquente répétition de cette sorte de voyages a pu faire concevoir l'idée d'un autre messager ».

Hygin qui, au I^{er} siècle ap. J.-C., a compilé un grand nombre de sources grecques mentionne dans ses *Fables mythologiques* que la planète était aussi connue sous le nom de Stilbon (ou *Stilbos*), « celui qui brille ». Vue depuis des millénaires dans le ciel terrestre, Mercure est une planète difficile à observer depuis la Terre de par sa distance relativement proche du Soleil. Depuis l'Antiquité, son observation est un défi pour les astronomes; la planète restant dans les environs du Soleil dont la lumière éblouit. De plus, elle n'est visible qu'au petit matin, ou au crépuscule, et seulement quelques moments dans l'année. Mercure possède une magnitude apparente qui varie entre -0,4 et 5,5. La planète est visible juste au-dessus de l'horizon, ce qui accroît la difficulté d'observation : la lumière réfléchiée par Mercure doit traverser dix fois plus d'atmosphère terrestre que si on l'observait au zénith, ce qui produit des distorsions et une image moins nette. On raconte que sur son lit de mort Copernic regretta de ne jamais avoir pu observer Mercure à cause des brouillards qui s'élevaient sur la Vistule. Cette anecdote a peut-être été inventée mais elle montre qu'il est bien difficile d'observer cet astre.

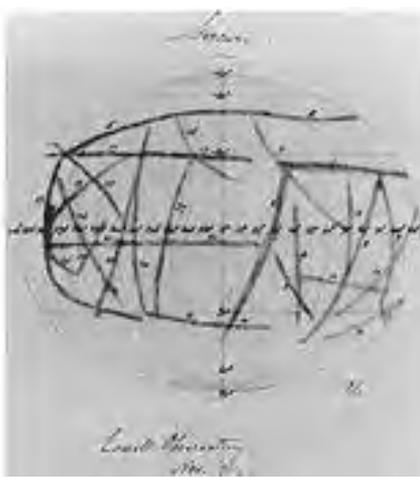
B) Cartographie

À partir d'observations terrestres

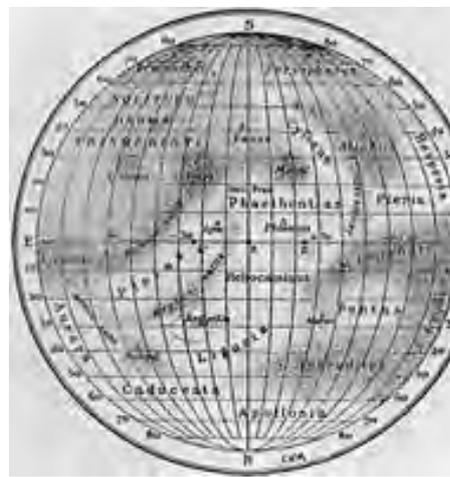
Le premier astronome à avoir discerné des caractéristiques géologiques de Mercure était Johann Hieronymus Schröter qui, vers la fin du XVIII^e siècle, dessina en détail ce qu'il avait pu observer, dont des montagnes pouvant atteindre 19 km de haut. Ses observations furent cependant infirmées par William Herschel qui ne put voir aucune de ces caractéristiques. Par la suite, d'autres astronomes ont dressé des cartes de Mercure, dont l'italien Giovanni Schiaparelli et l'américain Percival Lowell (en 1896) qui y voyaient des zones sombres en formes de lignes, similaires aux canaux de Mars. Schiaparelli et Lowell avaient également esquissé des cartes de Mars en soutenant qu'il y avait des canaux artificiels.



Carte de Giovanni Schiaparelli



Carte de Percival Lowell
(1896)



Carte d'Eugène Antoniadi (1934)

La meilleure carte d'avant Mariner 10 provient du franco-grec Eugène Antoniadi, au début des années 1930. Elle fut utilisée pendant près de 50 ans jusqu'à ce que Mariner 10 nous renvoie les premières photos de la planète. Antoniadi montra que les canaux n'étaient qu'une illusion d'optique. Il reconnut que l'élaboration d'une carte précise de Mercure était impossible à partir d'observations effectuées à l'aube ou au crépuscule, à cause des perturbations atmosphériques (l'épaisseur d'atmosphère terrestre que la lumière doit traverser lorsque Mercure se trouve à l'horizon est importante et crée des distorsions de l'image). Il entreprit alors de faire des observations — dangereuses — en plein jour lorsque le Soleil était bien au-dessus de l'horizon. Il gagna ainsi en netteté, mais perdit en contrastes à cause de la lumière du Soleil. Antoniadi parvint tout de même à achever sa carte en 1934, composée de plaines et de montagnes. Les coordonnées utilisées sur ces cartes ont peu d'importance dans la mesure où elles ont été établies alors qu'on pensait, comme Schiaparelli l'avait affirmé, que la période de rotation de Mercure sur elle-même était la même que la période de révolution autour du Soleil. Il s'agit donc de la face supposée toujours illuminée qui a été cartographiée.

C) Le programme Mariner

Le **programme Mariner** est une série de missions spatiales américaines de la NASA ayant pour objectif d'envoyer des sondes spatiales afin d'étudier les trois planètes intérieures du système solaire, les plus proches de la Terre. Dix sondes spatiales, de Mariner 1 à Mariner 10, sont lancées entre 1962 et 1973 selon le cas vers Mars, Vénus et Mercure. Ce programme ambitieux est à l'origine de plusieurs premières dans le domaine de l'exploration spatiale : première mise en orbite autour d'une planète autre que la Terre, première utilisation de l'assistance gravitationnelle. Sur le plan scientifique les sondes ont fourni de nombreuses informations sur les planètes intérieures qui ont pu pour la première fois être photographiées : cartographie d'une grande partie de la planète Mars et de 45 % de la planète Mercure, composition de l'atmosphère de Mars et Vénus, mesure des champs magnétiques,... Pour Mars et Vénus les résultats ont radicalement modifié l'image idéalisée de ces planètes que beaucoup jusque là considéraient comme des parentes proches de la Terre. Enfin dans le contexte de la course à l'Espace les réussites du programme Mariner ont contribué à démontrer la supériorité de l'aéronautique américaine sur sa concurrente soviétique malgré les succès remarquables de quelques missions à la même époque. Sur les dix missions lancées, sept furent des succès ce qui représente pour l'époque un score remarquable. Les trois autres furent perdues dans des incidents techniques peu après le décollage. Les sondes Mariner partagent une architecture commune basée sur une partie centrale de forme hexagonale mais les équipements scientifiques installés ont beaucoup varié avec une masse comprise selon le cas entre 202 kg et 559 kg.

a) Les premiers Mariner : points communs et différences

Toutes les sondes Mariner sont basées sur un châssis octogonal en magnésium, contenant l'électronique de bord, sur lequel est fixé l'équipement tel que les systèmes de communication, les systèmes d'imagerie (appareils photos, caméras TV), la propulsion et les sources d'énergies. Le châssis est lui-même conçu pour recevoir huit modules standardisés, un par face, permettant d'héberger les appareils scientifiques et les batteries. L'énergie est fournie par quatre panneaux solaires, sauf pour Mariner 10 et Mariner 1&2 qui n'en ont que deux. De plus, à l'exception des sondes Mariner 2 et 5, toutes sont équipées d'une caméra TV. Les sondes Mariner sont stabilisées 3 axes grâce à des senseurs solaires et un viseur d'étoiles utilisant l'étoile Canopus (*Alpha Carinae*), la deuxième étoile la plus brillante du ciel nocturne. Les sondes Mariner sont conçues à l'origine pour être lancées par la fusée Atlas-Centaur. Les retards accumulés dans la conception de cette dernière imposèrent l'utilisation de la fusée Atlas-Agena, moins puissante, pour les cinq premières missions. Mariner 1&2 dut même être amputée d'une partie de ses équipements scientifiques déjà montés pour réduire son poids.

Mariner 1 & 2

Mariner 1 et 2 diffèrent des autres sondes Mariner en plusieurs points. Elles sont en fait dérivées des sondes Ranger 1 et Ranger 2. Le Programme Ranger et le Programme Mariner sont très liés dans leurs architectures, les premières sondes du Programme Ranger ayant servi de banc d'essai pour le concept Mariner. La réussite de la mission Mariner 2 permet de passer au stade suivant. Techniquement, le châssis de la sonde est plus simple. C'est un hexagone, réduisant de fait le nombre de modules à six. De plus, il y

a une structure sous le châssis, supportant l'antenne haut gain, celle-ci se repliant sous la sonde pour le lancement, et les panneaux solaires. Les réservoirs de carburant sont aussi montés à l'extérieur du châssis.

Évolutions du concept

Les premières sondes à reprendre la conception des Mariner furent Voyager 1 et 2. Bien que rattachées initialement au programme Mariner (Il s'agissait initialement des sondes Mariner 11 et 12), elles furent considérablement modifiées pour s'adapter aux contraintes de l'exploration des planètes Saturne et Jupiter (éloignement, faiblesse de l'éclairage solaire, vitesse nécessaire) et donnèrent naissance à un programme à part entière. Plus tard, les orbiteurs du programme Viking utilisèrent une sonde de type Mariner 9 largement améliorée. Les sondes Magellan (étude de Vénus) et Galileo (étude de Jupiter) ont aussi comme base certaines parties du concept Mariner. Plus récemment, une seconde génération de sondes de type Mariner, appelée Mariner Mark II, fut conçue, bien que le projet fut annulé pour raison budgétaire. Néanmoins, cette seconde génération a malgré tout servi comme base pour la sonde Cassini-Huygens, ou comme inspiration pour New Horizons.

Historique des missions

Les sondes Mariner sont au nombre de dix. Leur lancement a été réalisé entre le 27 juillet 1962 et le 3 novembre 1973. En tout, six missions furent effectuées :

Mariner 1



- Mission : Survol de Venus
- Types de senseurs : Émissions micro-onde et infrarouge, poussières cosmique, plasma solaire et radiations haute énergie, champs magnétiques.
- Statut de la mission : **Échec**
- État de la sonde : Détruite peu après son lancement.

Mariner 1, destinée à survoler Venus, est lancée le 22 juillet 1962. Mais une défaillance dans la trajectoire de la fusée Atlas-Agena contraint l' *Air Force Range Safety Officer* (RSO) à ordonner sa destruction, un peu moins de 5 minutes après son lancement. Une légende veut qu'un simple point mis à la place d'une virgule dans un programme Fortran ait causé la défaillance. En fait, ce bug concernait le Programme Mercury, et fut corrigé avant la moindre conséquence sérieuse. C'est pourtant bien un simple caractère, qui a eu raison de la sonde. Dans une spécification manuscrite, un tiret surmontait une variable pour signifier que la valeur associée devait être lissée dans le temps. Cette notation fut ignorée par le programmeur qui employa la valeur brute. Cela n'aurait pas prêté à conséquence si le capteur d'altitude du lanceur n'était pas tombé en panne, et si le programme erroné au sol n'avait pas pris le relais, menant la fusée dans une trajectoire instable, puis incontrôlable.

Mariner 2



- Mission : Survol de Venus
- Types de senseurs : Émissions micro-onde et infrarouge, poussières cosmique, plasma solaire et radiations haute énergie, champs magnétiques.

- Statut de la mission : **Succès**
- État de la sonde : Abandonnée. Piégée en orbite héliocentrique.

Mariner 2 était la doublure de Mariner 1, et fut rapidement corrigée, puis lancée avec succès le 27 août 1962. Au terme de 3 mois et demi de voyage, elle survole Venus comme prévu, devenant ainsi la première sonde à survoler une planète autre que la Terre, et permit de faire les toutes premières observations de Venus.

Caractéristiques principales des sondes Mariner						
Nom	Date lancement	Lanceur	Objectif	Masse	Autres caractéristiques	Résultats
Mariner 1	22/7/1962	Atlas-Agena B	Survol de Vénus	202,8 kg		Échec du lanceur
Mariner 2	27/8/1962	Atlas-Agena B	Survol de Vénus	202,8 kg	Premier survol de Vénus et d'une planète	Rotation rétrograde lente, températures élevées, absence de champ magnétique, couche épaisse et continue de nuages.
Mariner 3	5/11/1964	Atlas-Agena D	Survol de Mars	260,8 kg		Échec du lanceur
Mariner 4	28/11/1964	Atlas-Agena D	Survol de Mars	260,68 kg	Premier survol de Mars	Photos de la surface de Mars, pression atmosphérique et température au sol, champ magnétique
Mariner 5	14/6/1967	Atlas-Agena D	Survol de Vénus	244,9 kg		Pression atmosphérique, température, dimensions de la planète, composition chimique de l'atmosphère.
Mariner 6	24/2/1969	Atlas-Centaur	Survol de Mars	411,8 kg		Photos de 20 % de la surface, composition de l'atmosphère, composition de la calotte polaire sud, forme et masse de Mars
Mariner 7	27/3/1969	Atlas-Centaur	Survol de Mars	411,8 kg		cf Mariner 6
Mariner 8	9/5/1971	Atlas-Centaur	Orbiteur martien	558,8 kg		Échec de l'étage Centaur
Mariner 9	30/5/1971	Atlas-Centaur	Orbiteur martien	558,8 kg	Première sonde à se placer en orbite autour d'une autre planète	Couverture photo détaillée de la planète, observation des tempêtes de poussière
Mariner 10	3/11/1973	Atlas-Centaur	Survol de Mercure	473,9 kg	Premier survol de Mercure, première utilisation de l'assistance gravitationnelle	Photos du sol de Mercure, champ magnétique

Mariner 3



- Mission : Survol de Mars
- Types de senseurs : Caméra avec enregistreur digital (20 images), Émissions micro-onde et infrarouge, poussières cosmique, plasma solaire, radiations, champs magnétiques, occultation radio et mécanique céleste.
- Statut de la mission : **Échec**
- État de la sonde : Inopérante. Piégée en orbite héliocentrique.

Lors du lancement de Mariner 3, un défaut de conception fit que la coiffe surmontant la sonde ne se sépara pas de la sonde comme prévu. Les panneaux solaires ne pouvant se déployer, ni recevoir de lumière, la sonde tourna sur ses batteries jusqu'à épuisement. Elle est maintenant en orbite héliocentrique, toujours surmontée de sa coiffe.

Mariner 4



- Mission : Survol de Mars
- Types de senseurs : Caméra avec enregistreur digital (20 images), Émissions micro-onde et infrarouge, poussières cosmique, plasma solaire, radiations, champs magnétiques, occultation radio et mécanique céleste.
- Statut de la mission : **Succès**
- État de la sonde : Inconnu. Contact radio perdu après un bombardement de micrométéorites.

Après la perte de sa sœur jumelle, Mariner 4 fut corrigée puis lancée avec succès, en seulement trois semaines, le 28 novembre 1964. Les 14 et 15 juillet 1965, la sonde survola Mars comme prévu et prit 22 clichés historiques, toutes premières images jamais réalisées de Mars. Ces images mirent fin à presque toutes les théories de l'époque en révélant une surface plus lunaire que terrestre, aucune étendue d'eau et une faible atmosphère. Après le survol, qui dura 25 minutes, la sonde continua sa route, tout en transmettant des informations scientifiques sur son environnement. Elle termina sa mission le 21 décembre 1967, après avoir subi un bombardement de micrométéorites qui la mit hors service.

Mariner 5



- Mission : Survol de Venus
- Types de senseurs : Photomètre à ultraviolets, poussières cosmiques, plasma solaire, radiations, champs magnétiques, occultation radio et mécanique céleste.
- Statut de la mission : **Succès**
- État de la sonde : Abandonnée. Piégée en orbite héliocentrique.

Mariner 5 était à l'origine une doublure pour Mariner 4. Mais après le succès éclatant de cette dernière, il fut décidé de profiter de cette sonde supplémentaire pour étudier Venus. Après quelques modifications pour l'adapter à ce nouvel environnement, elle fut lancée avec succès le 14 juin 1967. Elle survola Venus comme prévu, et permit de récolter des informations bien plus précises que Mariner 2. L'occultation radio permit aussi de mieux comprendre les relevés de température et de pression faits peu de temps avant par Venera 4, ce qui permit de confirmer définitivement l'environnement extrême de Venus.

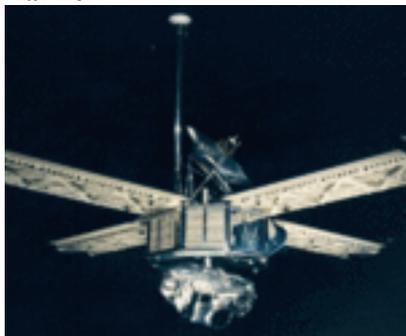
Mariner 6



- Mission : Survol de Mars
- Types de senseurs : Caméras grand et moyen angle avec enregistreur digital, spectromètre infrarouge, Radiomètre, spectromètre à ultraviolets, occultation radio et mécanique céleste.
- Statut de la mission : **Succès**
- État de la sonde : Abandonnée. Piégée en orbite héliocentrique.

Mariner 6 était en fait une mission double, en étant accompagnée par sa jumelle Mariner 7. C'est la première fois qu'une mission double est tentée et réussie. Le but était de profiter des résultats de la première sonde pour diriger la seconde, quelques semaines plus tard. Et, au pire, d'avoir malgré tout des résultats en cas d'accident sur l'une des deux sondes. Lancée le 24 février 1969, elle a réussi à prendre 75 photos de Mars lors de son survol.

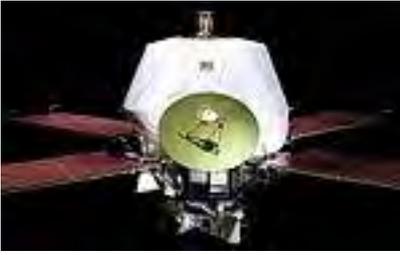
Mariner 7



- Mission : Survol de Mars
- Types de senseurs : Caméras grand et moyen angle avec enregistreur digital, spectromètre infrarouge, Radiomètre, spectromètre à ultraviolets, occultation radio et mécanique céleste.
- Statut de la mission : **Succès**
- État de la sonde : Abandonnée. Piégée en orbite héliocentrique.

Mariner 7, lancée le 27 mars 1969, suivit de près sa partenaire de mission, Mariner 6, en ayant les mêmes objectifs que cette dernière. Par contre, si sa partenaire fit un voyage sans incidents notables, Mariner 7 subit une avarie environ une semaine avant le survol de Mars. En effet, une de ses batteries explosa, déviant la sonde de sa trajectoire à cause d'une fuite de gaz, et coupant son antenne haut gain. Heureusement, cette dernière put être remise en fonctionnement, et la trajectoire corrigée. La mission fut donc un succès, fournissant même plus de données scientifiques que sa partenaire.

Mariner 8



- Mission : Survol de Mars
- Types de senseurs : Caméras grand et moyen angle avec enregistreur digital, spectromètre infrarouge, Radiomètre, spectromètre à ultraviolets, occultation radio et mécanique céleste.
- Statut de la mission : **Échec**
- État de la sonde : Détruite lors du lancement.

Après la réussite de la double mission vers Mars, la NASA décida de retenter l'expérience. Mariner 8 était la première, et devait être suivie de près par sa partenaire, Mariner 9.

Malheureusement, un problème technique sur sa fusée Atlas-Centaur fit qu'elle retomba dans l'atmosphère quelques minutes seulement après le décollage, le 9 mai 1971. Elle terminera sa chute dans l'océan Pacifique.

Mariner 9



- Mission : Survol de Mars
- Types de senseurs : Caméras grand et moyen angle avec enregistreur digital, spectromètre infrarouge, Radiomètre, spectromètre à ultraviolets, occultation radio et mécanique céleste.
- Statut de la mission : **Succès**
- État de la sonde : Arrêtée. En orbite autour de Mars jusqu'à sa rentrée dans l'atmosphère en 2022.

