

Mercure, sœur de nébuleuse

Cécile Ferrari, Professeure à l'Université Paris–Diderot & Chercheure de l'Unité Mixte de Recherche AIM (CNRS-CEA/Irfu-Université Paris Diderot)

La mission NASA/Messenger (2011-2015) a révélé que la plus petite des planètes telluriques, dont la taille relative du cœur de fer étonne, n'est pas aussi exotique qu'on le pensait. L'abondance des éléments radioactifs des roches à sa surface est tout à fait similaire à celle des chondrites et de ses sœurs telluriques.

La planète Mercure, enfouie au cœur de notre Système solaire, à 0,39 UA de notre étoile, se rappelle régulièrement à notre bon souvenir par ses tentatives régulières d'éclipse du Soleil, plus connues sous le nom de transit, attendues certaines années début mai ou mi-novembre (n'y voyez aucune corrélation avec l'actualité française). Le prochain aura lieu le 9 mai 2016. Cependant l'« actualité » de cette star de la banlieue proche du Soleil, c'est aussi la reprise récente de son exploration spatiale par la NASA (Messenger, 2011-2015), bientôt poursuivie par l'Europe et le Japon (mission ESA-JAXA Bepi-Colombo à l'horizon 2020-2025), après presque 40 ans d'abandon.

Des premiers survols de la sonde Mariner 10 en 1974 et 1975, on a pu constater que la surface de Mercure a peu évolué depuis 4,5 milliards d'années, car elle est très cratérisée au contraire de ses voisines telluriques. On espère de facto y lire les premières étapes de formation de la croûte qui ont été effacées par ailleurs. Mercure serait alors un témoin des premières étapes de la formation des planètes telluriques. Pourtant Mercure présente des traits plutôt exotiques. Elle est trois fois plus petite que la Terre, elle semble abriter un énorme cœur de fer. En effet, une très haute densité globale, de l'ordre de $5\,430\text{ kg/m}^3$, donne l'idée d'un cœur dense et gros de fer et de nickel, occupant 80 % du volume de la planète.

Elle est en cela unique en son genre. Exotique alors ou sœur de nébuleuse proto-planétaire ? Cette particularité interroge donc sur le scénario de sa formation. La température excessive au plus proche du jeune Soleil aurait-elle empêché la condensation des éléments les plus légers dans la nébuleuse proto-solaire à partir de laquelle Mercure se serait formée ? Ou bien une éjection importante de matière du jeune Soleil aurait-elle provoqué l'évaporation d'une partie de la roche à la surface et érodé Mercure pour la réduire à une si petite taille ?

Ou bien encore un impact géant aurait-il arraché le manteau rocheux d'un Mercure adolescent ? Doit-on croire que cette planète est faite de peu d'éléments volatils, évaporés du fait de hautes températures ? Le piège n'est pas loin.

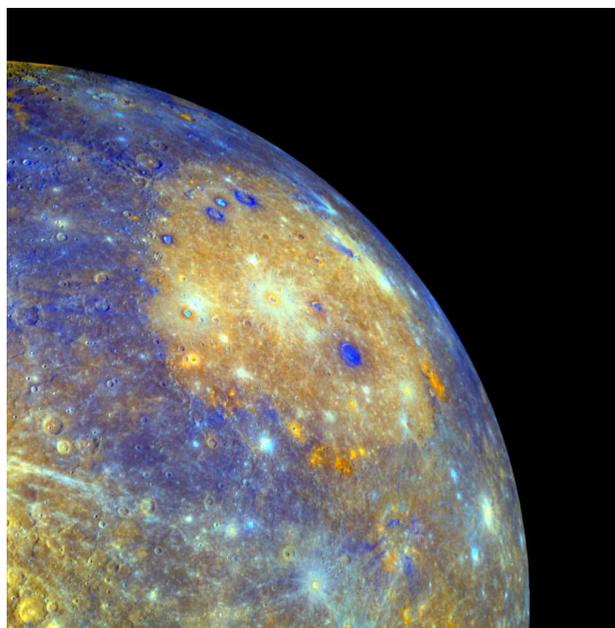


Fig.51. Le bassin Caloris observé par la caméra grand-angle de l'instrument MDIS de la sonde Messenger. Les couleurs sont exagérées pour marquer des différences de composition minéralogique, en réalité très subtiles. La résolution est de 2,3 km/pixel.

