

## STEM

### The Structure and Evolution of Mercury's core

Tim Van Hoolst (Promoteur, Royal Observatory of Belgium/KU Leuven) – Attilio Rivoldini (Royal Observatory of Belgium) – Jurriën Knibbe (Royal Observatory of Belgium) – Fleur Seuren (Royal Observatory of Belgium) – Jérémy Requier (Royal Observatory of Belgium) – Santiago Andres Triana (Royal Observatory of Belgium) – Marie-Hélène Deproost – Yue Zhao

## RÉSUMÉ

### Contexte et objectifs

Mercure, la plus petite planète du système solaire et la plus proche du soleil, présente plusieurs caractéristiques uniques qui peuvent contribuer à améliorer notre compréhension sur la formation, la structure, l'évolution et l'habitabilité des planètes terrestres. La première mission qui a survolé Mercure, Mariner 10 en 1974, a montré que Mercure est beaucoup plus massive que sa taille le suggère. Cela implique un rapport métal/silicate exceptionnellement élevé et un noyau de fer qui, par rapport à la taille de la planète, est beaucoup plus grand que celui de la Terre, de Mars et de Vénus. Comparé aux autres planètes du Système solaire, Mercure a de loin l'orbite la plus elliptique autour du Soleil. Elle est le seul corps du Système solaire en résonance spin-orbite 3:2 - Mercure tourne en moyenne exactement trois fois sur elle-même le temps d'effectuer deux orbites complètes autour du Soleil. Cette propriété unique induit des petites variations périodiques de sa vitesse de rotation, appelées libration, qui peuvent être utilisées pour sonder son intérieur profond, le sujet central de ce projet de recherche.

L'observation de ces librations, par des radars terrestres et par des mesures de *radio science* et d'altimètre laser effectuée par la sonde spatiale MESSENGER de la NASA, a révélé que le noyau est mécaniquement détaché du manteau solide et, en conséquence, doit être liquide à proximité de l'interface noyau-manteau. En outre, Mercure a un champ magnétique global, généré très probablement par des écoulements de fluides dans son noyau fondu et électriquement conducteur, semblable au champ géomagnétique de la Terre. Hormis la Terre, Mercure est le seul autre exemple de planète tellurique dotée d'un champ magnétique autoentretenu. Ce champ est très probablement généré par des écoulements de fluides dans son noyau fondu et électriquement conducteur, semblable au champ géomagnétique généré dans le noyau de la Terre. Il fait de Mercure un objet d'étude important pour tester et développer les théories du magnétisme planétaire.

L'objectif de ce projet était d'améliorer et d'affiner notre compréhension sur la formation et l'évolution de l'intérieur de Mercure à partir des données de rotation actuelles et futures, complétées par d'autres données géophysiques, en poursuivant deux voies distinctes, mais étroitement liées et en s'appuyant sur l'expertise du groupe de recherche planétaire de l'Observatoire royal de Belgique. Dans le cadre de ce projet, nous avons prévu d'étendre la théorie de la libration en y incluant les effets des écoulements du noyau liquide et de développer une nouvelle modélisation de l'état thermique du noyau afin de faciliter et d'améliorer l'interprétation des données géodésiques en termes de propriétés intérieures. La géodésie planétaire—l'étude de la rotation, du champ de gravité et de la forme d'une planète—constitue actuellement la principale source d'information sur l'intérieur profond de Mercure.

### Résultats

Nous décrivons ci-dessous les principaux résultats du projet STEM, organisés selon les deux principaux thèmes de recherche.

### *Structure interne et évolution (WP1 et WP3)*

Nous avons développé deux méthodes pour modéliser l'évolution du noyau de Mercure qui prennent en compte pour la première fois la croissance d'un noyau interne solide et l'évolution d'une couche stable au sommet du noyau. Nous avons couplé l'évolution du noyau à celle du manteau et nous avons mis en évidence un effet de rétroaction important entre l'évolution du noyau et celle du manteau de Mercure, contrairement à la Terre par exemple. Comme le transport d'énergie par convection n'est peut-être pas le mécanisme dominant le transport de chaleur dans le manteau pendant toute l'histoire de Mercure et que la transition d'un état convectif à un état conducteur n'est pas bien représentée dans les modèles paramétrés existants d'évolution du manteau, nous avons également développé un nouveau modèle paramétré de l'évolution du manteau qui assure une transition continue de la convection vers la conduction.

Nous avons calculé un grand nombre de scénarios d'évolution de Mercure afin d'évaluer la dépendance de l'évolution et des propriétés du manteau sur la composition du noyau et. Cette étude permet de contraindre la structure interne de Mercure. Nous avons montré qu'une couche stable dans le noyau retarde l'arrêt de la convection du manteau et permet une dynamo passée et présente, en accord avec les observations. Nous avons aussi démontré que le noyau de Mercure doit vraisemblablement contenir des éléments légers autres que le silicium afin de pouvoir générer un champ magnétique à l'heure actuelle. Des modèles avec un faible pourcentage de soufre comme élément léger supplémentaire génèrent une dissipation ohmique suffisante pour alimenter une dynamo passée et présente. Ces modèles ont une graine d'un rayon de  $\sim 1000$  km et une couche limite thermique de  $\sim 600$  km d'épaisseur au moment présent. Nos résultats montrent également que l'arrêt de la convection dans le manteau diminue l'épaisseur de la couche thermiquement stratifiée dans le noyau et augmente sa dissipation ohmique.

### *Écoulements dans le noyau*

Nous avons développé une méthode pour déterminer l'écoulement dans le noyau de Mercure dû à la libration du manteau. Les équations et leurs conditions aux limites ont été résolues par une méthode analytique couplée à un calcul numérique avec le logiciel KORE. Nous avons modélisé le couplage entre le noyau et le manteau par des couples visqueux et électromagnétiques. Il a été démontré, pour des valeurs de paramètres réalistes, que ces couples sont inférieurs de plusieurs ordres de grandeur au couple total nécessaire pour entraîner la libration observée du manteau de Mercure. Compte tenu de la précision limitée de l'amplitude de la libration observée, de l'ordre de quelques pour cent, nous pourrions donc conclure que l'écoulement dans le noyau dû au couplage noyau-manteau peut être négligé dans les études qui interprètent l'amplitude observée de la libration de Mercure en termes de structure intérieure de la planète.

Puisque l'on s'attend à ce que Mercure ait une couche stratifiée stable au sommet du noyau, nous avons spécifiquement considéré comment une telle couche peut affecter l'écoulement du noyau. Nous avons montré que la stratification stable au sommet du noyau supprime fortement le mouvement radial et que l'écoulement dans le noyau s'en trouve limité à la couche proche de la frontière noyau-manteau. Dans ce cas, la libration conduit à un fort écoulement tangentiel près du sommet du noyau, induisant à son tour un champ magnétique non axisymétrique qui présente certaines caractéristiques communes avec le champ magnétique observé de Mercure.

**Mots clés :** planètes tellurique, Mercure, structure interne, évolution.