Bien que lancée par la même fusée que Mariner 8, Mariner 9 qui avait un plan de mission totalement indépendant de sa sonde jumelle, put mener à bien sa propre mission. Après avoir été lancée avec succès le 30 mai 1971, elle finit par atteindre Mars comme prévu. Sa mission était de compléter les études et mesures réalisées par le couple de sondes précédent, tout en étant la première sonde à se mettre en orbite autour d'une planète autre que la Terre, permettant une étude longue et poussée de cette dernière. Avec l'épuisement de ses réserves de carburant, il devint impossible de contrôler son altitude, et elle fut donc abandonnée sur une orbite qui la fera plonger dans l'atmosphère de Mars vers 2022.

b) Mariner 10



- Mission : Surlvol de Venus et Mercure
- Types de senseurs : Deux caméras moyen angle avec enregistreur digital, radiomètre infrarouge, Plasma solaire, particules chargées, champs magnétiques, spectromètre à ultraviolets, occultation radio et mécanique céleste.
- Statut de la mission : **Succès**
- État de la sonde : Abandonnée. Piégée en orbite héliocentrique.

Mariner 10 est lancée le 3 novembre 1973, soit environ deux ans après la sonde Mariner 9, pour étudier les planètes Vénus et Mercure, et étudier les caractéristiques de l'espace interplanétaire. Mariner 10 est la première sonde à avoir effectué un survol de la planète Mercure; celle-ci ne sera à nouveau visitée que 33 ans plus tard par la sonde Messenger le 14 janvier 2008. Mariner 10 est la première sonde à avoir utilisé l'assistance gravitationnelle d'une planète pour modifier sa trajectoire, se servant de l'attraction gravitationnelle engendrée par Vénus pour se propulser vers Mercure. Cette technique est depuis fréquemment utilisée afin d'économiser la quantité de carburant emportée pour les missions interplanétaires. Mariner 10 est également la première sonde à exploiter le principe de la voile solaire. Le système de contrôle d'attitude de la sonde eut une défaillance en cours de mission. Les ingénieurs décidèrent alors d'utiliser la pression des photons sur les panneaux solaires pour maintenir l'orientation de la sonde en limitant ainsi la quantité de carburant qui aurait été nécessaire pour permettre aux propulseurs d'effectuer les corrections d'orientation nécessaires. À l'origine, Mariner 10 devait survoler Vénus et étudier son atmosphère (composition, structure, pression) et ses nuages, mais lors de la planification de sa trajectoire, les ingénieurs de la NASA se sont rendu compte qu'avec quelques ajustements, la sonde pourrait atteindre Mercure.

i) Contexte

Mariner 10 est la dernière sonde du programme Mariner consacrée à l'exploration des planètes intérieures du système solaire dont la première mission, Mariner 1, est lancée en 1962. Ce programme est suivi par le programme Voyager dédié à l'exploration des planètes externes du système solaire. La mission Mariner 10 doit son existence aux progrès effectués dans le domaine de la mécanique spatiale et plus particulièrement dans celui de l'assistance gravitationnelle. Celle-ci permet à une sonde de modifier sa vitesse et sa trajectoire sans consommer de carburant en effectuant un survol à faible distance d'une planète. Ce concept, évoqué dans la littérature des années 1920-1930, est pris en considération à partir des années 1950. Son utilisation fait pour la première fois l'objet d'une étude détaillée au début des années 1960 par le JPL pour une mission aller-retour entre la Terre Et Vénus. Le JPL met au point à l'époque des outils mathématiques permettant d'identifier des trajectoires exploitant l'assistance gravitationnelle qui sont ensuite convertis en programmes informatiques. Les chercheurs du JPL découvrent ainsi l'existence de deux opportunités de mission Terre-Vénus-Mercure exploitant l'assistance gravitationnelle en 1970 et 1973. Des plans détaillés et une stratégie de navigation sont définis pour la fenêtre de lancement de 1970. Début 1970 Guiseppe Colombo de l'Institut de Mécanique Appliquée de Padoue (Italie), invité au JPL dans le cadre d'une conférence sur une éventuelle mission Terre-Vénus-Mercure en 1973, fait observer que la périodicité de l'orbite du vaisseau spatial après son survol de Mercure serait presque exactement le double de la périodicité de Mercure ce qui permettrait un deuxième survol. Cette hypothèse est confirmée par la suite par le JPL. En juin 1968 le Bureau des Sciences Spatiales de l'Académie Nationale des Sciences produit un rapport sur les missions d'exploration du système solaire qui recommande l'envoi d'une mission vers Mercure tout en suggérant certains des équipements scientifiques à embarquer. La NASA prend en compte les conclusions de ce rapport et décide en 1969 de programmer la mission de 1973. Un comité de scientifiques est constitué par la NASA pour définir des objectifs scientifiques pertinents et sélectionner les instruments embarqués. La structure projet est mise en place en janvier 1970 au JPL. En juillet 1971, Boeing est sélectionné pour la conception et la fabrication de deux exemplaires de la sonde dont un doit être utilisé pour effectuer les tests.

ii) Caractéristiques techniques

La sonde Mariner 10 a une masse de 533,6 kg au lancement dont 29 kg d'hydrazine utilisée par les propulseurs chargées des corrections de trajectoire et 78 kg d'instruments scientifiques. Les caractéristiques de Mariner 10 sont en grande partie communes avec celles des sondes spatiales du programme Mariner qui l'ont précédé : forme octogonale de la plateforme, panneaux solaires et batterie, senseurs solaire et stellaire, système de télécommunications en bande S, télémétrie, l'antenne grand gain

et les deux antennes faible gain, support mobile permettant d'orienter les instruments scientifiques et système de propulsion utilisant de l'hydrazine pour effectuer les corrections de trajectoire. Des modifications ont été apportées pour permettre à la sonde de résister à l'intensité du rayonnement solaire qu'elle doit subir au cours de sa mission vers Mercure. Pour maintenir la température dans des limites acceptables, la sonde dispose d'un pare-soleil, de protections thermiques renforcées; l'orientation de ses panneaux solaires peut être modifiée pour permettre de maintenir leur température en dessous de 115 °C. Le débit du système de télécommunications est renforcé et permet de transmettre 118 kilobits d'images par seconde.

iii) Instruments scientifiques embarqués

La sonde emporte 6 types d'instrument scientifique auxquels s'ajoute le système de télécommunication mis à contribution pour mesurer le champ de gravité :

- Un radiomètre infrarouge utilisé pour mesurer les températures à la surface de Mercure et celle des nuages de Vénus. L'instrument est une version modifiée d'un radiomètre embarqué sur les missions Mariner de 1969 et 1971,
- Un détecteur de plasma utilisé pour mesurer la vitesse et la distribution du vent solaire au voisinage de Mercure et dans la zone du système solaire située en deçà de l'orbite de Vénus,
- Un magnétomètre avec deux capteurs 3 axes montés sur une perche de 6,1 mètres de long pour mesurer le champ magnétique des planètes et dans le milieu interplanétaire,
- Un système de mesure des particules destiné à mesurer l'impact des rayons cosmiques d'origine galactique sur l'héliosphère. L'instrument comporte un télescope chargé d'observer les particules à basse énergie (protons de 0,9 à 9 MeV et rayons alpha de 1,6 à 25 MeV) et les particules à haute énergie (électrons de 200 KeV à 30 MeV, protons de plus de 0,55 MeV et rayons alpha de plus de 40 MeV),
- Un spectromètre ultraviolet extrême,
- Deux caméras,
- Le système de télécommunications était utilisé pour mesurer la masse et le champ de gravité des planètes.

iv) Déroulement de la mission

La sonde est lancée le 3 novembre 1973 par un lanceur Atlas-Centaur.

Survol de Vénus

Mariner 10 survole Vénus le 5 février 1974 à 5 794 km d'altitude avant de se diriger vers Mercure. Durant son transit entre les planètes, la sonde étudie l'environnement interplanétaire en prenant des mesures sur les vents solaires et les champs magnétiques. Trois survols de Mercure sont ensuite effectués.

Premier survol de Mercure

Le premier survol, le 29 mars 1974, est un passage à 703 km d'altitude qui permet de découvrir que Mercure possède un champ magnétique, alors que les scientifiques pensaient qu'il n'en existait pas, et qu'elle comporte une atmosphère très ténue (exosphère). La faible densité de la croûte est également remarquée. Les premières photos détaillées de la surface de la planète qui sont prises dévoilèrent une surface couverte de cratères, à l'apparence très proche celle de la Lune. 2 300 photographies en moyenne (3–20 km/pixel) et haute résolution (moins d'1 km/pixel) sont prises lors de ce premier passage.

Deuxième survol de Mercure

Le deuxième survol, le 21 septembre 1974 est effectué à 48 069 km d'altitude et permet de cartographier environ 45 % de la surface de la planète. Seules 750 nouvelles photos de la planète ont pu être prises, à cause d'un problème technique avec l'enregistreur embarqué.

Troisième survol de Mercure

Enfin, le dernier survol, le 16 mars 1975, à 327 km d'altitude, a pour objectif d'étudier de manière détaillée le champ magnétique de Mercure. Les scientifiques découvrent qu'il ne s'agit pas d'une conséquence des vents solaires, mais qu'il est généré par la planète elle-même. L'origine de ce champ reste à l'issue de cette mission une question majeure qui doit être tranchée par les futures missions spatiales vers Mercure. Ce dernier survol permet la prise de 450 photos en haute résolution.

Fin de la mission

Le 25 mars 1975, Mariner 10 ne dispose plus de carburant pour pouvoir manœuvrer. Les scientifiques décident alors de clore la mission. Seule 45 % de la surface de Mercure a pu être cartographiée, car à chacun des trois survols, Mercure présentait la même face au Soleil. Mariner 10 aura rapporté près de 8 000 photographies dont 4 000 de Vénus et 3 500 de Mercure ainsi que quelques centaines de photographies de la Lune et de la Terre (réalisées une douzaine d'heures après le décollage pour calibrer les instruments).

v) Résultats scientifiques

Mariner 10 a apporté une contribution importante à notre connaissance de la partie du système solaire occupée par les planètes internes (Mars, Terre, Vénus, Mercure). Lorsque la sonde est lancée le programme spatial a déjà permis des avancées importantes dans le domaine : le programme Apollo, en ramenant des échantillons du sol lunaire, a permis de dater du matériel planétaire antérieur à ce qui avait été découvert sur la Terre; Mariner 9 a effectué un relevé complet de la planète Mars et découvert avec ses prédécesseurs des formations géologiques surprenantes ainsi qu'une surface constituée en partie de matériaux d'origine et en partie façonnée par le volcanisme; de nombreuses sondes russes et américaines ont étudié Vénus et permis d'acquérir une bonne connaissance générale sur sa topographie et son atmosphère tout en laissant dans l'ombre les caractéristiques de sa structure interne ainsi que son histoire géologique. On ne dispose à l'époque du lancement de Mariner 10 d'aucune donnée précise sur la topographie et les caractéristiques de Mercure. La contribution de Mariner 10 à l'étude de Vénus est modeste mais significative. La sonde a mis en évidence, à l'aide de son spectromètre ultraviolet, que la couche supérieure de l'atmosphère vénusienne faisait le tour de la planète en 4 jours c'est-à-dire bien plus rapidement que la planète elle-même. Mais la principale contribution de Mariner 10 concerne la planète Mercure. Une des principales découvertes porte sur l'identification du champ magnétique de la planète. L'existence de celui-ci était complètement inattendue car la présence d'un champ magnétique est associé à une vitesse de rotation rapide et un noyau liquide. Or Mercure a une vitesse de rotation lente et sa surface, à l'apparence très lunaire donc très ancienne, ne donne pas l'impression d'un noyau actif qui se traduit généralement par des épanchements volcaniques périodiques en surface. Les photographies de la surface de Mercure ont par ailleurs permis d'élaborer des théories sur le processus de formation des planètes intérieures.



Vénus, photographiée par Mariner 10



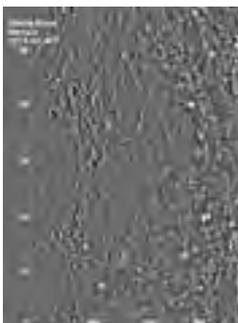
Mercure en vraies couleurs



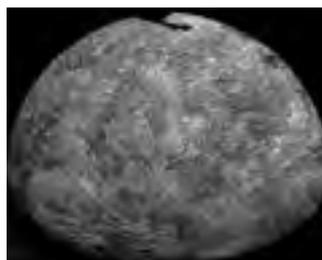
Mercure en fausses couleurs



L'escarpement Discovery Scarp



Le bassin Caloris



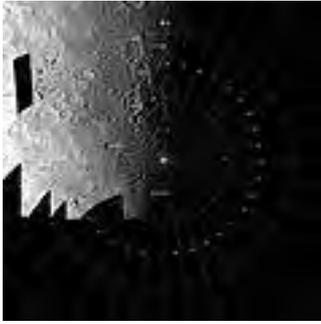
Hémisphère Sud de Mercure



Quadrangle Victoria (Aurora)



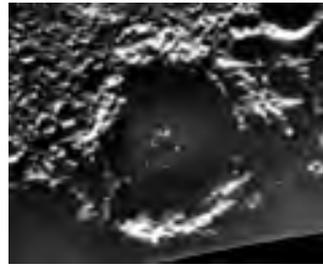
Quadrangle Bach (Australia)



*Quadrangle Borealis
(Borea)*



*Quadrangle
Shakespeare
(Caduceata)*



Cratère Chao Meng-Fu



Cratère Zola

vi) **Mariner 11 et 12**

La NASA avait planifié un sous-programme ambitieux au programme Mariner. Si ce dernier avait comme but l'étude de Mars et Vénus, puis involontairement de Mercure, ce sous-programme devait étudier Jupiter et Saturne. Ce sous-programme spécifique fut nommé temporairement *Mariner Jupiter-Saturn 1977 program*. De par la position éloignée des deux géantes gazeuses, et leur nature, de nombreuses questions techniques doivent trouver une réponse :

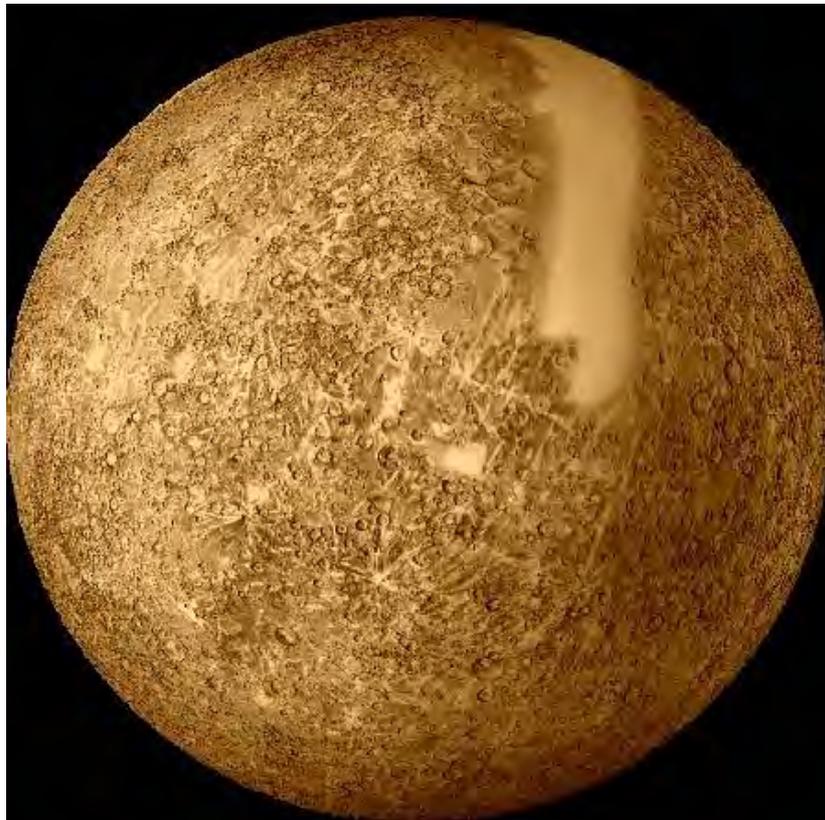
- Comment obtenir une précision suffisante de la trajectoire ?
- La ceinture d'astéroïdes est-elle dangereuse ?
- Comment utiliser l'assistance gravitationnelle alors que de nombreuses lunes sont présentes autour des planètes ?
- Des panneaux solaires seront-ils suffisants pour assurer l'énergie des sondes ?

Toutes ces questions trouvèrent une réponse, mais rapidement les adaptations et modifications nécessaires devinrent trop importantes, s'éloignant de plus en plus de la base du programme Mariner. La NASA finit alors par séparer complètement les deux programmes. Enfin, en 1977 le *Mariner Jupiter-Saturn program* fut renommé en Programme Voyager, jugé plus communicant.

vii) **Depuis Mariner 10**

En 1974–75, Mariner 10 rapporta des photographies en haute résolution permettant la cartographie d'environ 40–45 % de sa surface, révélant les détails topographiques jamais vus auparavant : une surface recouverte de cratères avec des montagnes et des plaines, et très ressemblante à celle de la Lune. Il a d'ailleurs été assez difficile de faire une corrélation entre les caractéristiques photographiées par la sonde et les cartes établies par télescope. Certaines des manifestations géologiques de la carte d'Antoniadi se sont révélées inexistantes. L'Union Astronomique Internationale a défini en 1970 le méridien 0° comme étant le méridien solaire au premier périhélie après le 1^{er} janvier 1950. Le système de coordonnées utilisé par Mariner 10 se fonde sur le méridien 20° qui coupe le cratère Hun Kal (Hun Kal signifie « 20 » en maya), ce qui donne une légère erreur de moins de 0,5° par rapport au méridien 0° défini par l'UAI. Le cratère Hun Kal est en quelque sorte le Greenwich de Mercure. L'équateur se trouve dans le plan de l'orbite de Mercure. Les longitudes sont mesurées de 0° à 360° en allant vers l'ouest.

Mercure est découpée en 15 quadrangles. Plusieurs méthodes de projection ont été utilisées pour cartographier la surface de Mercure, suivant la position du quadrangle sur le globe. Cinq projections Mercator (projection cylindrique tangente à l'équateur) entourant la planète au niveau de l'équateur, entre les latitudes 25° nord et 25° sud; quatre projections Lambert (projection conique) entre 20° et 70° de latitude pour chaque hémisphère; et deux projections stéréographiques pour cartographier les pôles (jusqu'à 65° de latitude). Chaque quadrangle commence par la lettre H (pour « Hermès »), suivie de son numéro (de 1, pôle Nord, à 15, pôle Sud).



Mosaïque de Mercure prise par Mariner 10 – La bande claire en haut n’a pas été cartographiée

Leur nom provient d'une caractéristique importante présente sur leur région (bassin, cratère, etc.) et un nom d'albédo (entre parenthèses) leur est attribué. Les noms d'albédos assignés pour cette nouvelle carte proviennent de celle d'Antoniadi, puisque c'était celle utilisée jusque-là par tous les observateurs depuis plusieurs décennies. Ils servent pour repérer les quadrangles lors des observations au télescope depuis la Terre, où l'on ne distingue que les variations d'intensité de lumière. Seuls Lowell et Antoniadi avaient annoté leurs cartes. Les quadrangles non cartographiés ne possèdent que leur nom d'albédo.

