

# COME-IN

## Structure interne et évolution de Mercure

Tim Van Hoolst (Observatoire royal de Belgique/KU Leuven) - Bernard Charlier (Université de Liège) - Stefaan Cottenier (Université de Gand) - Wim van Westrenen (VU Amsterdam) - Olivier Namur (KU Leuven) - Attilio Rivoldini (Observatoire royal de Belgique) - Jurriën Knibbe (KU Leuven/Observatoire royal de Belgique) - Marie-Hélène Deproost (Observatoire royal de Belgique) - Jan Jaeken (Université de Gand)

## RESUME

### *Contexte et objectifs*

Mercure a longtemps été considérée comme la planète la moins connue de notre système solaire. Jusqu'à présent, seuls deux satellites ont visité Mercure. Mariner 10 a approché Mercure à trois reprises en 1974-1975 et MESSENGER (MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry and Ranging) a orbité autour de la planète entre le 18 mars 2011 et le 30 avril 2015. Avec la quantité des données recueillies par MESSENGER de la NASA et le lancement de la mission BepiColombo de l'ESA/JAXA le 20 octobre 2018 (insertion en orbite prévue en décembre 2025), l'attention de la communauté planétaire sur Mercure est plus forte que jamais. L'un des principaux objectifs de ces missions et de nombreuses études théoriques, observationnelles et expérimentales est de mieux comprendre la structure interne et l'évolution de cette petite planète terrestre.

Cependant, les mesures satellitaires ne suffisent pas à elles seules à atteindre cet objectif. Un problème majeur est que les données expérimentales sur le comportement à haute pression des compositions représentatives de Mercure sont rares. En conséquence, les études sur l'intérieur de Mercure ont dû soit simplifier les modèles de propriétés intérieures, soit utiliser des modèles thermodynamiques pour prédire la minéralogie intérieure basée sur des expériences effectuées dans des conditions de pression, de température, de composition et de fugacité en oxygène en dehors de celles invoquées pour Mercure. Des données supplémentaires sont donc nécessaires sur le comportement des matériaux planétaires dans les conditions pertinentes.

Avec le projet COME-IN, nous visons à faire progresser notre compréhension de Mercure en intégrant des approches complémentaires de la pétrologie magmatique, de la physique des minéraux à haute pression, de la science des matériaux, de la géodésie et de la géodynamique en plus d'utiliser les contraintes fixées par les données d'observation récentes. Pour atteindre notre objectif, un ensemble d'objectifs spécifiques a été identifié en s'appuyant sur l'expertise complémentaire des cinq partenaires. Ils sont liés à la structure primordiale de Mercure après accréation, aux processus magmatiques responsables de la différenciation et l'évolution de Mercure, à la caractérisation des propriétés physiques et de la structure du noyau riche en fer, ainsi qu'à la structure intérieure globale et à l'évolution thermique de Mercure.

### *Résultats*

Nous décrivons ici les principaux résultats du projet COME-IN organisés selon les quatre principaux thèmes de recherche.

#### *Equilibre primordial entre liquides métalliques et silicatés*

Nous avons étudié expérimentalement le partitionnement des éléments entre métal-silicate et sulfure-silicate dans des liquides silicatés réduits sur une large gamme de teneurs en S en fonction de l'état redox, à une pression de 1 GPa et des températures comprises entre 1833 et 1883 K. Il a été constaté que dans des conditions plus réductrices que  $\Delta W = -3$  à  $-4$ , le partage métal-silicate de la majorité des éléments sidérophiles s'écarte considérablement des valeurs correspondant à leur(s) état(s) de valence attendu(s). Ces nouveaux résultats fournissent

une base expérimentale étendue pour des études de la différenciation de Mercure dans des conditions (très) réduites.

