

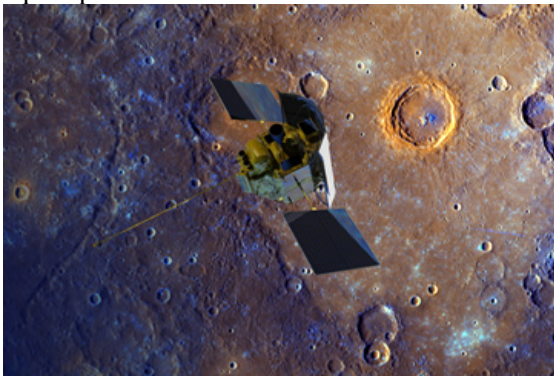
# ARTICLE DE FOND

## L'exploration de Mercure : le paradoxe de l'humidité

Cécile Ferrari, université Paris Diderot

*Cet article lève le voile sur un aspect apparemment paradoxal : comment une planète aussi proche du Soleil que Mercure peut-elle contenir de la glace d'eau ? Dans le cadre scolaire nous avons la une belle illustration de la démarche scientifique.*

La sonde MESSENGER (acronyme pour Mercury Surface, Space ENvironment, GEOchemistry and Ranging) de la NASA a été mise en orbite autour de Mercure le 18 mars 2011 après sept ans de voyage. Autant que la sonde CASSINI pour rejoindre Saturne à plus d'un milliard de kilomètres de nous. Étonnant pour cette planète voisine, pourtant dix fois plus proche.

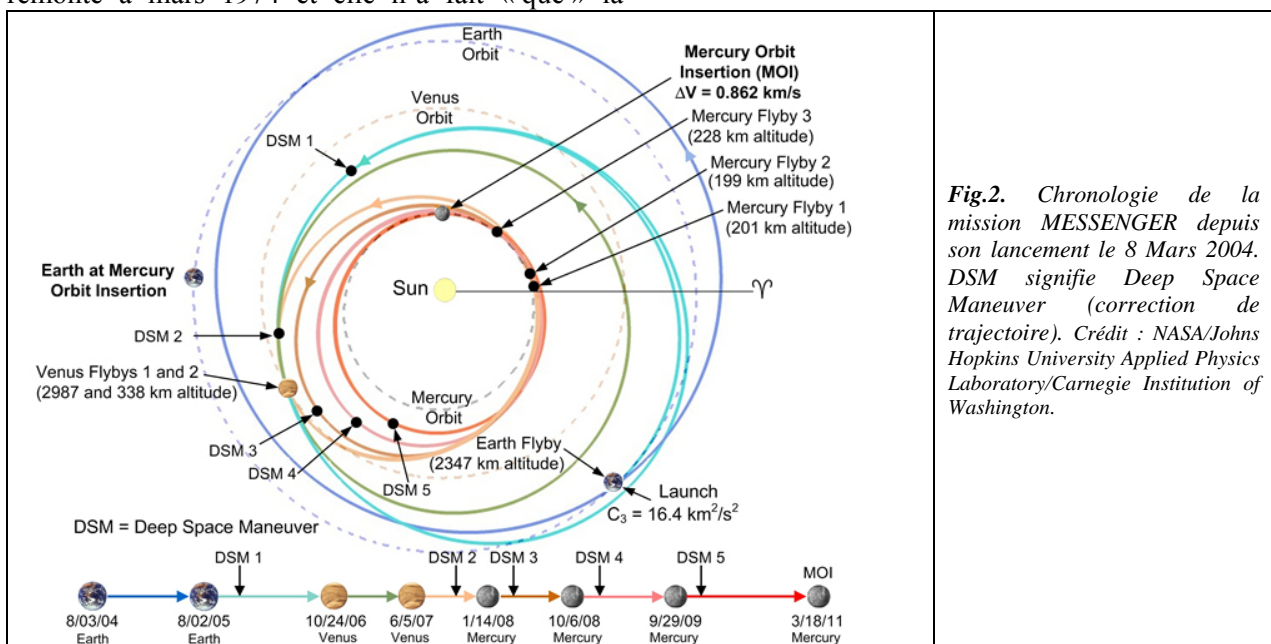


**Fig.1.** Vue d'artiste de la sonde MESSENGER survolant le cratère Calvino, coloré en orange. L'image de la planète, aux couleurs exagérées ici, a été obtenue lors du survol de 2008. Crédit : NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

La dernière mission vers Mercure, Mariner 10, remonte à mars 1974 et elle n'a fait « que » la

survoler à trois reprises. MESSENGER est la première sonde mise en orbite autour de Mercure. Aller sur Mercure n'est en effet pas une sinécure.