Quadrangles de Mercure			
Quadrangle	Nom	Projection	Longitudes
H-1	Borealis (Borea)	Stéréographique	pôle Nord
H-2	Victoria (Aurora)	Lambert	0° à 90°
H-3	Shakespeare (Caduceata)	Lambert	90° à 180°
H-4	<i>Non cartographié</i> (Liguria)	Lambert	180° à 270°
H-5	<i>Non cartographié</i> (Apollonia)	Lambert	270° à 360°
H-6	Kuiper (Tricrena)	Mercator	0° à 72°
H-7	Beethoven (Solitudo Lycaonis)	Mercator	72° à 144°
H-8	Tolstoj (Phaethontias)	Mercator	144° à 216°
H-9	<i>Non cartographié</i> (Solitudo Criophori)	Mercator	216° à 288°
H-10	<i>Non cartographié</i> (Pieria)	Mercator	288° à 360°
H-11	Discovery (Solitudo Hermae Trismegisti)	Lambert	0° à 90°
H-12	Michelangelo (Solitudo Promethei)	Lambert	90° à 180°
H-13	<i>Non cartographié</i> (Solitudo Persephones)	Lambert	180° à 270°
H-14	<i>Non cartographié</i> (Cyllene)	Lambert	270° à 360°
H-15	Bach (Australia)	Stéréographique	pôle Sud

Exploration robotisée

Avant d'y envoyer des sondes, on ne connaissait que peu de choses de Mercure. Jusqu'à l'arrivée de la sonde Messenger en janvier 2008, seule la sonde Mariner 10 avait survolé Mercure (en 1974) : c'est à elle que l'on doit une grande partie de ce que l'on connaît de cette planète. La mission actuellement en cours (Messenger), et une autre en préparation devraient nous apporter plus d'informations sur Mercure dans les années à venir.

Tableau récapitulatif des dernières missions vers Mercure (et future)			
Sonde	Évènement	Date	Agence spatiale
Mariner 10	Lancement	novembre 1973	NASA
	Premier survol	mars 1974	
	Second survol	septembre 1974	
	Troisième survol	mars 1975	
MESSENGER	Lancement	août 2004	NASA
	Premier survol	effectué le 14 janvier 2008	
	Second survol	effectué le 6 octobre 2008	
	Troisième survol	effectué le 30 septembre 2009	
	Mise en orbite	effectué le 18 mars 2011 à 1h UTC	
BepiColombo	Lancement	planifié pour 2015	ESA/JAXA
	Mise en orbite	planifiée pour 2022	

D) Messenger

MESSENGER (en anglais *Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry and Ranging*, soit en français « Surface, environnement spatial, géochimie et télémétrie de Mercure ») est une mission d'étude de la planète Mercure de l'agence spatiale américaine NASA. La sonde spatiale, lancée en 2004, se place en orbite autour de la planète le 18 mars 2011. L'objectif de la mission est d'effectuer une cartographie complète de la planète, d'étudier la composition chimique de sa surface et de son exosphère, son histoire géologique, sa magnétosphère, la taille et les caractéristiques de son noyau ainsi que l'origine de son champ magnétique. Mercure, planète la plus proche du Soleil, est quasiment inexplorée : MESSENGER n'a été précédée que par la sonde Mariner 10 qui a survolé la planète à trois reprises en 1974 et 1975. Les données que la mission a collectées doivent contribuer à affiner la connaissance des mécanismes de formation et d'évolution du Système solaire.

La mise en orbite d'une sonde autour de Mercure nécessite, en vol direct, de pouvoir réduire la vitesse orbitale de la sonde de 13 km/s. Aussi, jusqu'à l'arrivée de MESSENGER, aucune sonde n'a été placée en orbite autour de Mercure. Les progrès réalisés dans le domaine de la mécanique spatiale dans les années 1980 et 1990 ont permis de mettre au point des trajectoires balistiques et indirectes exploitant l'assistance gravitationnelle des planètes qui permettent de placer une sonde en orbite autour de Mercure en ayant recours à des phases propulsives limitées.

Durant son transit de sept ans vers la planète, MESSENGER a effectué ainsi six survols rapprochés des planètes intérieures (la Terre, Vénus à deux reprises et Mercure à trois reprises) avec quelques corrections de trajectoire intermédiaires, ce qui lui a permis de limiter la masse de carburant embarqué par la sonde à un peu plus de 50 % de sa masse totale. MESSENGER, sélectionnée en 1999, est la septième mission du programme Discovery. Celui-ci rassemble des projets d'exploration du système solaire à coût modéré et durée de développement courte. La sonde, dont la masse, ergols compris, est de 1,1 tonne, emporte sept instruments scientifiques dont plusieurs spectromètres, un altimètre laser, un magnétomètre et des caméras. Les spécifications techniques de la sonde et l'orbite retenue pour la partie scientifique de la mission sont largement dictées par les températures qui peuvent atteindre 350 °C. La sonde doit effectuer ses relevés depuis une orbite polaire fortement elliptique de 200 km × 15 000 km. Les instruments de la sonde spatiale ont fourni un grand nombre d'informations scientifiques : la couverture photographique de la planète, désormais complète, a révélé des formations qui n'ont jusqu'à présent pas trouvé d'explications;

plusieurs découvertes inattendues sur la composition du sol de Mercure ont été effectuées tandis que le champ magnétique mesuré a confirmé la présence d'un noyau partiellement liquide. De la glace d'eau a été détecté dans les régions polaires plongées en permanence dans l'ombre. La durée de la mission fixée initialement a été prolongée jusqu'en mars 2015 sur une orbite plus rapprochée permettant à la sonde d'allonger le temps d'observation de ses instruments.

a) Contexte

Historique

La seule sonde spatiale à avoir approché Mercure avant MESSENGER est Mariner 10 qui l'a survolé à trois reprises en 1974 et 1975. Cette sonde, lancée le 3 novembre 1973 en direction de Vénus, a utilisé pour la première fois l'assistance gravitationnelle d'une planète (Vénus) pour atteindre Mercure dont le survol n'était pas prévu au lancement. Équipée d'une caméra, d'un magnétomètre et de plusieurs spectromètres Mariner 10 a permis notamment la découverte d'un champ magnétique significatif et de la forte densité de la planète révélatrice d'un noyau ferreux de grande taille. Les télescopes terrestres les plus puissants n'avaient pas permis d'obtenir des images de qualité de la surface du fait de la proximité de l'alignement avec le Soleil. Les photos prises par Mariner 10 ont permis de cartographier près de 45 % de la surface de la planète avec une résolution d'environ 1 km et révéler une surface ancienne couverte de cratères à l'apparence très proche de celle de la Lune. Aucune mission ne s'est depuis rendue sur Mercure. En effet la mise en orbite autour de la planète d'une sonde spatiale nécessite de faire face à deux difficultés que seules des évolutions relativement récentes de la technique astronautique ont permis de surmonter. Pour se placer en orbite autour de Mercure en suivant une trajectoire directe, une sonde lancée depuis la Terre doit, en vol direct (orbite de Hohmann) réduire sa vitesse orbitale de 13 km/s sans compter l'énergie nécessaire pour se placer dans le plan orbital de Mercure qui est incliné de 7° par rapport à l'écliptique. Le recours à une trajectoire directe est donc particulièrement coûteux.

Au milieu des années 1980 les progrès dans le domaine de la mécanique spatiale rendent ce type de mission réalisable à un coût raisonnable grâce à un enchaînement de manœuvres d'assistance gravitationnelle. La proximité du Soleil constitue la deuxième difficulté d'une mission vers Mercure : une sonde orbitant autour de la planète reçoit onze fois plus d'énergie du Soleil que lorsqu'elle se situe sur une orbite terrestre et le sol de Mercure sur sa face éclairée réfléchit une grande partie de la chaleur qu'il reçoit du Soleil accroissant les contraintes thermiques subies par un engin croisant à basse altitude. À la fin des années 1980, un groupe de travail formé de scientifiques étudie à la demande de la NASA une mission orbitale vers Mercure. Le scénario retenu comporte deux sondes lancées par une fusée Titan IV-Centaur et utilisant à plusieurs reprises l'assistance gravitationnelle pour atteindre Mercure après un transit de quatre ans. Les deux sondes identiques ont une masse sèche de 1 tonne et emportent 1,6 tonnes de carburant et 100 kg d'instruments scientifiques consommant environ 100 watts. Les deux sondes doivent être injectées sur des orbites de 12 heures avec un périhélie à 200 km situé pour l'une au niveau du pôle nord et pour l'autre au niveau de l'équateur. Durant la première moitié de la mission d'une durée d'un an les sondes qui circulent avec des inclinaisons écartées de 60° se concentrent sur l'étude de la magnétosphère puis se rejoignent sur une inclinaison pour l'étude de la surface de la planète. Aucune suite n'est donnée à cette étude.

MESSENGER, septième mission du programme Discovery

Le lancement par la NASA en 1992 du programme Discovery dont l'objectif est la mise sur pied de missions scientifiques à coût modéré permettant un rythme de lancement rapide, ouvre de nouvelles opportunités pour les projets d'exploration du système solaire. Pour le premier appel à candidatures de 1994, deux propositions de mission sur 28 ont pour thème l'exploration de Mercure mais ce sont les missions CONTOUR, Genesis, Stardust et Lunar Prospector qui sont pré-sélectionnées. Pour l'appel à candidatures suivant, en décembre 1996, une mission vers Mercure passe le stade des pré-sélections mais n'est finalement pas retenue. Le même scénario de mission vers Mercure est de nouveau proposé pour l'appel à idées de juin 1998 avec quelques changements dans la charge utile scientifique embarquée : ce projet réussit à franchir les étapes de sélection et est désigné comme la septième mission du programme Discovery. Le lancement est prévu pour mars 2004 avec une fenêtre de lancement de secours en août 2004. Le coût de la mission est alors estimé à 286 millions \$. Le laboratoire APL de l'Université Johns-Hopkins est retenu pour la construction de la sonde spatiale. Le responsable scientifique de la mission est

Sean C. Solomon du Carnegie Institution of Washington. Contrairement à Mariner 10 qui n'a fait que survoler la planète avec des temps d'observation très courts, MESSENGER doit se placer en orbite autour de Mercure et recueillir des données durant au moins un an. La sonde emporte une instrumentation scientifique plus diversifiée et offrant des performances sans commune mesure avec celle de son prédécesseur : ainsi la résolution d'une de ses caméras est 100 fois meilleure que celle de Mariner 10. Le nom retenu pour la sonde, MESSENGER, fait référence au fait que Mercure était le messager (*messenger* en anglais) des dieux dans la mythologie romaine.

b) Les choix d'architecture de la mission

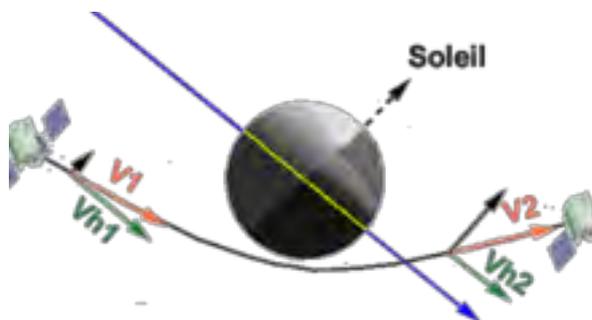


Schéma 1 Assistance gravitationnelle : $V1$ = vitesse de la sonde avant le survol de la planète, $V2$ = Après le survol, $Vh1$ = vitesse orbitale par rapport au Soleil avant le survol de la planète, $Vh2$ = après le survol

Comme toutes les missions du programme Discovery, MESSENGER doit obligatoirement utiliser pour des raisons de coût le lanceur Delta, dont la version la plus puissante 7925 H permet de placer 1,1 tonne sur une trajectoire interplanétaire. La capacité d'emport en carburant est donc limitée et pour parvenir à décélérer suffisamment la sonde a recours à six reprises à l'assistance gravitationnelle d'une planète. Cette manœuvre (cf. *schéma ci-dessus*) consiste à survoler une planète à faible altitude et sous un angle prédéterminé. Sous l'influence du champ de gravité de la planète, le vecteur vitesse de la sonde ($V1$ et $V2$ sur le *schéma 1*) subit une rotation tout en conservant la même magnitude. Toutefois la vitesse orbitale par rapport au Soleil ($Vh1$ et $Vh2$ sur le *schéma 1*) est modifiée et dans le cas illustré sensiblement réduite : les survols à faible altitude de la Terre, de Vénus à deux reprises et enfin de Mercure à trois reprises permettent tout à la fois de réduire la vitesse, modifier l'orbite et effectuer le changement de plan orbital rendu nécessaire par l'inclinaison de Mercure par rapport à l'écliptique (7°).

La contrepartie de ces manœuvres est une durée de transit particulièrement longue (presque sept ans) entre la Terre et Mercure qui nécessite de s'assurer de la fiabilité des équipements dans la durée en multipliant les redondances. La sonde doit emporter 600 kg de carburant qui sont consommés par les corrections de trajectoire durant le transit entre la Terre et Mercure, l'insertion en orbite autour de Mercure et les modifications de son orbite autour de Mercure. Différentes méthodes ont été utilisées pour limiter la masse à sec restante à ce qu'autorise la capacité du lanceur soit 500 kg, sans sacrifier l'instrumentation scientifique. La structure de la plate-forme, des réservoirs et du pare-soleil, rendu nécessaire par la proximité du Soleil, a recours à des matériaux élaborés permettant d'alléger leur masse tout en garantissant leur rigidité. Pour limiter les coûts, seules les caméras n'ont pas un pointage fixe. L'antenne à grand gain a recours pour la première fois sur une sonde spatiale à la technique de la commande de phase ce qui permet de supprimer un système d'orientation pesant tout en conservant la capacité de modifier l'axe du faisceau radio de plus ou moins 45° . Les panneaux solaires qui doivent supporter des températures qui peuvent atteindre 270°C , incluent des réflecteurs sur les deux tiers de leur surface qui permettent de limiter les contraintes thermiques.

De la sélection au lancement

La phase de conception de MESSENGER débute en janvier 2000 et s'achève en mars 2002 avec la Revue critique de conception (*Critical Design Review*, CDR) qui permet le lancement de la phase de développement. Le début de mission est alors encore planifié pour mars 2004 avec des fenêtres de lancement de substitution situées en mai et juillet/août 2004. L'assemblage et les tests de la structure et du

système de propulsion débutent en février 2003. Durant l'été 2003 on découvre que plusieurs sous-systèmes ne respectent pas le cahier des charges notamment la centrale à inertie et certaines cartes électroniques. Les responsables du projet décident de remplacer les cartes défectueuses au prix d'un glissement de la date de lancement à mai 2004. Puis les tests fonctionnels s'avèrent plus compliqués que prévus car les concepteurs de la sonde ont raffiné les modes de fonctionnement autonomes pour s'assurer que MESSENGER ne sera pas exposée au Soleil plus de quinze minutes en cas de défaillance du système de contrôle d'attitude. En mars 2004, la NASA décide de repousser le lancement en août pour pouvoir mener à bien les tests et éviter des conflits avec d'autres lancements programmés sur la même période. Un lancement à cette date permettait initialement une arrivée sur Mercure en septembre 2009 après un survol de la Terre, deux de Vénus et deux de Mercure. Mais durant la phase de développement MESSENGER a pris du poids et elle n'est plus en mesure de se mettre en orbite de Mercure en suivant cette trajectoire : il faut ajouter un survol de Mercure au plan prévu ce qui repousse l'arrivée à mars 2011.

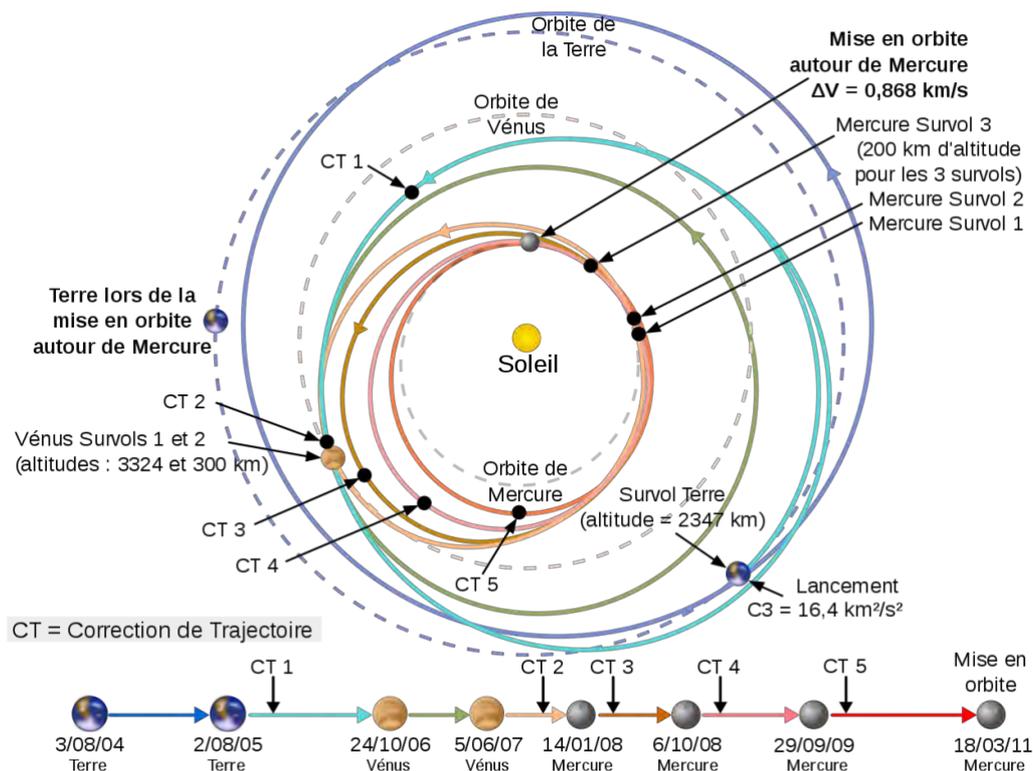


Schéma 2 : trajectoire de MESSENGER

c) Les objectifs scientifiques de la mission



Mercur photographiée par MESSENGER le 14 janvier 2008

Mercure est une des quatre planètes intérieures avec Vénus, la Terre et Mars. Par rapport à ces dernières elle présente des caractéristiques extrêmes : c'est à la fois la plus petite de ces planètes, la plus dense, celle dont la surface est la plus ancienne. Étant la plus proche du Soleil, Mercure est la planète qui présente les contrastes thermiques quotidiens les plus importants. Cette planète a été uniquement survolée à trois reprises par Mariner 10, la dernière fois en 1975, et est donc pratiquement inexplorée. Une bonne connaissance de cette planète, la plus proche du Soleil, est essentielle pour améliorer notre compréhension de la genèse du système solaire et de son évolution.