Jusqu'à récemment, il manquait une évaluation claire de la présence ou non d'éléments légers pour se forger une conviction à ce sujet. Quelques indices cependant sont apparus avant l'arrivée de Messenger. La sonde Mariner 10 a détecté une exosphère d'éléments volatils tels que le potassium K, le sodium Na et le calcium Ca. Grâce à l'observation spectroscopique de la surface de Mercure depuis le sol terrestre, on a constaté sa similitude avec les hauts plateaux feldspathiques de la Lune. L'idée vient alors de mesurer la radioactivité de la surface dont le potassium est le

premier contributeur. Connaître la radioactivité des roches c'est aussi rassembler des indices pour comprendre l'histoire de l'intérieur de la planète car ce sont les éléments radioactifs qui génèrent la chaleur sur de longues échelles de temps et donc contrôlent pour beaucoup son évolution thermique. Cette évolution se manifeste par son volcanisme, l'existence d'un champ magnétique généré par une dynamo... Les éléments naturels radioactifs émettent dans le domaine des rayonnements gamma. Les éléments prépondérants dans les roches (Si, Mg, O, Ca, Fe, Ti, S entre autres), du fait de leurs bombardements par les rayons cosmiques (protons et particules α de haute énergie) et de leurs interactions avec les neutrons rapides produits, se désexcitent aussi en émettant des rayons de haute énergie. L'émission gamma de la surface nous renseigne donc sur la composition des roches dans les premiers mètres de profondeur.

Mercure a attendu longtemps le retour de visiteurs terrestres. Il est en effet difficile d'acquérir la vitesse suffisante pour la rattraper sur son orbite, lois de Kepler obligent. La sonde Messenger arrive en mars 2011 après un voyage de 7 années et plusieurs survols de Vénus pour prendre de la vitesse par rapport au Soleil suivant le principe de la fronde gravitationnelle. De plus, les conditions d'observation sont difficiles car il y fait très chaud, plus de 700 K en journée à la surface et 90 K la nuit. La sonde Messenger recouverte d'isolants thermiques dernier cri, à l'ossature de titane, abrite une électronique de bord qui peut donc fonctionner à une température de 20 °C derrière des panneaux à plus de 370 °C. L'orbite est aussi adaptée pour limiter le rayonnement thermique de Mercure sur la sonde tout en offrant des passages à basse altitude sur le pôle Nord pour obtenir une bonne résolution spatiale de la surface. Les orbites sont polaires, durent 12 h, alignées sur les terminateurs jour/nuit. Elles frôlent le pôle Nord à environ 200 km d'altitude.

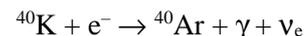
Messenger a embarqué une multitude d'instruments dont le spectromètre GRNS (acronyme de « Gamma Ray and Neutron Spectrometer »), apte à mesurer les rayons gamma d'énergie comprise entre 0,25 et 9 MeV. Ceci se fait grâce à un détecteur au Germanium très pur (High Purity Germanium ou HPGe) qui est sensible aux rayons gamma. Le rayon gamma incident y génère des électrons et un courant électrique dont l'intensité est proportionnelle à l'énergie du photon déposée. Le nombre de photons comptés à une énergie donnée résulte d'une calibration méticuleuse de l'instrument. Il baigne de fait dans un scintillateur plastique qui permet de

distinguer ce qui vient de la cible du bruit ambiant car hélas 80 % des photons gamma détectés proviennent des interactions du vent solaire avec les matériaux qui composent l'instrument. Pour améliorer la détection de ces pics d'émission à des énergies discrètes, les comptages sont moyennés sur plusieurs orbites, sur des durées de l'ordre d'une semaine, et rapportés en comptages par minute.

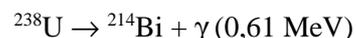


Fig.2. La sonde Messenger en cours de tests de tenue aux vibrations importantes que génère la séquence de lancement.

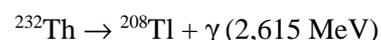
Les éléments prépondérants dans l'émission radioactive des roches sont les isotopes du potassium ^{40}K , du thorium ^{232}Th et de l'uranium ^{235}U . Le noyau de potassium ^{40}K , par capture d'un électron des couches profondes, produit de l'argon ^{40}Ar qui se désexcite en produisant un photon γ à 1,46 MeV et un neutrino électronique ν_e suivant la réaction :



avec un temps de demi-vie $\tau = 1,248 \times 10^9$ ans. La probabilité de cette désintégration est de 11 %, le potassium ^{40}K se désintégrant plus probablement en ^{40}Ca suivant une désintégration β^- (production d'un électron et transformation d'un neutron en proton). L'uranium ^{238}U , qui constitue 99,3 % de l'uranium naturel, suit une chaîne de désintégrations β plus complexe, dont la plus probable est :



avec un temps de demi-vie de $\tau = 4,47 \times 10^9$ ans et une probabilité de 46 %. D'autres photons sont en effet émis par la désintégration du bismuth à plus haute énergie. Enfin l'isotope ^{232}Th suit aussi une chaîne de désintégrations radioactives α qui le conduisent dans un premier temps à se transformer en tantale suivant :



avec un temps de demi-vie de $\tau = 14 \times 10^9$ ans. La probabilité d'une telle désintégration du ^{232}Th en ^{208}Tl en ^{208}Pb est de 36 %.