Une sonde envoyée depuis la Terre, qui tourne à une vitesse de 30 km/s autour du Soleil, doit gagner énormément de vitesse pour rattraper Mercure, qui elle avance à près de 50 km/s de moyenne. Juste échappée de l'attraction terrestre et satellite du Soleil, elle doit pouvoir « rattraper » Mercure dans sa course folle, le long d'une trajectoire propice à sa capture (figure 2). Une telle accélération a réclamé pour MESSENGER un survol de la Terre, deux survols de Vénus (2006-2007) et trois survols de Mercure (2008-2009). Trois années d'approche donc, pour prendre la bonne vitesse et le bon angle d'arrivée et assurer la capture. Ici pas d'aérofreinage possible, mais beaucoup de carburant pour le freinage, 600 kg d'hydrazine et tétraoxyde d'azote, plus de la moitié de la masse de la sonde. L'exploration très limitée alors de la planète témoigne de la difficulté à réaliser cette satellisation. La mise en orbite n'est pas la seule difficulté à surmonter pour le succès d'une telle mission. La sonde MESSENGER est aussi une nouvelle perle technologique.



**Fig.2.** Chronologie de la mission MESSENGER depuis son lancement le 8 Mars 2004. DSM signifie Deep Space Maneuver (correction de trajectoire). Crédit : NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

La température augmente à cette distance du Soleil... Pour embarquer tout le carburant nécessaire, elle a été construite en graphite composite afin de minimiser sa masse structurelle et sa charge utile. Par ailleurs, elle s'abrite derrière un bouclier thermique de céramique très réfléchissante et de Kapton pour s'isoler de températures maximales de l'ordre de 400 °C et pour travailler à 20 °C sans pour autant rôtir sous le rayonnement de la planète située sous elle. Tout est conçu pour évacuer la chaleur à tout endroit de la sonde. Au cours d'une orbite de 12 h, le temps passé à basse altitude sera limité à 25 min.

Ce n'est donc pas par manque d'intérêt scientifique que le terrain a été abandonné pendant des décennies. La sonde embarque toute une batterie d'instruments pour répondre aux grandes questions scientifiques : que nous apprend Mercure sur la formation des planètes telluriques ? Quel est le scénario le plus plausible de sa formation ? Au vu de sa surface très cratérisée, Mercure a très vraisemblablement préservé un enregistrement plus complet des premières étapes de la formation de sa croûte alors que Vénus, la Terre et Mars ont à l'évidence subi une altération et un resurfaçage importants depuis. Programme scientifique : comprendre la masse volumique étonnante de Mercure (5,4 g/cm<sup>3</sup>), effectuer la cartographie géologique globale de la planète et comprendre son histoire géologique, observer le champ magnétique de la planète et comprendre pourquoi les planètes telluriques sont si différentes à cet égard, caractériser l'exosphère, déterminer la nature du matériau brillant observé par radar aux pôles de Mercure et déterminer la stabilité éventuelle de la glace d'eau à l'ombre permanente des cratères polaires.

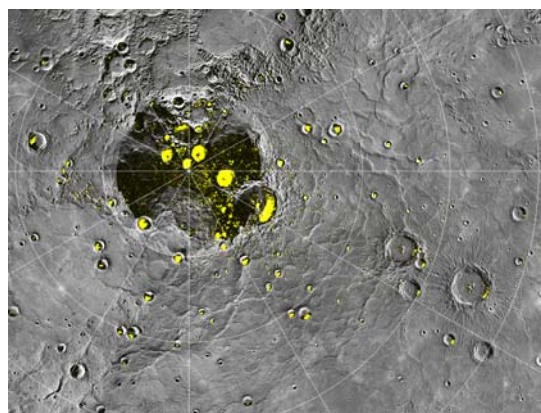
En effet, il y a vingt ans, on a découvert aux pôles Nord et Sud de Mercure la présence de taches très réfléchissantes des impulsions radar envoyées par les antennes radio de Goldstone (Californie), du Very Large Array (Nouveau Mexique) et d'Arecibo (Porto-Rico). À l'aube des années 2000, l'amélioration de ces techniques d'observation permet de résoudre des détails de l'ordre du kilomètre dans ces régions (figure 3). On constate que les zones de haute réflectivité radar sont situées à des latitudes supérieures à 70° N. Cette haute réflectivité, caractéristique des satellites glacés de Jupiter et de la calotte polaire martienne Sud, a alors été interprétée comme l'évidence de la présence de glace d'eau aux pôles de Mercure. Une surprise évidemment pour une planète si proche du Soleil et donc apparemment trop chaude pour maintenir de l'eau à l'état de glace.