La mission MESSENGER doit répondre principalement à six questions :

- Les planètes intérieures sont constituées d'un noyau dense riche en fer entouré d'un manteau rocheux composé principalement de silicates ferreux et de magnésium surmonté d'une croûte composée de minéraux moins denses. La densité de chaque planète découle de la taille de son noyau ferreux beaucoup plus dense. Mercure est particulièrement dense ce qui semble indiquer que le noyau est proportionnellement deux fois plus important que sur les autres planètes intérieures et qu'il s'étend sur 75 % du rayon de la planète. Trois théories peuvent expliquer cette composition. L'étude de la composition de la surface de Mercure à l'aide de spectromètres devrait permettre de trancher.
- Mariner 10 n'a photographié que 45 % de la superficie de la planète. MESSENGER devrait réaliser une couverture photographique de 98 % de celle-ci. La surface de Mercure apparaît ancienne et couverte de cratères comme celle de la Lune. Des plaines de formation plus récentes s'étendent entre des cratères plus anciens. Les plaines sont, selon plusieurs indices, d'origine volcanique. Les formations les plus spectaculaires à la surface de la planète sont des falaises arrondies qui atteignent à certains endroits plus d'un kilomètre de haut et s'étirent sur plusieurs centaines de kilomètres de long. Ces reliefs se sont formés, selon les hypothèses actuelles, lorsque Mercure s'est refroidie en se contractant. Les différents instruments embarqués à bord de MESSENGER doivent permettre d'obtenir des images détaillées des formations de surface, préciser la topographie et la composition minéralogique des roches de la surface. Le rapprochement de la topographie et des caractéristiques du champ de gravité de Mercure devraient permettre de reconstruire l'histoire géologique de la planète.
- Mercure est la seule planète intérieure avec la Terre à disposer d'un champ magnétique global et donc d'une magnétosphère. Mariner 10, qui avait détecté ce champ, ne disposait pas d'une instrumentation permettant d'en préciser la force et les caractéristiques détaillées. Ce champ magnétique est sans doute généré par les mouvements d'une fraction du noyau qui subsiste à l'état liquide, mais cette hypothèse reste à confirmer.
- Une partie du noyau de Mercure est liquide mais on ignore dans quelle proportion et pour quelles raisons. Compte tenu du temps écoulé depuis la formation de Mercure un noyau constitué uniquement de fer fondu se serait solidifié du fait de la température de fusion très élevée de ce métal; toutefois la présence d'une faible fraction de soufre (par exemple), qui abaisserait la température de fusion, pourrait expliquer la présence d'un noyau encore en partie liquide. La partie liquide du noyau entraîne un mouvement de libration de Mercure. La mesure de l'amplitude de ce mouvement par l'altimètre laser combiné avec les mesures du champ de gravité doit fournir des données sur la taille et la structure du noyau de Mercure.
- L'axe de rotation de Mercure est pratiquement perpendiculaire au plan orbital de la planète. Aussi le rayonnement solaire est dans les régions polaires pratiquement parallèle au sol. Dans ces conditions il existe à l'intérieur de certains des plus grands cratères de cette région des zones situées en permanence à l'ombre et donc très froides. Il a été constaté que l'intérieur de ces cratères réfléchit fortement les ondes des radars utilisés depuis la Terre. Ces phénomènes de réflexion sont analogues à ceux constatés lors des observations radar de la calotte polaire martienne et des satellites de Jupiter couverts de glace. La présence de glace d'eau stable à faible proximité du Soleil constituerait un phénomène étonnant mais qui reste à confirmer. Toutefois des cratères situés à des latitudes relativement basses (jusqu'à 72°N) réfléchissent de la même manière les ondes radars ce qui semble invalider l'hypothèse de la présence de glace d'eau; mais il n'est toutefois pas impossible que sur des périodes courtes (quelques millions d'années), ces cratères puissent contenir des dépôts de glace résultant d'impacts de comètes. Mais les réflexions radar

pourraient être également liées à d'autres types de matériau : soufre, certains silicates. Le spectromètre à neutron embarqué par MESSENGER devrait permettre de trancher.

- Mercure dispose d'une atmosphère extrêmement ténue par rapport aux autres planètes intérieures : elle est à ce titre qualifiée d'exosphère. Sept éléments chimiques ont été jusqu'à présent identifiés par MESSENGER au cours de ses survols : l'hydrogène, l'hélium, l'oxygène, le sodium, le potassium le calcium et le magnésium. Les éléments composant l'exosphère de Mercure s'échappent de manière constante vers l'espace interplanétaire et sont donc reconstitués par des processus qui sont à identifier. Le vent solaire est une source relativement abondante d'atomes d'hydrogène et d'hélium. Les météorites et les comètes qui s'écrasent sur le sol de la planète ainsi que les roches de surface sont sans doute à l'origine des autres composants. Différents processus peuvent être à l'œuvre. MESSENGER doit déterminer la composition de l'exosphère à l'aide de ses spectromètres. Le rapprochement de ces données avec la composition des roches de surface doit permettre de déterminer les processus de formation de l'exosphère.

d) Caractéristiques techniques de la sonde

Architecture

MESSENGER est une sonde spatiale interplanétaire de 1,1 tonne de relativement petite taille ce qui résulte à la fois de la disposition ramassée de ses composants et de la modestie de son budget. La partie centrale de MESSENGER a la forme d'un parallélépipède allongé (1,27 m × 1,42 m × 1,85 m). Sa structure en graphite / epoxy est constituée de deux panneaux verticaux qui supportent les deux réservoirs de carburant et de deux panneaux verticaux perpendiculaires auxquels est accroché le réservoir de comburant. Un panneau horizontal coiffe ces quatre panneaux et sert de support au propulseur principal (LVA), aux propulseurs auxiliaires et à leurs réservoirs, au réservoir d'hélium, aux viseurs d'étoiles et à la batterie. Un pare-soleil semi-cylindrique entoure la partie de la sonde tournée vers le Soleil. Réalisé dans un tissu en fibre de céramique il est tenu par une armature tubulaire solidaire du bus. Deux panneaux solaires s'articulent latéralement sur la partie centrale de la sonde et débordent latéralement du bouclier thermique. La partie inférieure de la sonde, qui fait face à la planète, lorsqu'elle est en orbite autour de Mercure, abrite cinq des sept instruments scientifiques : certains d'entre eux sont installés au milieu de l'adaptateur utilisé pour fixer MESSENGER à son lanceur. Enfin le mat long de 3,6 mètres qui porte à son extrémité le magnétomètre s'étend à l'opposé de la direction du Soleil.

Production électrique

La puissance électrique est fournie par les panneaux solaires, qui s'étendent au-delà du bouclier thermique et sont orientés de façon à contrôler leur température et la puissance délivrée. MESSENGER dispose en tout de deux panneaux de 1,54 m × 1,75 m qui sont déployés une fois la sonde en orbite. La structure d'un panneau solaire est réalisée en nid d'abeilles d'aluminium de 18 mm d'épaisseur. Les faces avant et arrière sont revêtues d'une couche isolante de kapton. Les panneaux solaires peuvent être soumis à des températures extrêmes de 275 °C durant le séjour en orbite autour de Mercure. Pour permettre de résister à cette température plusieurs dispositifs sont prévus. D'une part les panneaux sont recouverts à 70 % de réflecteurs optiques (OSR) et seulement à 30 % de cellules photovoltaïques AsGa / Ge ce qui permet d'éviter un échauffement excessif. D'autre part lorsque la sonde quitte la Terre, les panneaux solaires sont perpendiculaires au Soleil pour recueillir le maximum d'énergie mais au fur et à mesure de son approche de son objectif les panneaux sont progressivement inclinés par rapport à la direction du Soleil pour maintenir leur température à moins de 150 °C. La consommation des différents équipements est comprise entre 385 et 485 watts durant la phase de croisière et est de 640 watts durant le séjour en orbite. L'énergie électrique recueillie est stockée dans des batteries nickel / hydrogène de 23 ampères-heures pouvant faire face aux périodes d'éclipse du Soleil.



*La sonde sans le pare-soleil.
On distingue un des réservoirs de carburant*



Seule 30 % de la surface des panneaux solaires est recouverte de cellules solaires pour résister aux températures rencontrées

Propulsion

Le système de propulsion de la sonde, qui peut fournir un delta-v (une accélération) cumulé de 2 300 m/s, comporte 17 propulseurs et 5 réservoirs. La propulsion principale est assurée par un moteur-fusée biergol de 645 Newtons de poussée et 317 s d'impulsion spécifique qui consomme un mélange hypergolique d'hydrazine et de peroxyde d'azote. Ce propulseur est réservé aux principales corrections de trajectoire et est chargé d'insérer MESSENGER en orbite autour de Mercure. Quatre propulseurs monoergol de 22 N de poussée (impulsion spécifique 234 secondes) consommant de l'hydrazine sont chargés d'effectuer des corrections de trajectoire demandant un delta-v modéré et de contrôler l'orientation du satellite lorsque le propulseur principal fonctionne. Enfin, 12 propulseurs monoergol de 4 N de poussée (impulsion spécifique 227 secondes) consommant de l'hydrazine sont utilisés pour désaturer les roues de réaction chargées du contrôle d'attitude du satellite en phase de croisière, effectuer de petites corrections de trajectoire et contrôler l'orientation lorsque les deux autres types de propulsion sont utilisés. Tous les propulseurs utilisés sont des modèles éprouvés lors d'autres vols sur des engins spatiaux. Le système de propulsion comprend par ailleurs deux réservoirs de carburant (hydrazine) contenant au lancement 178 kg d'ergol chacun, un réservoir de comburant contenant 231,6 kg de peroxyde d'azote, un réservoir d'hydrazine auxiliaire d'une capacité de 9,34 kg qui alimente les petits moteurs et un réservoir contenant 3 kg d'hélium utilisé pour mettre sous pression les ergols à fin d'injection dans les chambres de combustion des différents moteurs. L'ensemble des ergols représente une masse de 599,24 kg soit 54 % de la masse totale.

Contrôle de l'orientation

MESSENGER est stabilisé trois axes, c'est-à-dire que son orientation est maintenue fixe sur ses trois axes. Le système de contrôle de l'orientation est similaire à celui de la sonde NEAR Shoemaker. L'orientation et le déplacement de la sonde sont déterminés grâce à deux viseurs d'étoiles, une centrale à inertie (IMU) et six senseurs solaires. La centrale à inertie, qui détermine les accélérations linéaires sur les trois axes ainsi que les changements de vitesse radiale comporte trois accéléromètres et trois gyroscopes. Ceux-ci fournissent une double redondance. Les accéléromètres ne sont activés que pour les phases propulsées. Le contrôle de l'orientation de la sonde est assurée par un des deux viseurs d'étoiles, le deuxième étant activé en secours. Le viseur d'étoiles prend cinq fois par seconde une image des étoiles pour détecter toute déviation tandis que les gyroscopes fournissent des données 100 fois par seconde sur les changements de vitesse radiale. Les cinq senseurs solaires, dont quatre sont installés sur le pare-soleil fonctionnent en permanence et sont utilisés en cas de désorientation importante de la sonde. Leur champ

visuel cumulé assure une couverture de 99 % de l'enveloppe. Les corrections d'orientation sont effectuées grâce à quatre roues de réaction et à dix propulseurs mono-ergol de 4 Newtons de poussée. Normalement les roues de réaction, qui sont redondantes, assurent seules les corrections. Les petits moteurs-fusées sont utilisés durant les phases propulsées, pour désaturer les roues de réaction et dans des situations d'urgence.

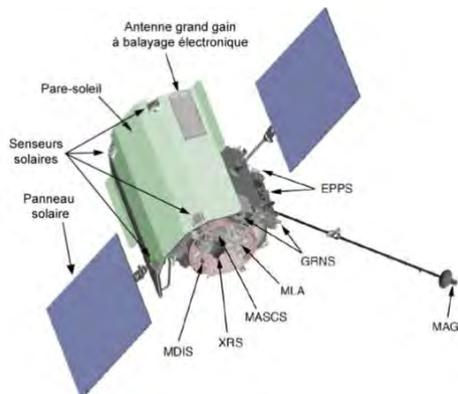


Schéma 3 : face avant de MESSENGER

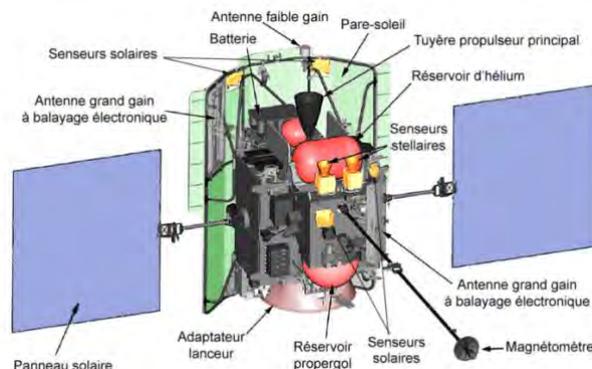


Schéma 4 : face arrière de MESSENGER

Contrôle thermique



Le pare-soleil visible ici sera constamment tourné vers le Soleil pour protéger la sonde des températures de plusieurs centaines de degrés atteintes au niveau de l'orbite de Mercure

Pour protéger la sonde des températures rencontrées au niveau de l'orbite de Mercure, celle-ci dispose d'un pare-soleil composé d'un tissu de céramique Nextel et de plusieurs couches de Kapton recouvert d'aluminium. L'orientation de la sonde est contrôlée de manière à ce que le pare-soleil s'interpose en permanence entre l'astre et la partie centrale de la sonde. Plusieurs équipements accrochés au pare-soleil du côté tourné vers l'astre reçoivent des protections thermiques spécifiques : quatre senseurs solaires, une des deux antennes grand gain, une antenne faible gain. La protection passive du pare-soleil suffit à maintenir la sonde dans une plage de températures acceptable. Des systèmes de régulation thermiques actifs permettent également d'évacuer la chaleur excédentaire produite par les différents appareillages électroniques vers des radiateurs montés sur les flancs de la sonde à l'abri du pare-soleil. Des résistances sont incorporées aux différents composants pour maintenir une température minimale au cours de la première partie du voyage, lorsque la sonde est encore éloignée du Soleil, et durant les éclipses provoquées par l'interposition de Mercure. Enfin des isolants multicouches et des joints à faible conductivité sont également utilisés pour maintenir les températures dans les limites de fonctionnement.

Calculateur de bord

L'électronique du bord est concentrée dans deux boîtiers IEM (*Integrated Electronics Modules*) dont l'un assure la redondance de l'autre. Chaque boîtier contient 5 cartes électroniques :

- La carte d'interface reçoit les données montantes des transpondeurs (télécommunications), décode certaines commandes, prépare et envoie aux transpondeurs les données télémétriques, héberge l'horloge, et contient une interface série à haut débit qui assure les transferts de données des caméras.
- La carte portant le processeur principal (MP *Main Processor*). Il s'agit d'un microprocesseur RAD6000. Celui-ci envoie les commandes non critiques aux différents sous-systèmes concernés, détermine l'orientation de la sonde et envoie éventuellement des commandes de correction, collecte les données scientifiques, les retravaille et les stocke, envoie les données télémétriques, et exécute les séquences d'opérations programmées.
- Une carte porte un processeur activé en cas de défaillance de la sonde. Il s'agit également d'un RAD6000. Celui-ci surveille constamment les données qui circulent en particulier celles qui transitent dans le bus utilisé par les composants du système contrôle d'orientation (senseurs, IMU...)
- Une carte portant une mémoire de masse de 8 gigaoctets qui est utilisée pour stocker les données entre deux transferts vers la Terre.
- Une carte portant le transformateur électrique qui alimente les autres cartes.

<i>Masse et consommation des composants</i>		
Composant	Masse¹ (kg)	Consommation^{1 2} (W)
Structure	71,2	-
Câblage	31,8	4,5/4,9
Moteurs et réservoirs	71,4	8/8
Panneaux solaires	74,4	31/24
Contrôle orientation	27	48/48
Contrôle thermique	31,8	105/70
Calculateurs	12,9	35,4/44,3
Télécommunications	25	76,6/76,6
Masse sèche	339	308,5/275,8
Caméras	7,9 ³	0/0 ³
Spectromètre GRNS	13,1 ³	0/28 ³
Spectromètre X	3,4 ³	0/6,8 ³
Magnétomètre	4,4 ³	0/4,4 ³
Altimètre laser	7,4 ³	0/25 ³
Spectromètre MASCS	3,1 ³	0/6,7 ³
Spectromètre EPPS	3,1 ³	0/8,8 ³
Électronique et câblage	4,6 ³	0/16,3 ³
Masse charge utile	47	0/96
Hélium et ergols	607,8	
¹ Chiffres de 2001 à la conception.		
² Consommation en croisière et en orbite autour de Mercure.		
³ Valeur effective au lancement.		

Télécommunications

Les communications vers la terre se font en bande X. Deux antennes réseau à commande de phase à grand gain, permettent d'orienter sans pièce mobile un faisceau étroit de 45° de part et d'autre de sa position médiane dans le plan perpendiculaire à l'axe de la sonde. Ces antennes autorisent un grand débit qui permet de transmettre 100 kilobits de données par seconde (liaison descendante). L'une de ces antennes est installée sur le pare-soleil l'autre sur la face du satellite située à l'opposé. Quatre antennes faible gain sont utilisées pour la réception de commandes envoyées depuis la Terre (liaison montante), l'envoi de données sur le fonctionnement de la sonde et comme système de secours lorsque la liaison à haut débit ne fonctionne pas. Les opérateurs peuvent transmettre des commandes au rythme de 7,8 à 500 bits par seconde.

Les instruments scientifiques

La sonde MESSENGER embarque sept instruments scientifiques auquel s'ajoute le système de télécommunications qui est utilisé pour les mesures du champ de gravité.

Les caméras (MDIS)

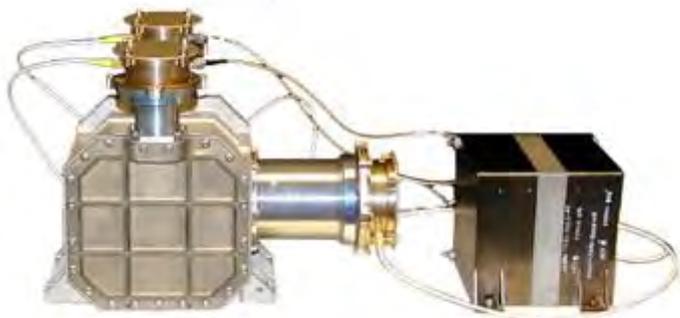
Les deux caméras MDIS (*Mercury Dual Imaging System*) sont montées sur un support unique qui peut pivoter pour élargir le champ de visée. La caméra grand angle WAC (*Wide Angle Camera*) permet de photographier une zone de $10,5^\circ$ sur $10,5^\circ$ en couleurs ou en noir et blanc en utilisant 11 filtres différents. Le spectre lumineux couvert va du visible au proche infrarouge (395 à 1 440 nm). La deuxième caméra NAC (*Narrow Angle Camera*) est munie d'un téléobjectif permettant d'obtenir des photos en noir et blanc en haute résolution. Ces photos prises couvrant un champ de $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ doivent permettre d'observer des détails de surface avec une précision nominale de 18 mètres par pixel.



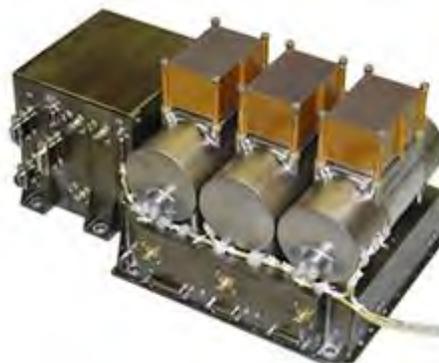
Les caméras MDIS



Le spectromètre gamma GRS



Le spectromètre à neutrons NS



Le spectromètre à rayon X XRS

Les spectromètres gamma et neutron (GRNS)

L'instrument GRNS (*Gamma-Ray and Neutron Spectrometer*) combine un spectromètre à rayons gamma et un spectromètre à neutrons qui fournissent des données permettant de déterminer la composition de la surface de Mercure. Le spectromètre gamma GRS (*Gamma-Ray Spectrometer*) mesure le rayonnement gamma émis par les noyaux des atomes de la surface de Mercure lorsqu'ils sont frappés par des rayons cosmiques. Chaque élément atomique a sa propre signature et le GRS devrait permettre de fournir des informations sur des éléments géologiquement importants comme l'hydrogène, le magnésium, le silicium, l'oxygène, le fer, le titane, le sodium et le calcium. Il pourrait également détecter des éléments naturellement radioactifs tels que le potassium, le thorium et l'uranium. Le spectromètre à neutrons NS (*Neutron Spectrometer*) détecte les neutrons rapides et thermiques (lents) émis par la surface de Mercure frappée par les rayons cosmiques. Les neutrons thermiques sont produits par la rencontre d'un neutron rapide avec un atome d'hydrogène. Le ratio entre le nombre de neutrons thermiques et celui de neutrons rapides permet d'estimer la quantité d'hydrogène, éventuellement piégée dans des molécules d'eau, ainsi que d'autres éléments.