Nous avons également étudié la probabilité de l'existence d'une couche de sulfure de fer à la limite noyau-manteau de Mercure en comparant de nouvelles données chimiques de surface, obtenues par le spectromètre à rayons X à bord de MESSENGER, avec des modèles géochimiques contraints par des expériences à haute pression en conditions réductrices. Nous avons construit un ensemble de données comprenant 233 mesures du rapport Ti/Si. Des expériences d'équilibres ont montré qu'aux conditions de formation du noyau de Mercure, Ti est chalcophile et non sidérophile, ce qui fait de Ti un traceur utile de la formation d'une couche de FeS. En comparant les résultats du modèle et les données de surface, nous avons montré que Mercure n'avait probablement pas de couche de FeS, et dans le cas où elle en aurait une, elle n'aurait que quelques kilomètres d'épaisseur ( $< 13$  km). Nous avons également montré que le noyau métallique Fe(Si) de Mercure ne peut pas contenir plus de  $\sim 1,5\%$  pds de soufre et que la formation du noyau dans des conditions réductrices est responsable du rapport Ti/Al légèrement sous-chondritique de la surface de Mercure.

#### *Evolution manteau-croûte*

MESSENGER a fourni des données géochimiques pour les roches de surface sur Mercure. Nous avons utilisé la composition en éléments majeurs de ces laves pour définir les conditions de fusion et les sources résiduelles du manteau sur Mercure. Il a été démontré que les basaltes de surface sont produits par une fusion partielle de 10 à 50% de sources mantelliques lherzolitiques. Le degré de fusion moyen est plus faible pour les jeunes plateaux volcaniques du nord (NVP ;  $0,27 \pm 0,04$ ) que pour les anciens fortement cratérisés (IcP-HCT ;  $0,46 \pm 0,02$ ), indiquant que la productivité en magma a diminué avec le temps. La température potentielle du manteau requise pour former des laves mercuriennes et la profondeur de fusion initiale diminuent également avec l'âge, depuis  $1650^\circ\text{C}$  et 360 km pour les High-Mg IcP-HCT jusqu'à  $1410^\circ\text{C}$  et 160 km pour les plus jeunes laves de la NVP. Cette évolution suggère un fort refroidissement séculaire du manteau de Mercure entre 4,2 et 3,7 Ga il y a et explique pourquoi très peu d'activité magmatique s'est produite après 3,7 Ga.

Nous avons également étudié expérimentalement les équilibres de phase de cinq compositions sans soufre. Des expériences ont été réalisées à  $1480\text{-}1100^\circ\text{C}$  et 1 kbar dans des conditions réductrices similaires à celles du manteau de Mercure. Nous avons trouvé une séquence de cristallisation commune composée d'olivine, de plagioclase, de pyroxènes et de tridymite pour tous les magmas testés. En combinant les résultats expérimentaux avec la cartographie géochimique, nous avons identifié plusieurs provinces minéralogiques : les plaines volcaniques septentrionales dominées par le plagioclase, la province High-Mg fortement dominée par la forstérite, et les plaines intermédiaires composées de forstérite, plagioclase et enstatite. Cela implique une évolution temporelle de la minéralogie depuis les laves les plus anciennes, dominées par les minéraux mafiques, jusqu'aux plus jeunes, dominées par le plagioclase. Cette observation est compatible avec une pression et un taux de fusion du manteau décroissants au fil du temps.

Nous avons calculé l'épaisseur de la croûte en tenant compte des variations latérales de la densité de la croûte. Nous montrons que l'épaisseur locale est corrélée avec le degré de fusion du manteau requis pour produire les roches de surface. La fusion à faible degré du manteau sous les plaines volcaniques du Nord a produit une croûte mince ( $19 \pm 3$  km) tandis que le degré de fusion le plus élevé dans l'ancienne région riche en Mg a produit la croûte la plus épaisse ( $50 \pm 12$  km), réfutant l'hypothèse d'excavation du manteau par un impact important dans cette région.

#### *Structure du noyau*

La vitesse sismique (VP) et la densité des métaux liquides Fe-Si à haute température (1400-1900 K) et haute pression (2-6 GPa), pertinentes pour le noyau de Mercure, ont été mesurées dans

deux campagnes expérimentales à Chicago (Illinois, USA) et Grenoble (France). Les mesures de densité des liquides métalliques Fe-Si montrent que Si réduit considérablement la densité des liquides métalliques riches en Fe. Les mesures VP montrent que Si augmente de manière significative la VP du métal liquide riche en Fe. Ceci contraste fortement avec l'effet réducteur de S sur la VP des liquides riches en Fe dans la gamme de pressions examinée (2-6 GPa) qui a été rapporté par d'autres études expérimentales (par exemple Nishida, 2013; Jing et al., 2014). Les résultats préliminaires indiquent que les données sismiques peuvent aider à distinguer le Fe-S et le Fe-Si dans le noyau de Mercure.