En effet, un calcul simple de bilan d'énergie peut aider déjà à estimer une température moyenne attendue à la surface de Mercure, dite température d'équilibre. La puissance solaire totale reçue par m<sup>2</sup> à la distance de Mercure est :

$F_D = L_S / 4\pi D^2 = 8\,950 \text{ W/m}^2$  où  $D = 0,39 \text{ UA}$ , i.e.  $0,39 \times 150 \times 10^9 \text{ m}$  et la luminosité solaire :

$L_S = 3,826 \times 10^{26} \text{ W}$ , sachant que l'orbite de Mercure est très excentrique ( $e = 0,206$ ), sa distance au Soleil variant entre 0,30 et 0,47 UA. Si tout ce flux absorbé par la surface apparente de la planète de rayon  $R$  vue par le Soleil (c'est-à-dire  $\pi R^2$ ), est réémis par toute la surface ( $4\pi R^2$ ) alors la température d'équilibre  $T$  de la surface ainsi définie est  $T = (F_D / 4\pi)^{1/4} = 446 \text{ K}$ , i.e. 173 °C suivant le bilan d'énergie et la loi de Stefan :

$\pi R^2 F_D = 4\pi R^2 \sigma T^4$  où  $\sigma$  est la constante de Stefan.



**Fig.3.** La meilleure image à haute résolution de la région polaire Nord de Mercure faite par le radiotélescope d'Arecibo superposée en jaune à une mosaïque d'images noir et blanc faites par la caméra grand angle WAC-MDIS (Mercury Dual Imaging System) de la sonde MESSENGER. Les taches radar brillantes (jaune) correspondent aux zones à l'ombre vues dans les images (noir), ce qui est compatible avec la présence éventuelle de glace d'eau dans les zones d'ombre permanente au pôle. La mosaïque d'images est représentée en projection stéréographique avec un cercle tous les 5° de latitude (environ 213 km) et un secteur de longitude tous les 30°. Le 0° de longitude est dans la direction du bas de l'image. (Crédit : NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington).

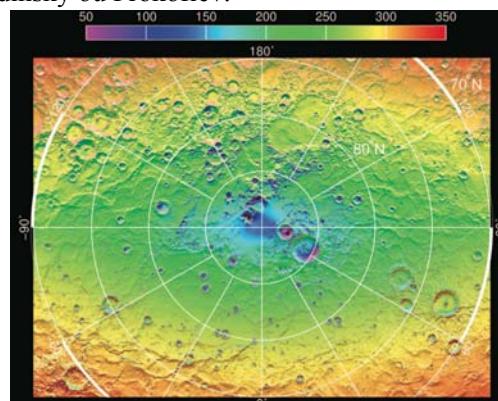
À cette température, la glace d'eau ne peut évidemment pas être stable. Plus exactement, son taux d'évaporation est trop fort pour qu'elle puisse rester à la surface. Mercure ne possédant qu'une exosphère, c'est-à-dire une atmosphère extrêmement ténue dont la pression vaut environ  $P = 10^{-14} \text{ atm}$ , la glace d'eau ne peut être stable à sa surface que pour des températures de l'ordre de 100-110 K, i.e. -173 à -163 °C. Stable signifie ici présente sur des échelles de temps comparables à l'âge du Système Solaire. Nous préférons en effet faire l'hypothèse qu'elle est là depuis longtemps et non juste au moment où nous sommes en mesure de la détecter pour éviter une vision trop anthropocentrique