Le spectromètre à rayons X (XRS)

Le spectromètre à rayons X XRS (*X-Ray Spectrometer*) doit analyser la composition de la surface de Mercure sur le premier millimètre d'épaisseur en utilisant 3 détecteurs à gaz MXU (*Mercury X-Ray*) pointés vers la surface et un détecteur à semiconducteur SAX (*Solar Assembly for X-rays*) pointé vers le Soleil. Les détecteurs à gaz mesurent la fluorescence X émise par la surface bombardée par le rayonnement X émis par le Soleil qui est lui-même mesuré par le détecteur SAX. Le spectromètre permet de mesurer les émissions dans la gamme 1 à 10 keV qui doivent permettre de détecter en particulier le magnésium, l'aluminium, le silicium, le soufre, le calcium, le titane et le fer. Le détecteur SAX est monté sur le pare-soleil.

Le magnétomètre (MAG)

Le magnétomètre MAG doit effectuer des mesures tridimensionnelles du champ magnétique autour de Mercure permettant d'en préciser la force et les variations en fonction de l'altitude et de la position au-dessus de la planète. Les données recueillies jouent un rôle essentiel pour déterminer la source de ce champ magnétique. Le senseur est monté au bout d'un mat de 3,5 mètres pour le maintenir à l'écart du champ magnétique généré par la sonde. Un petit pare-soleil le protège lorsque la sonde doit s'incliner pour mettre en œuvre les autres instruments scientifiques ce qui expose le senseur au Soleil. Les mesures sont prises à un intervalle compris entre 50 millisecondes (aux limites de la magnétosphère).

L'altimètre laser (MLA)

L'altimètre laser MLA (*Mercury Laser Altimeter*) comporte un émetteur laser infrarouge (1 064 nm) qui émet 8 impulsions par seconde et des récepteurs qui permettent de mesurer le temps mis par l'impulsion laser pour faire le trajet aller-retour entre l'instrument et la surface de la planète. Lorsque la sonde se situe à une altitude de 1 500 km la distance est mesurée avec une précision de 30 centimètres. L'instrument est utilisé pour effectuer un relevé précis des reliefs de Mercure mais également pour mesurer la libration de la planète, ce qui doit contribuer à mieux connaître la composition du noyau. Combiné avec les mesures Doppler effectuées à l'aide du système radio, les mesures de l'altimètre doivent également permettre d'établir une carte du champ de gravité de Mercure.



Le magnétomètre MAG



L'altimètre laser MLA



*Le spectromètre ultraviolet et infrarouge
MASCS*



*Les spectromètres à particules
énergétiques (EPS) et à plasma (FIPS)
EPPS*

Le spectromètre infrarouge et ultraviolet (MACS)

L'instrument MACS (*Mercury Atmospheric and Surface Composition Spectrometer*) combine un spectromètre ultraviolet et un spectrographe infrarouge. Le spectromètre ultraviolet et visible UVVS (*Ultraviolet and Visible Spectrometer*) doit déterminer la composition et la structure de l'exosphère (c'est-à-dire l'atmosphère de faible densité) qui entoure la planète et étudier les émissions de gaz neutres. Il doit également rechercher et mesurer les ions atmosphériques. Les données collectées doivent permettre de déterminer les processus qui génèrent et renouvellent l'atmosphère ainsi que la relation entre la composition de l'atmosphère celle de la surface, la dynamique des matériaux volatils sur Mercure et près de Mercure et la nature des matériaux réfléchissants situés aux pôles. La résolution spatiale de l'instrument est de 25 km. Le spectrographe fonctionnant dans le visible et l'infrarouge VIRS (*Visible and Infrared Spectrograph*) doit permettre de mesurer l'abondance de minéraux tels que le fer et les silicates comprenant du titane situés en surface tels que le pyroxène, l'olivine et l'ilménite. La meilleure résolution du capteur est de 3 km à la surface de Mercure.

Les spectromètres à particules énergétiques et à plasma (EPPS)

L'instrument EPPS (*Energetic Particle and Plasma Spectrometer*) est composé de deux instruments chargés de mesurer les caractéristiques et la composition des particules chargées dans la magnétosphère et sur son pourtour. Le spectromètre à particules énergétiques EPS (*Energetic Particle Spectrometer*) situé sur la partie supérieure de la plate-forme doit étudier les ions et les électrons accélérés dans la magnétosphère. L'instrument mesure le spectre énergétique et l'angle d'incidence des particules sur un champ observable de $160^\circ \times 12^\circ$. L'instrument FIPS (*Fast Imaging Plasma Spectrometer*) monté sur le côté de la plate-forme permet d'étudier les ions à faible énergie venant de la surface de Mercure et de son atmosphère, les atomes ionisés arrachés par le vent solaire et les autres composants du vent solaire.

L'utilisation du système radio (RS)

Le système de télécommunications n'est pas un équipement scientifique à proprement parler mais les émissions radio sont utilisées pour mesurer avec précision par effet Doppler la vitesse et la distance entre MESSENGER et la Terre. Les changements constatés dans la trajectoire de la sonde en orbite dus aux variations de densité de l'intérieur de la planète, combinés avec les mesures de l'altimètre laser permettent de déterminer la taille et les caractéristiques du noyau de Mercure.

e) Déroulement de la mission

Le lancement de la sonde (2004)

La sonde est lancée le 3 août 2004 à 6 h 16 UTC, par une fusée Boeing Delta II de la base de Cap Canaveral, en Floride, après un ultime retard de 24 heures provoqué par une tempête tropicale. Conséquence du changement de fenêtre de lancement intervenu suite aux retards accumulés durant le développement, la sonde doit entamer son périple par une première boucle autour du Soleil au niveau de l'orbite de la Terre alors que selon les plans initiaux elle devait plonger en direction du Soleil. Or la sonde est du point de vue thermique optimisée pour des conditions de température élevées et les panneaux solaires, à la surface réduite, peuvent tout juste à cette distance fournir le minimum requis pour maintenir la sonde en état de fonctionnement en particulier faire fonctionner les radiateurs chargés de maintenir les équipements à une température minimale. Pour faire face à cette situation l'orientation de la sonde est inversée c'est-à-dire que le pairesoleil est tourné dans la direction opposée au Soleil pour permettre à celui-ci de réchauffer les composants. Durant les 2 ans qui vont suivre cette orientation est adoptée à plusieurs reprises avant d'être abandonnée en juin 2006 lorsque la sonde s'est suffisamment approchée du Soleil. Une première correction de trajectoire (*Trajectory Correction Maneuvers*, TCM) est effectuée.

Assistance gravitationnelle de la Terre (2005)

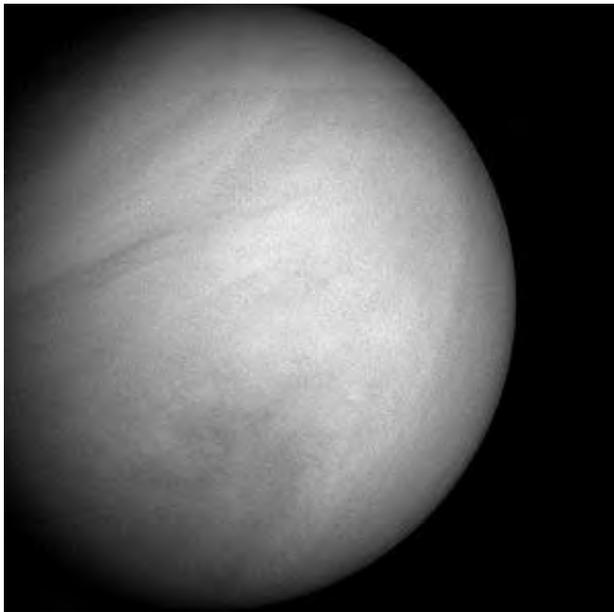
La sonde MESSENGER survole la Terre le 2 août 2005, à 2 347 kilomètres d'altitude. L'assistance gravitationnelle fournie par la planète permet à la sonde de plonger vers l'intérieur du système solaire. Le vaisseau prend à cette occasion plusieurs photos de la planète en s'en éloignant (voir galerie ci-dessous).



La Terre photographiée par MESSENGER durant son survol à basse altitude en décembre 2005

Assistance gravitationnelle de Vénus (2006 et 2007)

Il s'écoule 14 mois entre le survol de la Terre et le premier passage près de Vénus. Durant ce trajet cinq corrections de trajectoire sont effectuées dont l'une utilise pour la première fois le propulseur principal DSM 1 (*Deep Space Maneuver 1*). Vénus est atteinte le 24 octobre 2006 et la sonde la survole à 2 987 km. Cette manœuvre s'effectue dans des conditions complexes : une conjonction du Soleil de 30 jours (le Soleil s'interpose entre la sonde et la Terre) a débuté rendant les communications difficiles et une éclipse du Soleil de 56 minutes débute peu avant le survol. Dans ces conditions les responsables de la mission renoncent à toute collecte de données scientifiques à l'occasion du survol. Durant son périple en vue de son deuxième survol de Vénus, la sonde effectue 3 corrections de trajectoire dont l'une recourt brièvement au propulseur principal. Le deuxième survol est effectué avec une grande précision à une altitude de 337 km. Tous les instruments scientifiques sont testés avec succès à l'occasion de ce survol et notamment 614 photos de Vénus sont prises. L'assistance gravitationnelle reçue de la planète lors du passage à proximité de celle-ci est la plus importante de toute la mission.



Venus photographiée par MESSENGER au cours de son deuxième survol



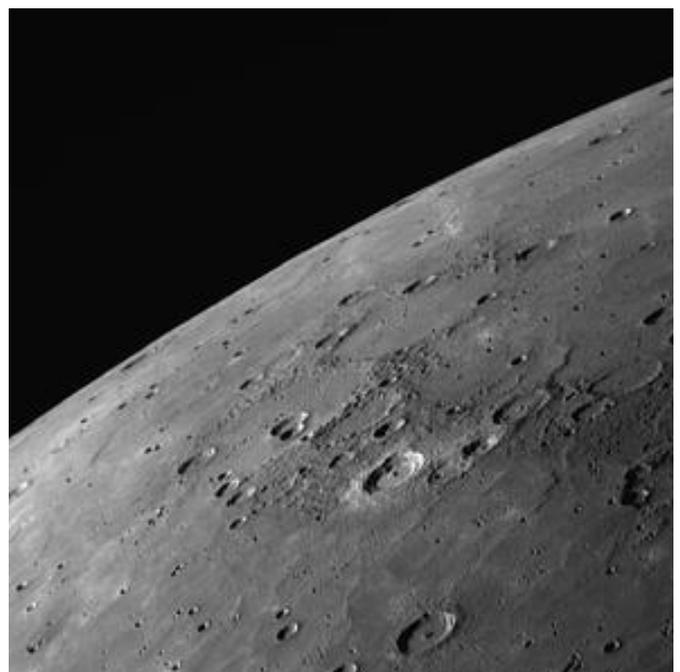
Séquence d'images prises après le deuxième survol de Vénus

Assistance gravitationnelle de Mercure (2008 et 2009)

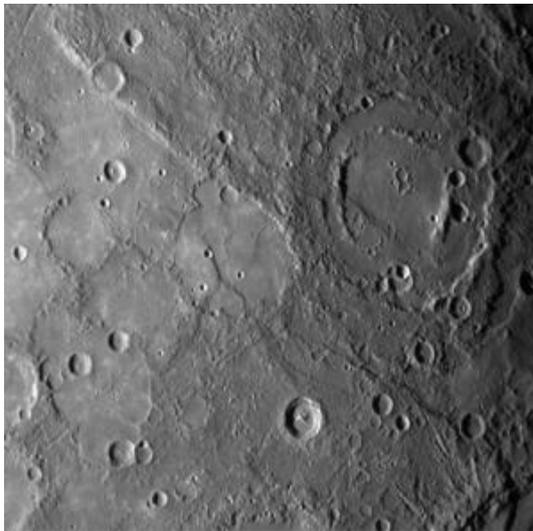
Sur son trajet en direction de Mercure, la sonde effectue une seule correction importante avec la propulsion principale (DSM-2). La sonde connaît une nouvelle conjonction solaire d'une durée particulièrement longue entre le 26 octobre et le 12 décembre qui prive pratiquement de communication l'équipe à Terre. Lors de son premier survol de Mercure à seulement 200 km de sa surface le 14 janvier 2008, la moitié de l'hémisphère qui n'avait pu être photographiée il y a 30 ans par Mariner 10, est cette fois visible. Les caméras MDIS sont braquées sur la planète alors que celle-ci défile à quelques milliers de kilomètres de la sonde MESSENGER et 1 200 photos sont prises dont certaines de la partie inconnue de la planète. De nouveaux cratères sont identifiés en grand nombre; les données recueillies confirment les spécificités de Mercure. Tous les instruments scientifiques ont été mis en marche et ont parfaitement fonctionné. Lors de son deuxième survol de Mercure toujours à 200 km de sa surface le 6 octobre 2008, la sonde prend plus de 1 200 clichés, haute résolution de la face inconnue de la planète, couvrant ainsi 30 % de sa surface. Après le troisième et dernier survol de Mercure qui se déroule le 29 septembre 2009, seule 2 % de la surface de la planète au niveau des pôles reste à photographier.



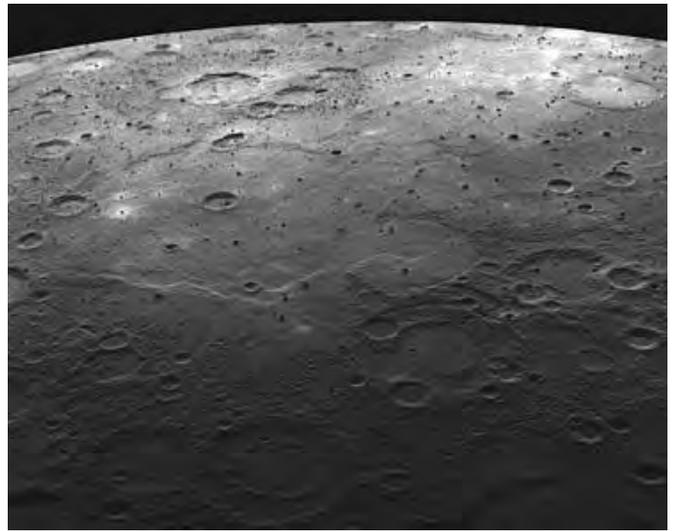
La première photo à haute résolution prise par la caméra grand angle de MESSENGER



Plaines photographiées par MESSENGER durant le troisième survol de Mercure



*Une image d'une partie de la planète
jusque-là non photographiée*



*Cratères envahis par la lave et plaines
d'épanchement d'anciens volcans*

En orbite autour de Mercure (mars 2011-mars 2015)



MESSENGER en orbite autour de Mercure (vue d'artiste)

L'insertion en orbite autour de Mercure

Lors de son quatrième passage près de Mercure, le 18 mars 2011, MESSENGER a suffisamment réduit sa vitesse et modifié les caractéristiques de sa trajectoire pour pouvoir se placer en orbite autour de la planète avec la quantité de carburant dont elle dispose. La sonde aura alors parcouru 7,9 milliards de kilomètres depuis son lancement. Pour réussir cette manœuvre d'insertion cruciale (*Mercury orbit insertion*, MOI), la sonde arrive selon une trajectoire rasant le pôle nord et, peu après avoir survolé celui-ci, réduit sa vitesse de 0,86 km/s. Elle utilise à cette fin sa propulsion principale durant 15 minutes en consommant environ 31 % de la masse des ergols dont elle disposait au départ de la Terre. Trois jours après son arrivée, des petites corrections sont apportées pour parfaire l'orbite. Avant d'entamer la phase de recueil de données scientifiques, le fonctionnement de la sonde et de ses instruments dans l'environnement thermique très dur de l'orbite est vérifié durant plusieurs semaines. Les instruments scientifiques sont mis en marche le 23 mars et les premières données scientifiques sont collectées à partir du 4 avril.

Caractéristiques de l'orbite autour de Mercure

La sonde se trouve sur une orbite polaire d'inclinaison $82,5^\circ$ très elliptique ($200 \text{ km} \times 15\,193 \text{ km}$) qu'elle parcourt en 12 heures. Sur cette trajectoire la sonde survole au plus près Mercure au niveau des 60° de latitude nord. Cette orbite permet les meilleures observations au niveau de l'hémisphère nord où se situe le Bassin Caloris le cratère le plus vaste et la formation la plus intéressante de la planète. Une orbite très elliptique a été préférée à une orbite circulaire car la sonde, lorsqu'elle survole à 200 km Mercure, est soumise à la chaleur que la planète réfléchit (celle-ci est quatre fois plus importante que celle réfléchie

lors d'un survol de la Terre à la même altitude) : en se tenant écartée de Mercure sur une partie de son orbite, la sonde parvient à maintenir sa température dans une fourchette acceptable. Au fur et à mesure de l'avancement de la mission, l'attraction gravitationnelle du Soleil déforme l'orbite en augmentant l'altitude et la latitude au périhélie ainsi que l'inclinaison. Pour compenser ces modifications, il est prévu que chaque année mercurienne (tous les 88 jours terrestres), deux manœuvres destinées à rétablir l'orbite d'origine soient effectuées à des dates qui permettent une exposition réduite du corps de la sonde au Soleil; en effet l'utilisation de la propulsion implique de modifier l'orientation de la sonde qui n'est alors plus protégée par le pare-soleil. La première de ces corrections est effectuée au périhélie et accélère la sonde pour ramener sa période orbitale à 12 heures, tandis que la deuxième manœuvre exécutée à l'apogée ralentit MESSENGER pour ramener la période orbitale à 12 heures et l'altitude minimale à 200 km.

