



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Comptes Rendus

Mécanique

Manuel Rodrigues

De la loi de la gravitation universelle à MICROSCOPE

Volume 351, Special Issue S4 (2023), p. 73-79


Published online: 8 August 2023

Issue date: 15 September 2023

<https://doi.org/10.5802/crmeca.215>

Part of Special Issue: Hommage à Ismaël Boulliau

Guest editor: Bruno Chanetz (ONERA, BP 80100, 91123 Palaiseau Cedex, France)

 This article is licensed under the
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*Les Comptes Rendus. Mécanique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*

www.centre-mersenne.org

e-ISSN : 1873-7234



A tribute to Ismaël Boulliau / *Hommage à Ismaël Boulliau*

De la loi de la gravitation universelle à MICROSCOPE

From the universal law of gravitation to MICROSCOPE

Manuel Rodrigues[®] ^a

^a Science Co-Investigator of MICROSCOPE, Head of research unit in ONERA, France
Courriel: manuel.rodrigues@onera.fr

Résumé. Depuis Galilée, l'universalité de la chute libre des corps questionne les physiciens : la chute s'effectue dans le vide indépendamment de la masse et de la composition. Avec la théorie de la relativité générale, Einstein révolutionne la compréhension de la gravitation. Le principe d'Équivalence est alors posé par Einstein comme principe fondateur de la relativité générale avec pour première conséquence : l'universalité de la chute libre. Ce principe testé de plus en plus précisément depuis Galilée vient de franchir une nouvelle étape grâce à la mission spatiale MICROSCOPE qui a amélioré la précision du test de deux ordres de grandeur à $2,7 \times 10^{-15}$.

Abstract. Since Galileo, the universality of the free fall of bodies has questioned physicists: the fall in the vacuum is independent of mass and composition. With the theory of general relativity, Einstein revolutionized the understanding of gravitation. The principle of Equivalence is then posed by Einstein as the founding principle of general relativity with the first consequence: the universality of free fall. This principle, tested more and more accurately since Galileo, has just taken a new step thanks to the MICROSCOPE space mission, which has improved the precision of the test by two orders of magnitude to 2.7×10^{-15} .

Mots-clés. Gravitation, Principe d'équivalence, Accéléromètre, Relativité générale, Compensation de traînée, Senseur inertiel.

Keywords. Gravitation, Equivalence principle, Accelerometer, General relativity, Drag-free, Inertial sensing.

Note. Cet article fait suite au colloque organisé par l'Académie des sciences et Alumni-ONERA le 9 octobre 2020 à Hendaye, en hommage à Antoine d'Abbadie. Il reprend et complète une publication antérieure, en partie reproduite ici avec l'autorisation de l'association Alumni-ONERA [1].

Note. This article follows up on the symposium organised by the Académie des Sciences and Alumni-ONERA on 9 October 2020 in Hendaye, in tribute to Antoine d'Abbadie. It takes up and completes an earlier publication, partly reproduced here with the permission of the Alumni-ONERA association [1].

Published online: 8 August 2023, Issue date: 15 September 2023

1. 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 ce jusqu'au début 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 est longtemps restée insoluble jusqu'à ce qu'Einstein ne propose en 1915 une description de l'univers totalement révolutionnaire et contre intuitive [2] : 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 massiques. C'est le cas de Mercure à proximité du Soleil qui voit sa trajectoire infléchiée 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 $5599,7 \pm 0,04$ 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.

2. 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 de la trajectoire de la Lune par tir laser depuis la Terre 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} [3,4]. En 2018, l'amélioration des analyses de la trajectoire de la Lune permet d'atteindre 5×10^{-14} [5], et [6].

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 PE. Dans les années 2000, Damour évalue possible une violation à 10^{-14} avec un certain paramétrage de la théorie des cordes [7], une valeur encore bien en dessous de ce qui est détecté 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.

3. La mission MICROSCOPE

C'est dans ce contexte qu'en 1999, l'Observatoire de la Côte d'Azur et l'ONERA propose au CNES la mission MICROSCOPE : test du PE à bord d'un microsatellite de la filière MYRIADE [8]. Le satellite est lancé en avril 2016 et passivé en octobre 2018 pour amorcer sa longue désorbition 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 :

$$\delta(1,2) = \frac{a_1 - a_2}{\frac{1}{2}(a_1 + a_2)} = \frac{\frac{mg_1}{m_{i1}} - \frac{mg_2}{m_{i2}}}{\frac{1}{2}\left(\frac{mg_1}{m_{i1}} + \frac{mg_2}{m_{i2}}\right)}$$

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'accéléromètres 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 7,9 m/s (Figure 1).

