



HAL
open science

De la loi de la gravitation universelle à MICROSCOPE

Manuel Rodrigues

► **To cite this version:**

Manuel Rodrigues. De la loi de la gravitation universelle à MICROSCOPE. Trajectoire(s), 2022, 1, pp.30-31. hal-03739899

HAL Id: hal-03739899

<https://hal.science/hal-03739899>

Submitted on 28 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

De la loi de la gravitation universelle à MICROSCOPE

PAR MANUEL RODRIGUES, CO-RESPONSABLE SCIENTIFIQUE DE LA MISSION MICROSCOPE, ONERA

Manuel Rodrigues a reçu le Prix Servant de l'Académie des Sciences en 2019.

UN PEU D'HISTOIRE

En 1638, Galilée décrit la première loi mathématique de la chute libre des corps dans son « *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* » posant ainsi les fondements d'une physique décrite par les mathématiques. Il observe alors que les corps chutent indépendamment de leur masse ou de leur composition.

En 1687, Newton publie son ouvrage « *Philosophiæ naturalis principia mathematica* » dans lequel il décrit les lois de gravitation universelle. C'est une théorie qui explique avec précision le mouvement des planètes du système solaire, des satellites, des objets lancés depuis le sol terrestre ou des pommes qui tombent. Avec précision ? Presque, car une énigme va demeurer au sujet de Mercure et alimenter les débuts du XX^e siècle.

En effet, le périhélie (le point de l'orbite le plus éloigné du soleil) de Mercure se décale à chaque révolution de 5599 arcsec (1,5553 degré). Hors la loi de Newton prévoit un décalage de 5554 arcsec. Cette avance du périhélie de Mercure reste insoluble jusqu'à ce qu'Einstein ne propose en 1915 une description de l'univers totalement révolutionnaire et contre intuitive (Einstein, 1916): la loi de gravitation n'est qu'une manifestation de la structure géométrique de l'espace et du temps qui se déforme d'autant plus que l'on s'approche d'objets massifs. C'est le cas de Mercure à proximité du Soleil qui voit sa trajectoire infléchie par la courbure de l'espace-temps imposée par notre astre. Avec sa nouvelle théorie de la gravitation, une généralisation de la relativité restreinte, Einstein calcule que le périhélie devrait avoir un décalage de 5599,7+/-0.04 arcsec par révolution, parfaitement en accord avec les observations. Une autre observation vient confirmer cette nouvelle théorie : sur l'île du Prince, au large de la Guinée, en 1919, Eddington confirme par l'expérience que la trajectoire des rayons lumineux d'étoiles lointaines est déviée par le Soleil comme le prédit la théorie de la Relativité Générale.

LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE ET LA GRAVITATION

C'est le départ d'un bouleversement retentissant dans le domaine de la physique. Cette théorie développée par Einstein prend racine dans un fait divers : la chute d'un ouvrier chutant d'un échafaudage avec ses outils. Einstein imagina alors par la pensée une expérience de physique dans un ascenseur en chute libre et prit conscience que la gravité « s'annule » par le mouvement accéléré. Il posa alors comme principe, l'équivalence entre mouvement accéléré et gravité : en d'autres termes l'universalité de la chute libre des corps, ou l'équivalence de la masse gravitationnelle et de la masse inertielle. Ce principe bien qu'observé depuis Galilée n'a jamais

été expliqué, Einstein l'utilisa alors comme pierre fondatrice de sa théorie. Il sera testé par Bessel en 1830, puis par Eötvös en 1886 et par Dicke en 1963. Avec une précision de plus en plus grande, le test du principe d'équivalence (PE) passe un cap à partir des années 90 avec deux méthodes : 1) l'analyse par tir laser depuis la Terre de la trajectoire de la Lune dans son mouvement avec la Terre autour du Soleil : 2) l'utilisation d'un pendule de torsion dont on va analyser son angle ou ses oscillations en fonction du champ de gravité du Soleil ou de la Terre. En 2012, ces deux expériences approchent une sensibilité proche de 2.10^{-13} (Wagner, 2012 et Williams, 2012). En 2018, l'amélioration des analyses de la trajectoire de la Lune permet d'atteindre 5.10^{-14} (Viswanathan, 2018 et Hofmann, 2018).

Cette course à la précision est motivée par la recherche du Graal en physique : la théorie unificatrice de toutes les interactions. En effet cette unification bute sur un paradoxe apparent : le modèle standard réunissant toutes les forces fondamentales (électromagnétique, forte et faible) semble incompatible avec la gravitation. Les tentatives de modification du modèle standard ou de la relativité générale pour élaborer une théorie unifiée conduisent à la violation du principe d'équivalence (PE). Dans les années 2000, Damour évalue possible une violation à 10^{-14} avec un certain paramétrage de la théorie des cordes (Damour, 2002), une valeur encore bien en dessous de ce qui est détectée par les expériences de pendule de torsion ou tir laser Terre-Lune. Mais les niveaux de violation sont dans la plupart des autres théories bien en deçà. Cela démontre l'intérêt d'une expérience qui apporte un gain significatif de performance.

LA MISSION MICROSCOPE

C'est dans ce contexte qu'en 1999, l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) et l'ONERA propose au CNES la mission MICROSCOPE : test du PE à bord d'un microsatellite de la filière MYRIADE (Touboul, 2001). Le satellite est lancé en avril 2016 et passivé en octobre 2018 pour amorcer sa longue désorbitation qui devrait durer 25 ans. Le satellite comprend un seul instrument: un double accéléromètre différentiel, développé par l'ONERA expert mondial dans le domaine de la mesure précise de l'accélération dans l'espace.