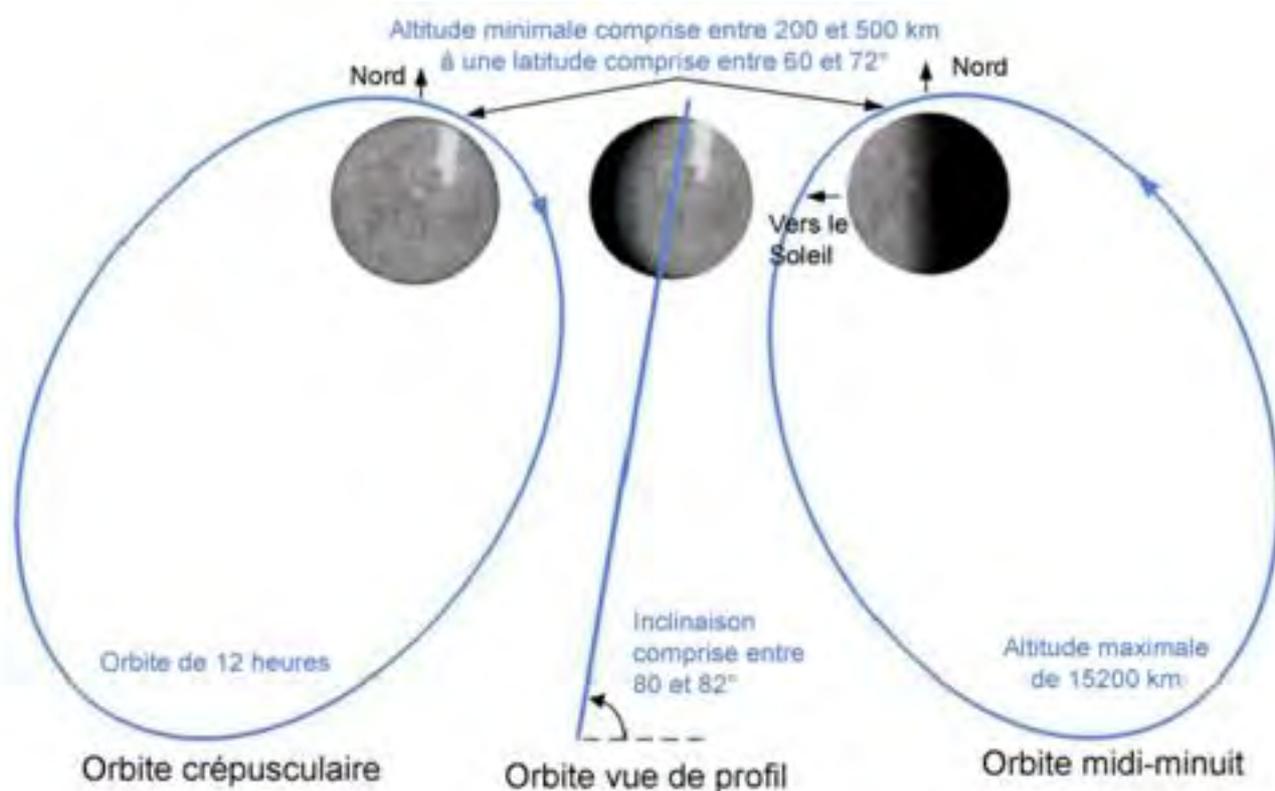


Schéma 5 : Orbite de MESSENGER autour de Mercure

Déroulement des opérations durant la mission primaire

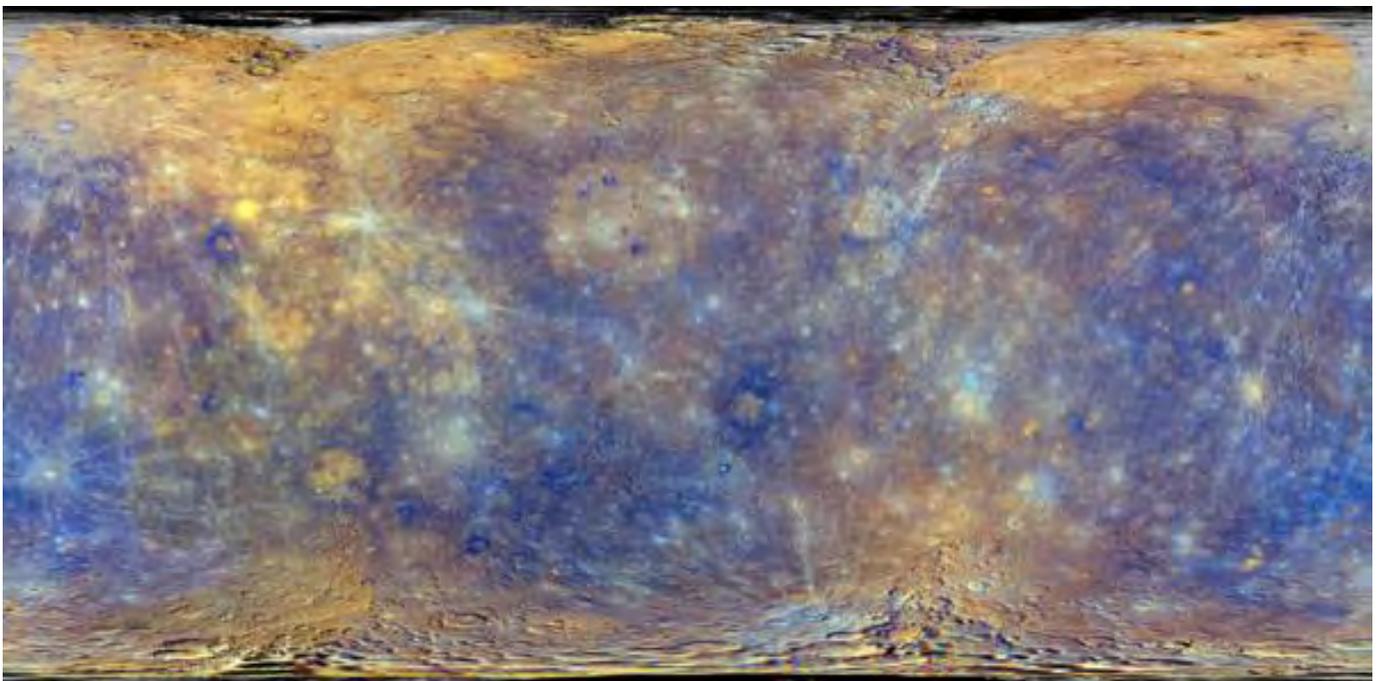
Mercure effectue une rotation sur elle-même (jour sidéral) en 58,7 jours terrestres. Par ailleurs, en raison de la proximité du Soleil, Mercure décrit une orbite autour de celui-ci en seulement 88 jours terrestres. Il en résulte qu'un jour solaire, c'est-à-dire la durée entre deux retours successifs du Soleil au méridien local, dure 176 jours terrestres. Au cours de la durée nominale de la mission (une année terrestre), MESSENGER qui circule sur un plan orbital fixe dans un repère inertiel et donc en rotation par rapport à la direction du Soleil, va voir défiler seulement deux fois le même terrain sous ses instruments. La première de ces « journées mercuriennes » est consacrée à une cartographie de l'ensemble de Mercure tandis que la deuxième journée sera dédiée à des observations plus ciblées. Pour chaque orbite de 12 heures, la sonde consacre 4 heures au recueil de données scientifiques puis, après avoir modifié son orientation pour pointer son antenne vers la Terre, transmet durant 8 heures les données collectées aux stations terrestres. La séquence des opérations à exécuter par les instruments scientifiques, qui comprend des dizaines de milliers de commandes, est transmise une fois par semaine à la sonde depuis la Terre, après avoir été testée et validée. En cas d'anomalie de fonctionnement d'un instrument ou si le réseau d'antennes sur Terre a perdu une partie des données transmises par la sonde, des modifications dans le déroulement des opérations peuvent être apportées très rapidement.

Première extension de mission (mars 2012 - mars 2013)

En novembre 2011, la NASA annonce que la mission d'étude de Mercure dont la durée initiale était d'un an est prolongée d'une nouvelle année jusqu'en mars 2013. Durant cette deuxième phase de la mission, la sonde passe plus de temps à faible distance de la planète pour permettre de poursuivre des objectifs scientifiques élargis et d'effectuer des observations plus ciblées. Cette phase est utilisée pour étudier les réactions de l'environnement de Mercure à l'accroissement de l'activité solaire en cours. Six nouveaux objectifs découlant des observations effectuées depuis que MESSENGER s'est placée en orbite autour de la planète sont identifiés :

- Quelle est la source des éléments volatils de Mercure ?
- Jusqu'à quand Mercure a-t-elle eu une activité volcanique ?
- Comment la topographie a-t-elle évolué dans le temps ?
- Quelle est l'origine des zones de plus forte densité de l'exosphère ?
- Comment le cycle solaire modifie-t-il l'exosphère de Mercure et les déplacements des éléments volatils ?
- Quelle est l'origine des électrons énergétiques de Mercure ?

Le changement d'orbite intervient entre le 16 et 20 avril 2012. Seule l'apogée (le point le plus éloigné de l'orbite) est modifié : il est ramené de 14 700 km à 10 300 km ce qui permet à la sonde de boucler trois orbites par jour au lieu de deux. Ce changement permet aux scientifiques de bénéficier d'un accroissement de 50 % des données collectées par les instruments (ceux-ci ne fonctionnent que lorsque la sonde est proche de Mercure). La nouvelle orbite permet d'accroître la qualité des données fournies pour les latitudes septentrionales par les spectromètres chargées d'analyser la surface de Mercure, de démultiplier les mesures d'altitude effectuées par l'altimètre laser dans ces régions et de réaliser des images de l'hémisphère sud monochromes et multispectrales avec une résolution accrue. Sur sa nouvelle orbite la sonde dispose de moins de temps pour évacuer la chaleur reçue lors de son passage à faible distance de Mercure, mais les calculs et l'expérience acquise ont démontré que l'impact se limitait à une augmentation de 5 degrés Celsius de quelques équipements qui restait dans la limite de leurs conditions de fonctionnement.



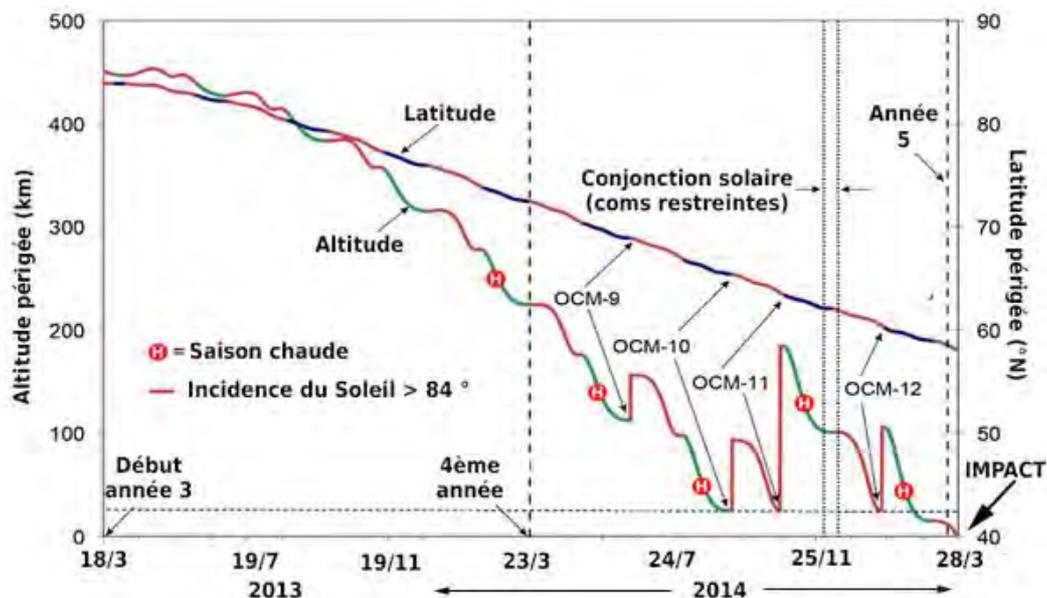
Carte en fausses couleurs de Mercure mettant en évidence les différences de composition des roches de surface

Deuxième extension et fin de mission (mars 2013 - mars 2015)

En mars 2013 une deuxième extension de mission est décidée qui doit notamment répondre aux questions suivantes :

- Quels sont les processus actifs et récent qui modifient la surface de la planète ?
- Comment les tensions dans la croûte ont évolué avec le temps.
- Comment la composition des matériaux volcaniques a-t-elle évolué avec le temps ?

- Quelles sont les caractéristiques des matériaux volatiles stockés dans la région du pôle nord ?
- Quels sont les répercussions des précipitations d'ions et d'électrons énergétiques sur le sol de Mercure ?
- Comment l'exosphère et la magnétosphère de Mercure réagit elle dans les cas de vent solaire fort durant ou juste après le maximum solaire ?
- Obtenir de nouveaux éléments sur l'évolution de la température et de la croûte de Mercure grâce aux mesures à forte résolution réalisées à basse altitude.



Évolution de l'orbite de MESSENGER (altitude et latitude périégée) et manœuvres destinées à relever l'orbite (notées OCM) durant la dernière phase de la mission

En novembre 2013, la trajectoire des comètes 2P/Encke et ISON les fait passer à portée de la sonde spatiale ce qui permet aux instruments de celles-ci de réaliser des observations de qualité. En février 2014 MESSENGER transmet sa 200 000^e photo alors que l'objectif fixé était la réalisation de 2 000 photos. Lors de la discussion du budget de la NASA qui a lieu début 2014, l'extension de la mission jusqu'à épuisement du carburant en mars 2015 est remise en cause par les réductions budgétaires proposées par la NASA. Finalement une ligne budgétaire plus importante que prévu pour les sciences planétaires permet de mener la mission de MESSENGER jusqu'à son terme. Du fait des modifications apportées à l'orbite, celle-ci s'abaisse selon un rythme beaucoup plus rapide à partir de novembre 2013. La latitude du périégée glisse progressivement de 85 à environ 60°. La dernière extension de mission prévoit d'exploiter l'abaissement du périégée pour réaliser des mesures très précises et très fines notamment du champ magnétique résiduel. La sonde pourra également réaliser des images à très haute résolution puisque l'altitude atteindra à certains moments 25 km. Il est prévu que les moteurs-fusées de la sonde spatiale soient utilisés à quatre reprises pour relever le périégée et éviter à la sonde spatiale de percuter un relief de Mercure. La sonde spatiale, après épuisement de son carburant, devrait s'écraser sur le sol de Mercure entre mars et avril 2015.

f) Résultats scientifiques

Données collectées au cours des survols de 2008 et 2009

Les trois survols de Mercure effectués en 2008 et 2009 ont déjà permis, malgré la brièveté du temps d'observation, de collecter de nombreuses données exploitables sur le plan scientifique. La couverture photographique de la planète qui était de 45 % avant le lancement de MESSENGER, atteint 98 % après les trois survols. Deux zones situées au niveau de chaque pôle restent à photographier. Toutefois parmi les prises de vue effectuées durant les survols, certaines ont été réalisées dans des conditions d'éclairage qui ne sont pas idéales pour mettre en évidence la topographie. Les photos prises ont fourni des aperçus des formations les plus remarquables de Mercure comme les escarpements hauts parfois de plusieurs kilomètres qui s'allongent sur des centaines de kilomètres et les bassins d'impact entourés d'anneaux concentriques. Contrairement à la Lune et à Mars le relief des grandes régions de Mercure ne présente pas de dissymétrie particulière. L'analyse de l'exosphère de Mercure au cours des 3 survols successifs a

permis de constater que ses caractéristiques variaient fortement en fonction de la pression solaire, ces variations étant elles-mêmes induites par l'orbite à forte excentricité de Mercure. Le troisième survol a confirmé l'abondance particulière du titane et du fer à la surface de la planète en contradiction avec les prévisions des scientifiques. La sonde a pu mesurer que le champ magnétique est de type dipolaire et est parfaitement aligné avec l'axe de rotation de la planète ce qui constitue un élément important dans la détermination de l'origine du magnétisme de Mercure.



Photo en fausses couleurs du cratère Rachmaninoff prise au cours du 3^e survol : la zone jaune et l'intérieur du cratère pourraient avoir une origine volcanique

Données collectées durant le séjour en orbite autour de Mercure (mars 2011-mars 2015)

Fin 2011, alors que les trois quarts de la durée de la mission primaire sont écoulés, la sonde MESSENGER, qui fonctionne jusque là sans incident notable, a fourni de nouveaux éclairages sur Mercure dans plusieurs domaines :

- Fin décembre 2011 60 000 photographies ont été prises des principales formations situées à la surface de Mercure. La couverture photographique de la planète est désormais de 99 %. Des photographies énigmatiques de dépôts brillants situés au fond de certains cratères avaient été prises lors des survols de MESSENGER qui avaient précédé sa mise en orbite. De nouvelles photos prises avec une résolution allant jusqu'à 10 mètres par pixel ont révélé qu'il y avait à ces emplacements des groupes de cavités dépourvues de lèvres d'une taille variable comprise entre quelques centaines de mètres et plusieurs kilomètres. Ces formations sont souvent entourées de halos de matériaux hautement réfléchissants et sont généralement associées à des roches éjectées par le processus de formation de cratères : on les trouve ainsi sur les lèvres des cratères, les pics centraux et les anneaux de pics. Ces formations, qui semblent parmi les plus récentes, n'avaient jamais été observées auparavant sur la Lune comme sur Mercure. Une des théories avancées est que ces formations résultent de la sublimation des éléments volatils contenus dans les roches ce qui impliquerait que la croûte de Mercure contient plus d'éléments volatils que prévu par les théories en vigueur. Par ailleurs les photos prises confirment que les déformations affectant la croûte de Mercure sont essentiellement liées à la contraction de la planète et sont à l'origine de gigantesques escarpements lobés et de failles mais il existe également des dizaines de zones, généralement situées à l'intérieur de cratères ou de bassins, qui présentent au contraire des signes d'expansion de la croûte.
- Le spectromètre à rayons X a effectué plusieurs découvertes importantes sur la composition du sol de Mercure. Contrairement au sol de la Lune, celui de Mercure n'est pas dominé par les roches riches en feldspath. Les mesures ont également confirmé des observations effectuées par télescope depuis la Terre suggérant que des sulfures sont présents à la surface de Mercure. En conséquence les blocs de matériaux qui ont formé la planète étaient moins oxydés que ceux ayant servi à la formation des autres planètes terrestres. Cette théorie aurait des répercussions importantes sur

notre compréhension du volcanisme sur Mercure. Par ailleurs le spectromètre à rayons gamma GRS a fourni un éclairage sur la formation et les débuts de l'histoire la planète en montrant que l'abondance du potassium moyennement volatil était aussi élevée que celle des éléments réfractaires tels que le thorium et l'uranium. Cette constatation, identique à ce qui est observé sur Mars ou la Terre, signifie que la densité très élevée de Mercure ne peut pas être expliquée par un impact géant ou la vaporisation initiale des couches externes de la planète par la nébuleuse solaire.

- L'altimètre laser MLA a effectué plus de deux millions de mesures altimétrique de l'hémisphère nord. Les sommets les plus importants s'élèvent à 9 km. La calotte polaire est une zone de basse altitude. MESSENGER n'a pas encore pu déterminer la nature du matériau réfléchissant les ondes radar qui tapisse les zones en permanence à l'ombre de certains cratères dans les zones polaire. Mais les mesures de la profondeur des cratères ne contredisent pas la théorie selon laquelle ce matériau serait de la glace d'eau.
- Le magnétomètre embarqué a permis de déterminer après plusieurs orbites que l'équateur magnétique de Mercure est situé à 0,2 rayons soit 480 km au nord du centre la planète. Le noyau métallique fondu situé au cœur de la planète à l'origine du champ magnétique comporte donc une importante asymétrie nord-sud. En conséquence le champ magnétique comporte un trou important au niveau du pôle sud qui permet aux particules du vent solaire de frapper la surface de Mercure. Ce phénomène arrache des atomes de la surface qui viennent alimenter l'atmosphère ténue de Mercure tout en "polissant" le sol.

D'autres résultats ont été produits durant les extensions de la mission :

- Le spectromètre à neutron de la sonde spatiale a définitivement démontré que de la glace d'eau se trouvait à la surface de Mercure malgré sa température très élevée (jusqu'à 400°C). Celle-ci se trouve stockée à l'intérieur de cratères en permanence à l'ombre situés dans les régions polaires de la planète. Les caméras montrent à ces endroits un matériau sombre, qui selon les hypothèses des scientifiques, serait constitué d'un matériau riche en molécules organiques comme en transportent les comètes et les astéroïdes qui sont supposés être à l'origine de cette eau. Cette découverte remet en cause le modèle de formation de la planète.
- Le noyau métallique de Mercure en se refroidissant a entraîné une diminution du diamètre de la planète (4880 km soit un tiers de celui de la Terre) du fait du volume moins important occupé par le métal en phase solide. Des falaises, hautes de plusieurs kilomètres et longues de plusieurs centaines de kilomètres, qui résultent de cette contraction, se sont formées et sillonnent la surface actuelle de la planète. Elles ont été observées dès la mission de Mariner 10. Les scientifiques avaient à l'époque calculé que les reliefs observés indiquaient une réduction du diamètre de la planète comprise entre 1 et 3 km. Mais cette valeur était inférieure à ce qui était prédit par la modélisation du refroidissement du noyau de Mercure sur les 4 derniers milliards d'années. Les données recueillies par l'altimètre de MESSENGER ont permis de réévaluer la réduction de diamètre à 7 km et ainsi de réconcilier la modélisation et les données de terrain.

E) BepiColombo

BepiColombo est une mission d'exploration de l'Agence spatiale européenne (ESA) vers la planète Mercure qui a été lancée le 19 octobre 2018. Elle est ainsi nommée en l'honneur du scientifique italien Giuseppe Colombo, dit Bepi. Elle est développée conjointement avec l'agence d'exploration aérospatiale japonaise (JAXA). Après un vol de transit de 6 ans et le recours à six reprises à l'assistance gravitationnelle des planètes intérieures, les deux orbiteurs qui composent la mission doivent se placer en décembre 2025 en orbite autour de Mercure :

- l'orbiteur MPO, développé par l'ESA, a pour mission principale l'étude de l'intérieur et de la surface de la planète Mercure et son exosphère ;
- l'orbiteur MMO, développé par l'agence spatiale japonaise JAXA, a pour objectif l'étude du champ magnétique, de la magnétosphère, de l'exosphère ainsi que des ondes et des particules situées dans l'environnement immédiat de la planète.