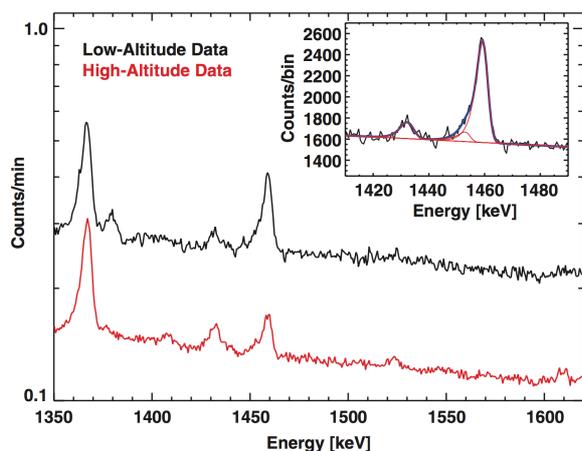


Fig.3. Comptage de l'émission radioactive du potassium à 1,461 MeV mesurée à haute (rouge) et basse (noire) altitude par le spectromètre GRSN de la sonde Messenger. Les autres pics correspondent à l'interaction des neutrons rapides émis par la surface de Mercure avec la sonde.

Le compte des photons émis par la surface permet donc de remonter à l'abondance de ces éléments. Ils sont comparés à ceux générés par des modèles calculant l'émission γ d'un sol de composition minéralogique donnée pour être convertis en abondance (en partie par million – ppm – ou par milliard – ppb). On comprend au vu des temps de demi-vie que ces trois isotopes soient aptes à générer de la chaleur en interne sur les durées de l'ordre de l'âge du Système solaire. Les flux de chaleur produits par ces désintégrations sont à l'heure actuelle de l'ordre de 10^{-12} W/kg de roche et ont été environ 20 fois plus importants il y a 4,5 milliard d'années.

Les abondances mesurées pour ces trois éléments sont sur l'hémisphère nord de Mercure de 1150 ± 220 ppm pour K, 220 ± 60 ppb pour Th et 90 ± 20 ppb pour U. Le rapport d'abondance K/Th de l'élément modérément volatil sur le réfractaire, est de 5200 ± 1800 , en bonne harmonie avec les mesures faites dans la croûte terrestre, les météorites martiennes ou par les spectromètres CRS embarqués sur les atterrisseurs vénusiens russes. Il diffère par contre totalement de celui mesuré sur la Lune (360). Le rapport Th/U est lui de $2,5 \pm 0,9$. Cette abondance somme toute « normale » de potassium élimine les théories de formation exotiques citées plus haut. En effet, les modèles d'évaporation de la croûte de Mercure dans une nébuleuse chaude à 2 500 K ou 3 000 K prévoient un épuisement important en K et en U que l'on

n'observe donc pas. Ces modèles prévoient en effet un rapport Th/U de l'ordre de 1 000 ! Les théories d'impact sont aussi exclues par là même.

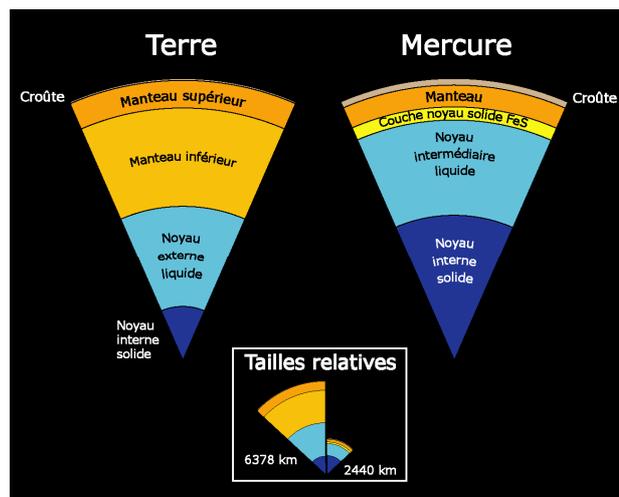


Fig.4. Comparatif des modèles de structure interne de la Terre et de Mercure.

Des modèles de formation ont été élaborés pour expliquer la faible teneur en fer des minéraux à la surface de Mercure, observée en spectroscopie proche-infrarouge, depuis la Terre, entre les missions Mariner 10 et Messenger. Ils prédisent la formation de Mercure à partir de condensats d'éléments volatils et d'une proportion importante d'éléments réfractaires plus abondants près du Soleil. Mercure aurait pu se former à partir de chondrites à fort rapport métal / silicates. Les rapports prédits seraient $\text{K/Th} \approx 4\,300$ et $\text{Th/U} \approx 3$, tout à fait compatibles avec les mesures du spectromètre GRSN. Les abondances de ces éléments radioactifs indiquent par ailleurs que la radioactivité de Mercure a largement baissé depuis sa formation et qu'elle peut expliquer un volcanisme important juste après le bombardement lourd tardif à $-3,8$ milliards d'années, plus circonscrit ensuite.

Une certaine harmonie règnerait donc aux origines des planètes telluriques Mercure, Vénus, Gaïa et Mars, par-delà leurs différences. Un message de sororité nébuleuse, de fraternité mythologique ? À méditer.

Crédits images : NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington.

Sur la Toile : <http://messenger.jhuapl.edu/>