Cette mission est le fruit d'une coopération internationale sous maîtrise d'œuvre du CNES qui a également fourni le lancement et assuré la gestion du segment sol. L'ESA a fourni les propulseurs, le DLR a financé le développement des masses d'épreuves des accéléromètres par le PTB et les travaux de l'équipe du laboratoire de microgravité ZARM à Brème où l'instrument a été testé en chute libre. L'ONERA en collaboration avec l'OCA a développé le centre de mission scientifique et les outils de traitement des données.

L'instrument est constitué de deux paires d'accéléromètres électrostatiques concentriques. Grâce à la compensation de traînée du satellite et au contrôle fin de l'attitude du satellite, la trajectoire de MICROSCOPE suit une « géodésique », c'est-à-dire qu'il est en chute libre permanente. L'expérience consiste à comparer les accélérations de deux masses tests concentriques dans leur mouvement de « chute libre ». On établit alors le paramètre d'Eötvös pour les masses 1 et 2 :

$$\delta(1, 2) = \frac{a1 - a2}{\frac{1}{2}(a1 + a2)} = \frac{\frac{mg1}{m1} - \frac{mg2}{m2}}{\frac{1}{2}\left(\frac{mg1}{m1} + \frac{mg2}{m2}\right)}$$

représentant la différence d'accélération relative des deux masses ou la différence relative des ratios entre masse « grave » et masse « inerte » pour les deux masses.

La première paire d'accéléromètre comporte deux masses de matériaux identiques : un alliage de platine avec 10% de rhodium ; c'est l'accéléromètre de référence, SUREF, pour lequel la différence d'accélération attendue est nulle (le paramètre d'Eötvös est nul). La seconde paire comporte deux masses de matériaux différents : alliage de platine pour la masse interne et alliage de titane (TA6V) pour la masse externe ; c'est l'accéléromètre, SUEP, avec lequel on souhaite vérifier le principe d'équivalence.

Les accéléromètres sont cylindriques et l'axe du cylindre est l'axe privilégié de mesure. Dans son mouvement orbital, le vecteur champ de gravité est projeté sur cet axe avec un taux de modulation égale à la fréquence orbitale pour un pointage inertiel du satellite. Lorsque le satellite est en rotation autour de l'axe normal à l'orbite, le taux de modulation augmente autorisant une fréquence plus élevée pour la mesure de l'accélération, dans une gamme de fréquence plus favorable à la performance de l'accéléromètre. Le satellite MICROSCOPE orbite en moyenne à 710 km d'altitude où l'intensité de gravité est de 7,9m/s.



Visuel du satellite MICROSCOPE en orbite autour de la Terre avec un schéma des deux paires d'accéléromètres SUEP et SUREF. (crédit CNES / Virtual_IT2017)

L'objectif de performance de la mission est de réaliser un test du PE avec une sensibilité de 10^{-15} , soit mesurer une différence d'accélération de $7,9 \cdot 10^{-15} \text{m/s}^2$. De manière imagée, le ratio de 10^{-15} correspond à la variation relative de poids d'un supertanker de 500 000 tonnes quand une mouche drosophile de 0,5mg se pose dessus.

LES PREMIERS RÉSULTATS DE LA MISSION MICROSCOPE

Publiés en décembre 2017 dans la prestigieuse revue Physical Review Letters, les premiers résultats montrent que le principe d'équivalence est toujours valide à un niveau de $1,9 \times 10^{-14}$ (Touboul, 2017). Ces résultats reposent sur le traitement de seulement 7% des données aujourd'hui disponible.

Depuis le traitement de l'ensemble des données sur le SUEP et SUREF a permis de réduire les erreurs statistiques et systématiques pour se rapprocher de la sensibilité objective. Ces traitements ont demandé de gros efforts d'analyse des craquements du satellite qui entrent en compétition avec le signal gravitationnel recherché à la fréquence de mesure. Des simulations, des modélisations des craquements, des processus de détection et d'élimination des craquements dans les données ont été menés. Tous ces processus ont été validés et ont permis la soumission des résultats finaux dans les revues Physical Review Letters et Classical Quantum Gravity. Le processus de revue des articles est en cours par des comités scientifiques et une fois terminé donnera lieu à une annonce officielle.

Acronymes :

MICROSCOPE : Micro Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence

DLR : Agence aérospatiale allemande

PTB : agence nationale de métrologie (Allemagne)

BIPM : Bureau International des Poids et Mesures

ZARM : Centre des technologies spatiales appliquées et de microgravité (Brème, Allemagne)

Références :

A. Einstein, *Die grundlage der allgemeinen relativitätstheorie*, Ann. Phys. (Berlin) 49, 252 (1916); English translation in A. Engel and E. Schucking, *The Collected Papers of Albert Einstein* (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1989), Vol. 6, doc. 30.

P. Touboul, M. Rodrigues, G. Métris, and B. Tatry, MICROSCOPE, testing the equivalence principle in space, *C. R. Acad. Sci. Paris Ser. IV 2*, 1271 (2001).

Damour T, Piazza F and Veneziano G; Runaway Dilaton and Equivalence Principle Violations, *Physical Review Letters* 89, 081601 (2002).

T. A. Wagner, S. Schlamminger, J. H. Gundlach, and E. G. Adelberger, Torsion-balance tests of the weak equivalence principle, *Classical Quantum Gravity* 29, 184002 (2012).

J. G. Williams, S. G. Turyshev, and D. H. Boggs, Lunar laser ranging tests of the equivalence principle, *Classical Quantum Gravity* 29, 184004 (2012).

P. Touboul et al. ; MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle, *Phys. Rev. Lett.* 119, 231101 (2017).

Viswanathan V, Fienga A, Minazzoli O, Bernus L, Laskar J and Gastineau; The new lunar ephemeris INPOP17a and its application to fundamental physics, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 476, Issue 2, p.1877-1888* (2018). ■