du phénomène. À une température donnée, la vapeur d'eau et la glace d'eau sont à l'équilibre à une pression appelée pression de vapeur. Le taux d'évaporation est directement proportionnel à cette pression et inversement proportionnel à la température. De fait c'est une grandeur extrêmement sensible à la température et elle peut varier d'un facteur 1 million (6 ordres de grandeur) lorsque la température varie de 100 K à 120 K (de -173 °C à -153 °C). Les calculs thermodynamiques montrent que l'on peut évaporer un mètre d'épaisseur de glace d'eau en 1 milliard d'années si la température est de 110 K. On en évapore 1 km d'épaisseur dans le même temps si la température augmente seulement de 10 K ! Avec cet éclairage, on comprend mieux d'ailleurs la fonte accélérée de nos propres calottes polaires avec quelques dixièmes de degré d'augmentation de température moyenne. Un apport plus récent de glace doit pouvoir, si tel est le cas, compenser en quantité ou en régularité cette évaporation. Il est aussi envisageable qu'une glace délivrée ici il y a longtemps soit à l'abri sous une couche de poussière de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur et puisse ainsi être stable à l'échelle de milliards d'années dans des zones un peu plus tempérées. La source d'eau est effectivement très probablement exogène, d'origine cométaire. Il n'est en effet pas envisageable que l'eau ait été agglomérée sur place dans la nébuleuse au moment de la formation de la planète, du fait de la trop forte température ambiante.

Peut-on trouver à la surface de Mercure des températures de l'ordre de 100 K ? Tout dépend de l'élévation locale du Soleil. À l'équateur sûrement pas, aux latitudes septentrionales peut-être. Les fonds de cratères situés aux pôles et référencés comme très réfléchissants aux ondes radar, ont de fortes chances de ne jamais voir un rayon de Soleil. En effet, étant donnée la faible inclinaison de l'axe de rotation de Mercure par rapport au plan de son orbite, quelles que soient les saisons, et sa stabilité attendue sur quelques milliards d'années, l'éclairage du Soleil y est rasant. Il n'existe hélas pas de mesures détaillées de la température de la surface de Mercure qui nous permettent de faire la corrélation directe entre d'éventuelles très basses températures aux pôles et les zones réfléchissantes au radar. La seule manière d'appréhender les températures possibles est de les calculer. Les observations avec les caméras donnent les conditions d'illumination annuelles et les mesures altimétriques laser fournissent une topographie des terrains cratérisés qui détaille la forme des cratères. Seul un modèle thermique supposant la composition et la structure du régolithe recouvrant ces terrains est alors apte à estimer, à partir de ces observations, la température dans les cratères en prenant en compte leur latitude, leur diamètre et leur forme.

Un tel modèle a récemment permis de calculer au pôle

Nord de Mercure les températures maximales annuelles et les moyennes annuelles (figure 4). Il prédit qu'en dessous de 83° de latitude Nord, la glace d'eau n'est stable que si elle est enfouie sous une couche de 10 cm de poussière de régolithe non glacé. À plus hautes latitudes, les grands cratères d'impact sont suffisamment froids pour maintenir en surface de la glace d'eau. La grande majorité des endroits où la température moyenne annuelle est de moins de 100 K est brillante en radar alors que lorsqu'elle dépasse 100 K, on n'y trouve pas de dépôt brillant en radar. Ceci suggère donc bien que les taches radar sont dues à la présence d'une espèce volatile qui n'est pas stable au-dessus de 100 K, donc très probablement de la glace d'eau. C'est le cas des grands cratères Kandinsky ou Prokofiev.



**Figure 4** – Carte de température moyenne biannuelle du pôle Nord de Mercure calculée par Paige et collaborateurs (DOI : 10.1126/science.1231106) à partir des cartes topologiques de l'altimètre laser MLA et des conditions d'illumination déterminées par les caméras MDIS embarqués sur la sonde MESSENGER. C'est la température à 2 cm de profondeur, considérée comme une bonne approximation de la température constante sous la surface. Les couleurs codent la température en kelvin. On reconnaît le plus gros cratère de la région, nommé Prokofiev, à 86° de latitude Nord, et son voisin nommé Kandinsky.

Cependant il a été aussi montré que les spots radar pouvaient aussi être associés à des terrains plus sombres que la réflectance moyenne de la surface. Ces dépôts sombres seraient dus à des dépôts organiques plus réfractaires que la glace d'eau, directement déposés là, en même temps que l'eau, dans un même processus ou bien formés in situ par une synthèse organique à basse température. Cette couverture permettrait de protéger la glace d'eau en profondeur sous une couche de matériau organique plus chaude, localement suffisamment fine pour rester transparente aux ondes radar. Cette interprétation pointerait directement les comètes comme source de ces dépôts polaires.

La baisse de température aux pôles est donc propice au maintien d'une humidité séculaire, empreinte mesurable du possible apport d'eau cométaire sur les planètes telluriques. Paradoxalement sur la planète la plus proche du Soleil. ■