Un modèle basé sur les budgets d'énergie et d'entropie a été développé pour étudier dans quelles conditions le noyau de Mercure peut maintenir une dynamo jusqu'à aujourd'hui. Le silicium dans le noyau entraîne des quantités de chaleur latente significativement plus importantes générées lors de la congélation du Fe-Si par rapport au soufre et rend possible l'action de la dynamo pendant toute l'évolution du noyau. L'action de la dynamo peut également être étendue à nos jours si des éléments radioactifs sont présents dans le noyau avec une abondance d'environ un dixième de l'abondance crustale, ou si l'exsolution d'éléments légers hors du noyau est un processus continu.

Trois modèles d'évolution thermique différents ont été développés pour le noyau qui prennent en compte la présence possible d'une couche stratifiée de manière stable au sommet du noyau. L'existence d'une telle couche est suggérée par les modèles d'évolution thermique et peut aider à expliquer le champ magnétique observé. Nous avons montré que l'existence d'une couche stratifiée rend plus d'entropie disponible pour la dynamo.

Nous avons développé un modèle thermodynamique cohérent pour les liquides Fe-Ni-S qui inclut le mélange non idéal des alliages Fe-S et est en accord avec les récentes expériences de laboratoire sur la densité et la vitesse acoustique de ces alliages. Cela montre que Mercure supposant un noyau Fe-S nécessiterait plus de soufre dans leur noyau pour s'adapter à la contrainte de densité moyenne du noyau que les modèles précédents.

Nous avons effectué des calculs *ab initio* de l'anisotropie acoustique à des pressions et des températures élevées de cristaux de hcp avec des défauts d'empilement. Les résultats montrent qu'un agrégat de cristaux de fer compacts avec un empilement aléatoire, alignés principalement Nord-Sud, est cohérent avec l'anisotropie sismique observée dans la graine de la Terre.

#### *Modèles pour l'évolution interne*

Nous avons développé un modèle pour l'obliquité de Mercure prenant en compte les variations d'obliquité et l'écart par rapport à la coplanarité induite par la lente précession du péricentre. Nous avons montré que ces effets doivent être pris en compte lors de la détermination du moment d'inertie polaire à partir de l'obliquité observée avec la précision attendue de BepiColombo et que les effets des marées imposent une limite inférieure à la dissipation des marées.

Nous avons interprété les nouvelles estimations récentes (2019) du moment d'inertie et du nombre de Love de marée en termes de structure interne de Mercure. Nos résultats montrent qu'à 1 sigma, les modèles Fe-S ont un rayon de noyau compris entre 1972 et 2000 km, tandis que pour les modèles Fe-Si, le noyau peut être environ 20 km plus grand. Le rayon de la graine est inférieur à 1500 km (à 3 sigma) pour les modèles Fe-S et entre 1306 km et 2007 km pour un noyau Fe-Si.

Nous avons démontré qu'une couche de noyau externe stratifiée conduit à des températures plus élevées du manteau et du noyau externe de Mercure par rapport aux noyaux à convection complète. En conséquence, le soufre, qui abaisse la température de fusion du noyau de manière plus drastique que le silicium, n'est pas un ingrédient nécessaire du noyau riche en Fe de Mercure pour le maintenir partiellement liquide jusqu'à présent. Nous avons montré que la convection du noyau et l'action de la dynamo actuelle peuvent être entraînées par la solidification ascendante d'un noyau Fe-Si, tout en ayant une couche de noyau liquide supérieure stratifiée thermiquement.

Nous avons effectué des calculs d'impact et montré que l'asymétrie hémisphérique d'anciens grands cratères sur Mercure peut être produite en impactant sur Mercure dans une rotation autrefois synchrone (résonance spin-orbite 1:1) ou une ancienne résonance spin-orbite 2:1, mais pas dans la résonance spin-orbite 3:2 actuelle. Nous avons conclu que Mercure avait auparavant probablement un état de rotation stable différent et que l'impacteur qui a causé le bassin de Caloris est un candidat possible pour avoir initié une transition de l'ancien à l'état de rotation actuel de Mercure.

**Keywords:** planètes terrestres, Mercure, structure interne, pétrologie, géophysique