Un troisième module, le *Mercury Transfer Module*, ou *MTM*, dont la maîtrise d'œuvre est confiée à l'ESA, prend en charge le transit des éléments MPO et MMO jusqu'à l'orbite de Mercure. À l'origine un atterrisseur était également prévu, mais des restrictions budgétaires ont conduit à son abandon.

Objectifs de la mission

Les principaux objectifs scientifiques de BepiColombo sont :

- analyse de la composition de Mercure afin de recueillir des données sur la nébuleuse solaire primitive ayant conduit à la formation du système solaire;
- expliquer la densité anormalement élevée de Mercure comparée aux autres corps du système solaire;
- déterminer si le noyau de Mercure se trouve à l'état solide ou liquide;
- recherche et étude d'une activité tectonique éventuelle;
- expliquer la présence d'un fort champ magnétique intrinsèque autour de Mercure alors que Vénus ou Mars en sont dépourvues;
- expliquer l'absence de traces de fer lors de toutes les analyses spectroscopiques alors qu'il est supposé être le constituant principal de la planète;
- détecter la présence éventuelle de glace d'eau ou de sulfure à l'ombre des cratères des régions polaires;
- réaliser une cartographie complète de la planète, en particulier de l'hémisphère non encore exploré par Mariner 10;
- étude des mécanismes à l'origine de l'exosphère;
- étude de l'interaction du champ magnétique avec le vent solaire en l'absence d'ionosphère;
- décrire la structure de la magnétosphère et des phénomènes associés (ceintures de radiations, orages magnétiques...);
- utiliser l'avance du périhélie de Mercure, due à la courbure de l'espace-temps près du Soleil, pour tester la théorie de la relativité générale.

Déroulement de la mission

Le transit entre la Terre et Mercure

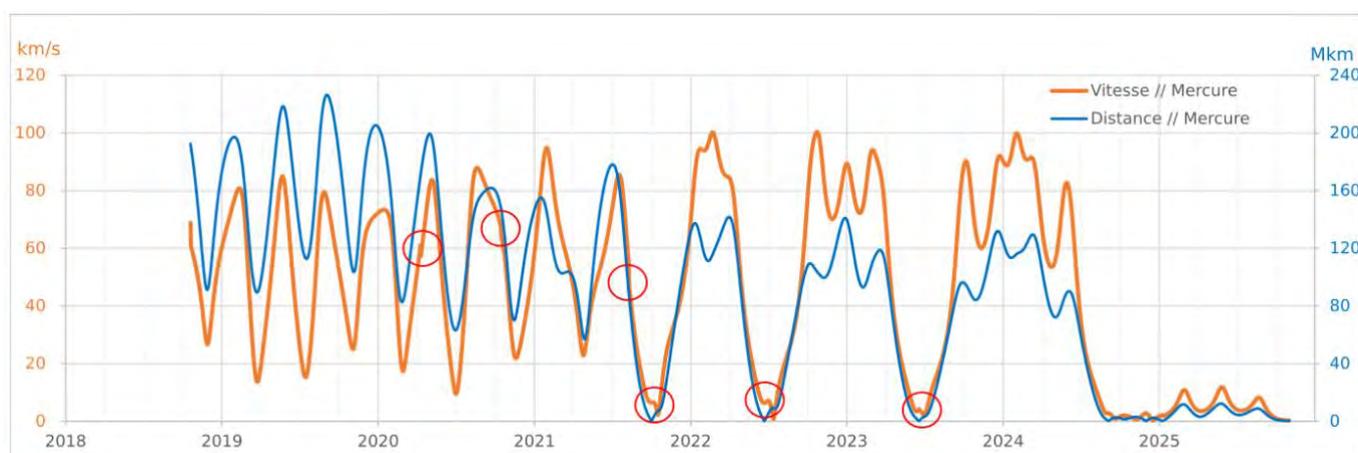
BepiColombo a été lancée en octobre 2018 par une fusée Ariane 5 qui la place sur une orbite héliocentrique. La sonde combine l'action de ses moteurs ioniques et le recours à l'assistance gravitationnelle pour parvenir jusqu'à Mercure. Elle survole au cours de son transit à faible altitude la Terre à une reprise, Vénus à deux reprises et Mercure à quatre reprises

Les quatre modules forment un ensemble de $3,9 \times 3,6 \times 6,3$ mètres dont l'envergure atteint 30,4 mètres lorsque les panneaux solaires du module de propulsion MTM sont déployés. BepiColombo a une masse de 4 121 kg au lancement dont environ 1 400 kg d'ergols.

Date	Événement
20 octobre 2018	Mise en orbite solaire
10 avril 2020	Survol et assistance gravitationnelle de la Terre
15 octobre 2020	Survol et première assistance gravitationnelle de Vénus
11 août 2021	Survol et deuxième assistance gravitationnelle de Vénus
1 ^{er} octobre 2021	Survol et première assistance gravitationnelle de Mercure
23 juin 2022	Survol et deuxième assistance gravitationnelle de Mercure
20 juin 2023	Survol et troisième assistance gravitationnelle de Mercure
5 septembre 2024	Survol et quatrième assistance gravitationnelle de Mercure
2 décembre 2024	Survol et cinquième assistance gravitationnelle de Mercure
9 janvier 2025	Survol et sixième assistance gravitationnelle de Mercure
début octobre 2025	Largage du module de propulsion ionique (MTM)
5 décembre 2025	Insertion en orbite mercurienne à l'aide des moteurs à propulsion chimique du MPO

Caractéristiques techniques

La mission BepiColombo comprend 4 modules dont deux modules techniques et deux sondes spatiales qui prennent leur autonomie une fois la mise en orbite autour de Mercure effectuée.



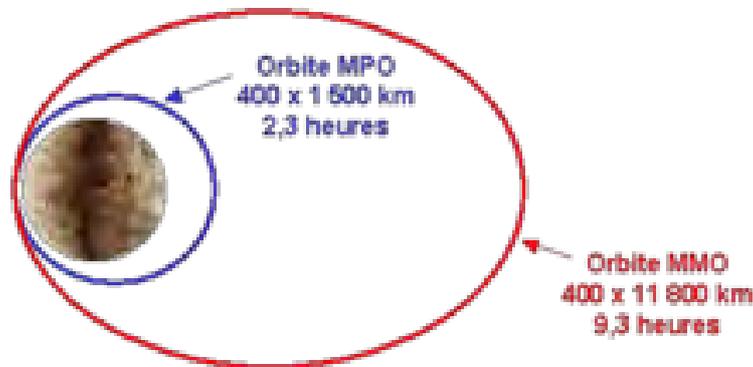
Vitesse (km/s) et distance (millions km) par rapport à Mercure de BepiColombo entre le 20 octobre 2018 (lancement) et fin 2025 (insertion en orbite autour de la planète) durant son transit entre la Terre et Mercure. Les cercles rouges correspondent aux survols de planète (avec assistance gravitationnelle).

L'orbiteur MPO

L'orbiteur MPO (Mercury Planetary Orbiter) est une sonde spatiale stabilisée 3 axes qui est placée en orbite polaire elliptique ($400 \times 1\,500$ km) et parcourt une révolution autour de la planète en 2,3 heures. MPO, qui est développé par l'Agence spatiale européenne, a pour objectif l'étude de la planète. Sa masse est de 400 kg et elle emporte une charge utile de 50 kg. L'énergie solaire est fournie par 3 panneaux solaires formant une aile unique orientable. Les panneaux qui produisent environ 1000 Watts durant la mission scientifique sont recouverts en partie de parties réfléchissantes (les *Optical Solar Reflectors* ou OSR) pour limiter la montée en température. Pour atteindre cet objectif les panneaux solaires sont également orientés de manière à ce que l'incidence des rayons solaires ne soit pas perpendiculaire. Le contrôle d'attitude est réalisé à l'aide 4 roues de réaction et deux ensembles redondants de 10 moteurs-fusées de 10 Newtons de poussée consommant de l'hydrazine. L'orientation du module est déterminée à l'aide de 3 senseurs stellaires, deux centrales à inertie comportant chacune 4 accéléromètres et 4 gyroscopes et deux ensemble de deux senseurs solaires fins redondants. Les corrections de trajectoire sont confiées à deux ensembles redondants de quatre moteurs-fusées de 22 Newtons de poussée biergols consommant un mélange d'hydrazine et de MON-3. Les télécommunications sont assurées en bande X par une antenne grand gain orientable de 1 mètre de diamètre, une antenne moyen gain orientable et deux antennes faible gain fixes.

Les instruments scientifiques de MPO	
Instruments	Caractéristiques
BELA	Altimètre laser utilisé pour la cartographie (<i>BepiColombo Laser Altimeter</i>)
ISA	Accéléromètre (<i>Italian Spring Accelerometer</i>)
MERMAG	Magnétomètre (<i>Mercury Magnetometer</i>)
MERTIS-TIS	Spectromètre et radiomètre infrarouge thermique (<i>Mercury Radiometer and Thermal Imaging Spectrometer</i>)
MGNS	spectromètre à neutrons et rayons gamma (<i>Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer</i>)
MIXS	Spectromètre imageur rayons X (<i>Mercury Imaging X-ray Spectrometer</i>)
MORE	Transpondeur utilisé pour une expérience d'occultation radio (<i>Mercury Orbiter Radio-science Experiment</i>)
Phébus	Spectromètre ultraviolet lointain et extrême (<i>Probing Hermean Exosphere by Ultraviolet Spectroscopy</i>)
SERENA	Spectromètre de masse et analyseur de particule (<i>Search for Exospheric Refilling and Emitted Natural Abundances</i>)
SIMBIO-SYS	spectromètre infrarouge et caméras haute définition (<i>Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory System</i>)
SIXS	Spectromètre rayons X (<i>Solar Intensity X-ray and particle Spectrometer</i>)

L'orbiteur magnétosphérique (MMO)



L'orbiteur MMO (*Mercury Magnetospheric Orbiter*) est un satellite scientifique développé par l'agence spatiale japonaise JAXA dont l'objectif principal est l'étude de la l'atmosphère et de la magnétosphère de la planète Mercure. D'une masse totale d'environ 275 kg dont 45 kg d'instrumentation, il se présente sous la forme d'un prisme octogonal haut de 0,9 mètres avec des faces opposées distantes de 1,8 mètres. Le satellite est spinné (en rotation) à 15 tours par minute autour de son axe qui est maintenu perpendiculaire au plan orbital de Mercure autour du Soleil. Ce choix d'orientation garantit que les extrémités du satellite (le bas et le haut du prisme) ne sont jamais pointées vers le Soleil et permet de pointer l'antenne grand gain vers la Terre en la rendant orientable avec un seul degré de liberté. MMO circule sur une orbite polaire fortement elliptique de 11 800 km sur 400 km qu'il parcourt en 2,3 heures. Les parois de l'octogone sont recouvertes de cellules solaires qui génèrent 350 Watts et de miroirs. Ces derniers permettent de maintenir la température dans une fourchette acceptable.

Les instruments scientifiques de MMO	
Instruments	Caractéristiques
MERMAG-M/MGF	Magnétomètre (<i>Mercury Magnetometer / Magnetometer Fluxgate</i>)
MPPE	Ensemble instrumental destiné à l'étude des particules de haute et basse énergie (<i>Mercury Plasma Particle Experiment</i>)
PWI	Analyse de la structure et de la dynamique de la magnétosphère (<i>Plasma Waves Instrument</i>)
MSASI	Spectromètre en lumière visible travaillant dans le domaine spectral de la raie D2 d'émission du sodium (<i>Mercury's Sodium Atmosphere Interferometer</i>)
MDM	Mesure de la poussière interplanétaire (<i>Mercury Dust Monitor</i>)

Le module pare-soleil et interface (MOSIF)

Le module pare-soleil et interface MOSIF (*Magnetospheric Orbiter Sunshield and Interface Structure*) protège le MMO du soleil et joue le rôle d'interface entre le MMO et le MPO.

Le module de transfert vers Mercure (MTM)

Le module de transfert vers Mercure (*Mercury Transfer Module* MTM) est un module de propulsion qui est chargé de la propulsion de l'ensemble constitué par le MMO, le MOSIF et le MPO jusqu'à Mercure.

Une possible colonisation humaine

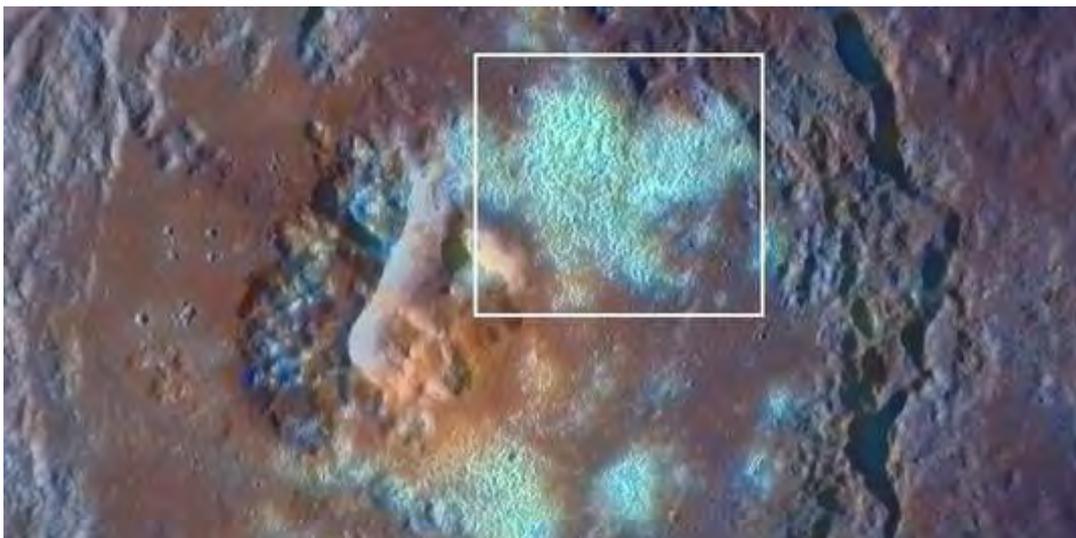
Un cratère au pôle nord ou au pôle sud de Mercure serait peut-être l'un des meilleurs endroits extraterrestres pour l'établissement d'une colonie, là où la température resterait constante à environ -200 °C. Ceci est dû à une inclinaison axiale quasi nulle de la planète et au vide quasi parfait à la surface, empêchant l'apport de chaleur depuis les portions éclairées par le Soleil. Ce qui rend ainsi toujours sombre et froid le fond d'un cratère — même peu profond — à l'un des pôles, mais surtout éviterait de gros écarts de température. La colonie pourrait se chauffer elle-même et la faible température ambiante permettrait une évacuation plus facile de la chaleur que sur un autre lieu extraterrestre. Une base n'importe où ailleurs serait exposée en « journée », durant un trimestre terrestre, à la chaleur intense du Soleil, puis durant une période nocturne identique sans la moindre source de chaleur extérieure et serait donc dangereuse avec des températures diurnes de 430°C et des températures nocturnes de -180°C. La situation ne serait pas aussi compliquée qu'il n'y paraît à première vue : les installations pourraient être enterrées sous plusieurs mètres de régolithe qui, dans le vide, servirait aussi bien d'isolant thermique que de bouclier antiradiations. Des approches similaires ont été proposées pour l'installation de bases sur la Lune, dont le jour dure deux semaines, suivi d'une nuit de deux semaines également. Par ailleurs, la base pourrait profiter du jour pour stocker la chaleur et s'en servir ensuite la nuit. Il serait aussi possible de se servir de la chaleur disponible dans les roches du sous-sol, où la température est quasi constante de l'ordre de 180 °C : une sorte de géothermie mercurienne. En revanche, la protection des robots et des véhicules contre la chaleur du Soleil pourrait poser beaucoup plus de difficultés, entraînant une limitation des activités en surface durant le jour.

Caractéristiques des modules de BepiColombo				
Caractéristique	 Module MPO	 Module MMO	 Module MTM	 Module MOSIF
Rôle	Étude de la surface et de l'exosphère	Étude de la magnétosphère	Propulsion durant le transit vers Mercure	Protection du MMO et Interface technique
Masse	1 230 kg	225 kg	2 645 kg	145 kg dont 20 kg pour le dispositif d'éjection et de rotation du MMO
Dimensions	2,4 × 2,2 × 1,7 m	1,8 × 1,8 × 1,1 m	3,5 × 3,7 × 2,3 m	3 × 1,8 m
Envergure totale (panneaux solaires déployés)	7,8 m	1,8 m	30,4 m	
Instruments scientifiques	11 (85 kg)	5 (45 kg)	-	
Énergie produite	935–1 565 watts	348–450 watts	7–14 kilowatts	
Énergie consommée par les instruments	110–180 watts	90 watts	-	
Ergols	ergols liquides : 669 kg	-	xénon 587 kg ergols liquides 157 kg	
Delta-V	~1 km/s	-	~5 km/s	
Télécommunications	en bande Ka via antenne orientable 1 mètre	en bande X via antenne phasée de 0,8 mètre	-	
Volume données scientifiques	1 550 gigabits/an	100 gigabits/an	-	

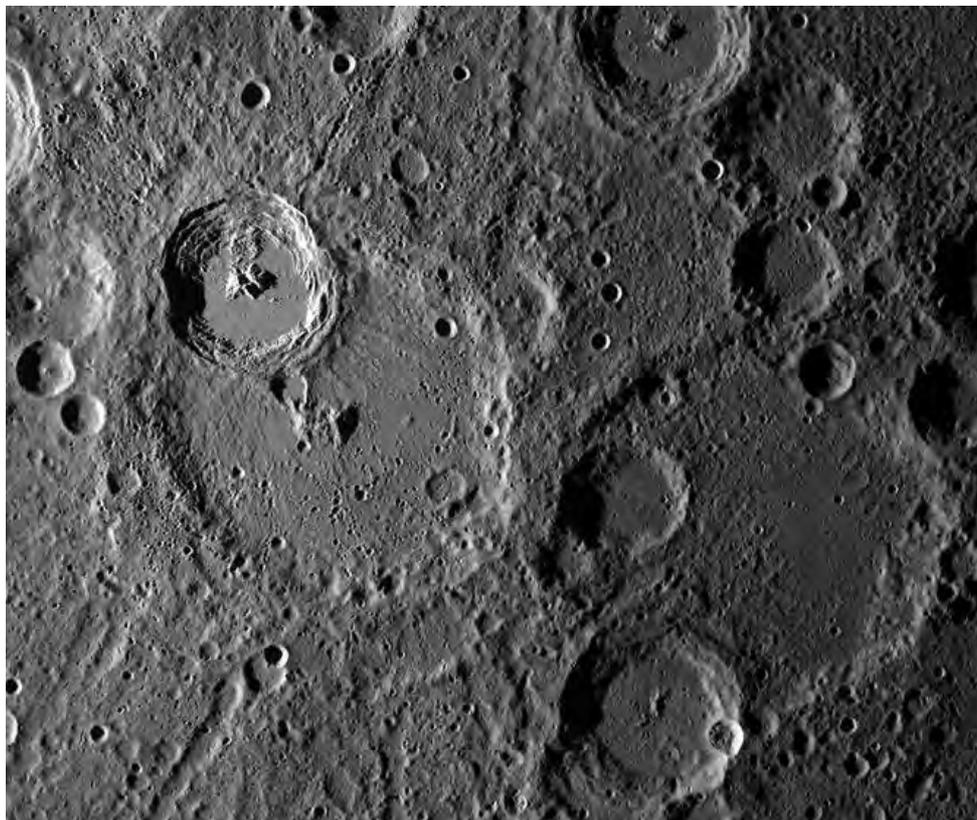
IV Iconographie



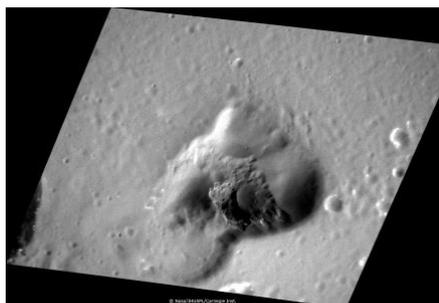
Ce très beau bassin à anneau central est situé sur Mercure, il a été photographié en septembre 2009. Son diamètre est de 290 km. Il est représentatif des bassins à anneau central. Cet anneau proviendrait de l'affaissement sur lui-même d'un piton central hyper-développé. On voit très bien que ce bassin est entouré d'éjectas disposés radialement. Dans ces éjectas, on devine des alignements de petits cratères, dits cratères secondaires. Ils ont été formés par la chute des plus gros débris issus du cratère principal. Cette morphologie est caractéristique de tous les "grands" cratères sur toutes les planètes



Une image de Mercure prise par la sonde "Messenger" montrant les plaines formées par des coulées de lave. Ces plaines intriguaient les chercheurs depuis le premier survol de Mercure par la sonde américaine Mariner 10, en 1974, qui les avait photographiées pour la première fois. Ces longues étendues, épaisses d'un kilomètre à certains endroits, sont le résultat d'une importante activité volcanique qui a produit des torrents de lave il y a un peu plus de 3,5 milliards d'années. Elles recouvrent 6 % de la superficie de Mercure, soit l'équivalent de 60 % de la surface des Etats-Unis



Un cratère de Mercure en haute-définition, pris par Messenger



Messenger a survolé l'une des plus intrigantes formations de la petite planète : une dépression qui n'a rien à voir avec un impact de météorite. Les spécialistes pensent qu'il s'agit de la bouche d'un volcan. C'est pourquoi ils ont décidé de photographier la zone avec une résolution de 28 m par pixel.

Situé en bordure du bassin Caloris ce nouveau cliché montre que quasiment aucun cratère d'impact n'a été creusé dans la dépression qui mesure 23 km de large dans sa plus grande dimension. Cela indique qu'il s'agit d'une formation récente d'un point de vue géologique. Sa morphologie évoque celle d'un volcan explosif



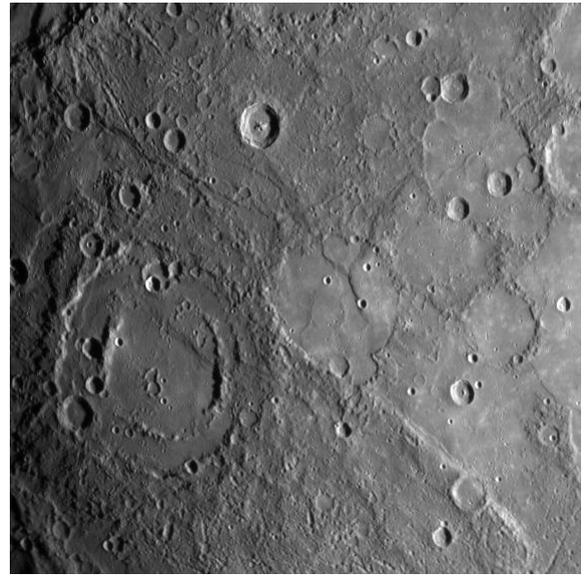
Tôt dans l'histoire de la planète – il y a de 3,5 à 4 milliards d'années – d'énormes volumes de lave se sont déversés par les fissures à la surface de Mercure, recouvrant les plaines basses, explique ce géologue. Ces coulées de lave ont rempli des cratères de plus d'un kilomètre et demi de profondeur, ajoute-t-il. Cette lave "n'a pas formé des cônes volcaniques, comme à Hawaii, mais recouvre à plat les endroits où elle sort du sol, ce qui rend ce phénomène très difficile à comprendre dans le contexte des éruptions volcaniques que nous observons sur la Terre", remarque le scientifique



Sur cette mosaïque de photos, prises en 2010 par la sonde Messenger au-dessus de l'hémisphère Nord de Mercure, on voit des épanchements de lave arriver du coin inférieur droit de la photo, emprunter une "vallée" et s'étaler en arrivant dans un grand et vieux cratère de météorite. Avant d'arriver dans ce cratère, la lave a "débordé" par-dessus la vallée et a envahi les terrains environnants avec des figures d'écoulement visibles (flèche noire). En bas à droite une flèche blanche indique une dépression allongée qui n'a pas la morphologie classique des cratères d'impact



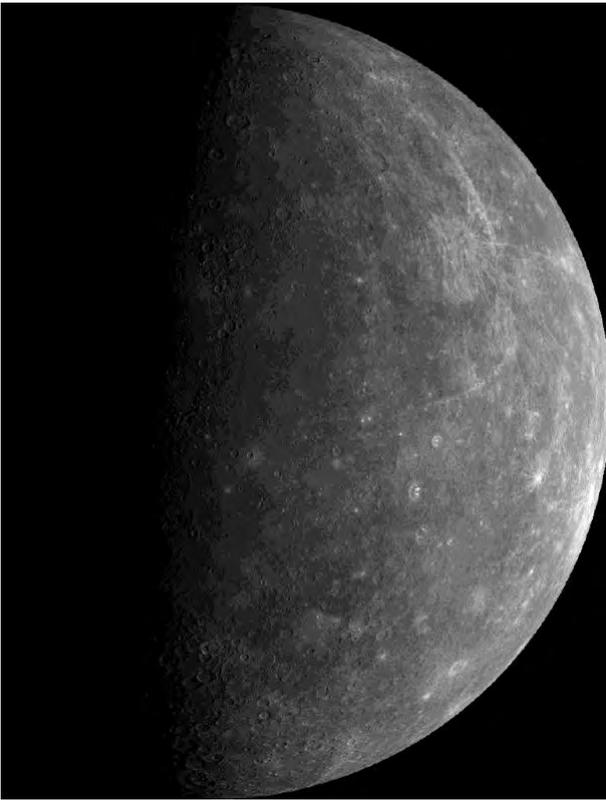
Le 24 avril la Nac a saisi une étonnante structure au centre d'un cratère qui n'a pas encore reçu de nom. L'image ci-dessous qui fait 116 kilomètres de côté nous est proposée sur le site de la mission Messenger. Elle montre plusieurs alignements de petits cratères dont les deux plus importants se croisent perpendiculairement. Pour les géologues il s'agit de cratères secondaires qui ont été creusés par la retombée d'éjectas issus d'impacts violents qui se sont produits en dehors du champ de l'image.



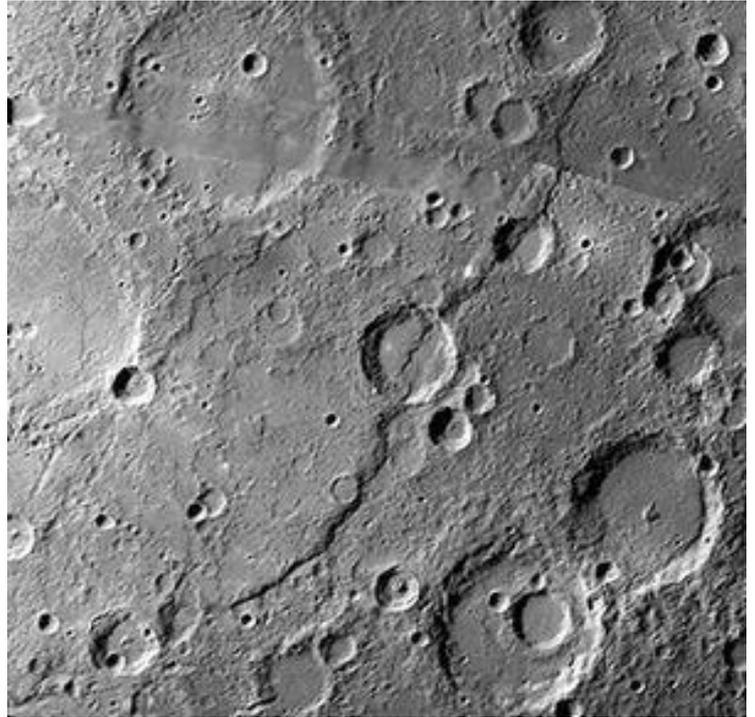
La surface de Mercure photographiée par Messenger le 14 janvier 2008 à 18 000 km de distance



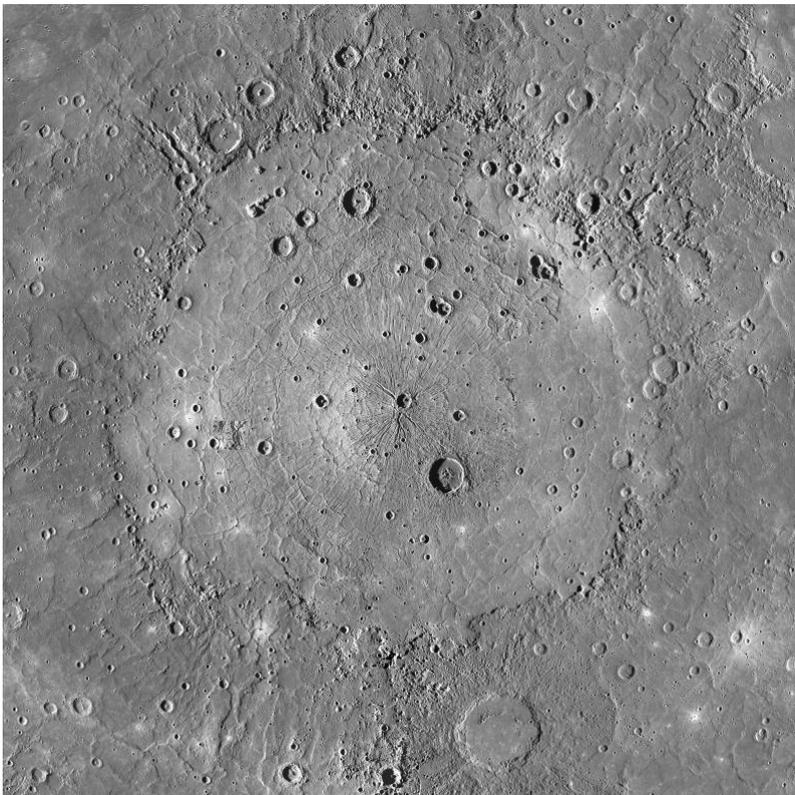
Une image de la planète Mercure, prises à partir de Messenger en 2008



Mercure prise par Messenger



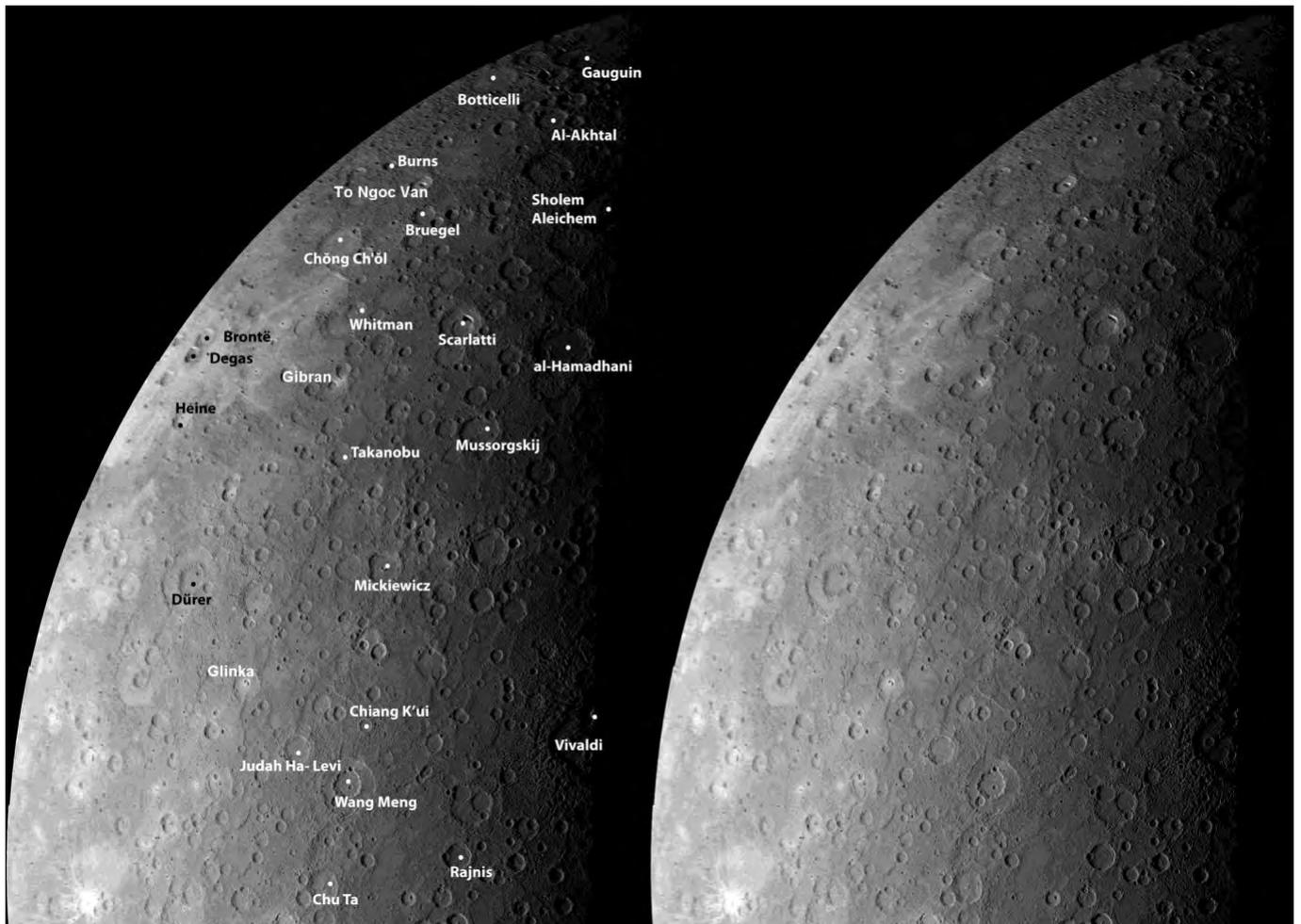
L'escarpement Discovery, une des nombreuses failles de compression à la surface de Mercure



Le bassin Caloris, un des plus gros cratères d'impact du Système Solaire.



Le Terrain étrange (ou *Weird Terrain*), formé à l'antipode de l'impact du bassin Caloris.



Exemple de cratères sur Mercure, associés avec leur nom.

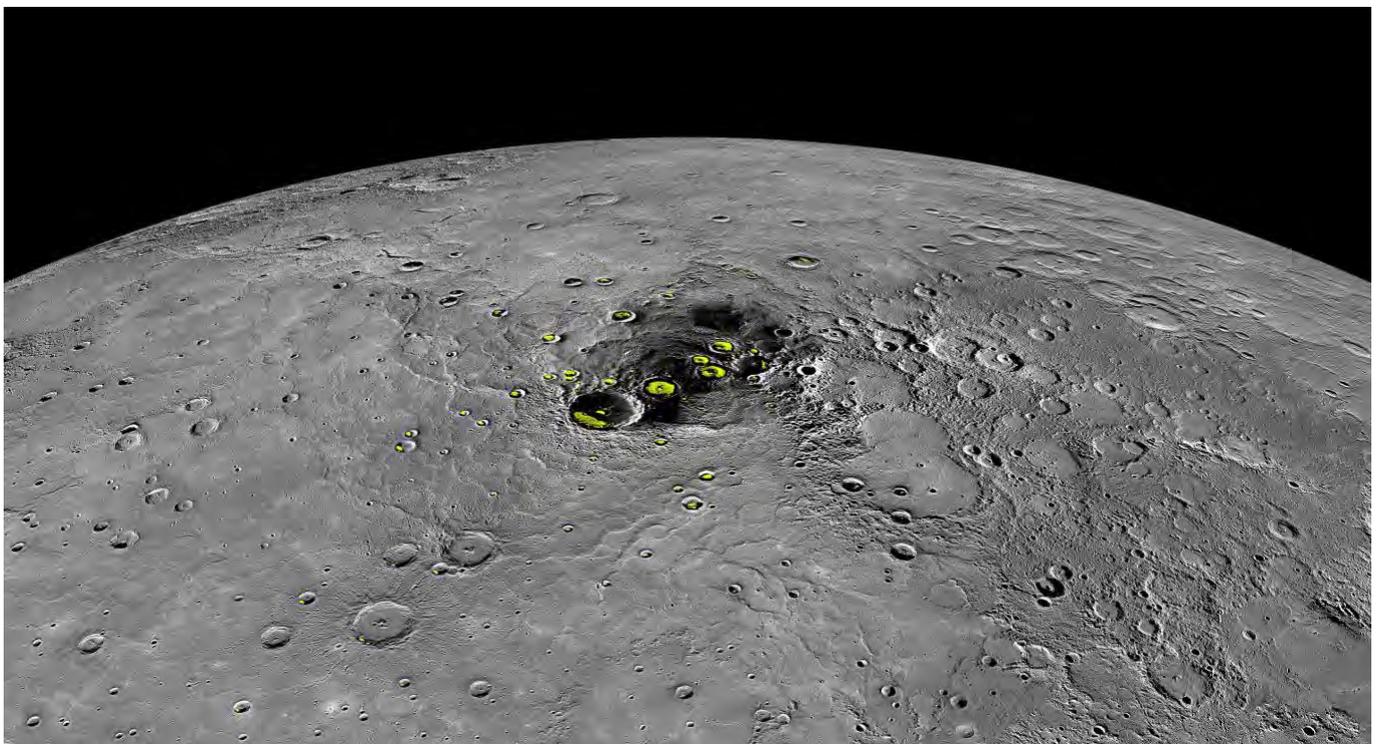


Image du Pôle Nord de Mercure prise par MESSENGER, les suspicions d'eau gelée dans les cratères sont colorées en jaune.



Transit de Mercure le 11 novembre 2019, la planète se trouve dans le quart haut/droit de l'image.



Le module MPO de BepiColombo.

Table des matières

I Généralités	1
II Caractéristiques détaillées	4
A) Orbite, excentricité	4
B) Transit de Mercure	6
C) Rotation	7
D) Atmosphère	8
E) Conditions climatiques	9
F) Géologie	10
G) Caractéristiques de la surface	12
a. Bassins et cratères d'impact	12
b. Cratères à cavités d'effondrement	13
c. Plaines	13
d. La glace	14
e. Quelques détails de surface	15
H) Les périodes géologiques de Mercure	16
I) Le volcanisme	17
J) La structure interne	18
K) Métallicité	19
L) Champ magnétique	20
III Observations et exploration	21
A) Observations dans l'Antiquité	21
B) Cartographie	22
C) Le programme Mariner	23
a. Les premiers Mariner	23
b. Mariner 10	28
i. Contexte	29
ii. Caractéristiques techniques.....	29
iii. Instruments scientifiques embarqués	30
iv. Déroulement de la mission.....	30
v. Résultats scientifiques.....	31
vi. Mariner 11 et 12.....	32
vii. Depuis Mariner 10	32
D) Messenger	34
a. Contexte	35
b. Les choix d'architecture de la mission	36
c. Les objectifs scientifiques de la mission	37
d. Caractéristiques techniques de la sonde	39
e. Déroulement de la mission	45
f. Résultats scientifiques	51
E) BepiColombo	54
IV Iconographie	58
V Table des matières	64