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 $7,9 \times 10^{-15}$ m/s². De manière imagée, le ratio de 10^{-15} correspond à la variation de poids d'un supertanker de 500 000 tonnes quand une mouche drosophile de 0,5 mg se pose dessus.

4. Les résultats de la mission MICROSCOPE

Des premiers résultats sont publiés en décembre 2017 dans la prestigieuse revue *Physical Review Letters* et montrent déjà une amélioration de précision d'un ordre de grandeur du test principe d'équivalence : alors toujours valide à un niveau de $1,9 \times 10^{-14}$ [9]. Ces résultats reposaient sur le traitement de seulement une semaine de donnée (soit 7 % des données aujourd'hui disponibles).

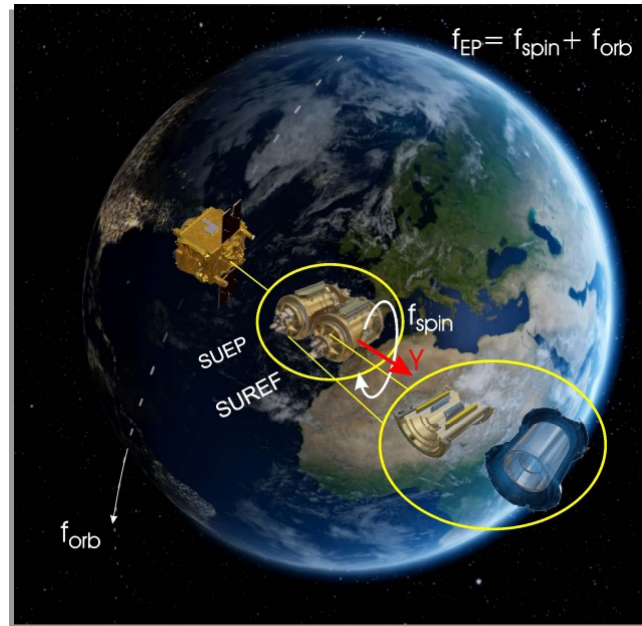


FIGURE 1. Visuel du satellite MICROSCOPE en orbite autour de la Terre avec un schéma des deux paires d'accéléromètres SUEP et SUREF. © CNES/Virtual-IT 2017+ Onera 2017.

Depuis la désorbitation du satellite en octobre 2018, les équipes scientifiques ont concentré leur effort sur le traitement de l'ensemble des données du SUEP et du SUREF. Le satellite a voyagé sur près de 13 193 orbites dont 2500 orbites¹ entièrement dédiées à la science : 1600 orbites pour le SUEP et 800 orbites pour le SUREF. Pour améliorer encore la précision du test par rapport à la publication de 2017, il a été nécessaire de relever plusieurs défis.

Le premier défi a consisté à combiner les résultats de ces 2500 orbites répartis sur les deux paires d'accéléromètres et sur les 2 ans sous forme de segments de 20 à 120 orbites non contigus. La réduction des erreurs statistiques par l'accumulation de données est une technique couramment utilisée en métrologie. Dans le cas présent, le signal recherché est à une fréquence bien précise et en phase avec le signal de gravité terrestre. Donc, réaliser une moyenne du signal sur un nombre de période entière réduit par \sqrt{T} la contribution du bruit stochastique, T étant la durée totale de l'échantillon. Pour des échantillons fragmentés sur les deux ans sous formes de segments de 20 à 120 orbites, il faut utiliser le signal de gravité comme signal de référence pour réaliser l'équivalent d'une démodulation synchrone. Le signal de gravité varie à la fréquence orbitale modulo la fréquence de rotation du satellite ($f_{EP} = f_{orb} + f_{spin}$) et est numériquement reconstitué à partir d'un modèle établi lors des missions spatiales CHAMP, GRACE, GOCE et GRACE-FO, de la restitution de l'orbite par GPS (7 m de résolution sur la position du satellite est suffisant) et de la restitution d'attitude du satellite (obtenu par traitement des données du senseur d'étoile au micro-radian). Le traitement des segments non contigus a alors la même performance que s'ils étaient mis bout à bout.

Le second défi a consisté à évaluer les erreurs systématiques, à savoir les signaux perturbateurs qui pourraient être à la même fréquence f_{EP} que le signal de gravité et imiterait ainsi un signal de violation du PE. Les perturbations thermiques issues de l'albédo terrestre ont une signature comparable à la gravité terrestre puisqu'issue de la même source. Plus de 600 orbites, soit presque

¹Une orbite ~5949 secondes et 120 orbites ~8,26 jours.

un quart de la durée allouée à la science, ont été dédiées à la caractérisation de la sensibilité thermique de l'instrument d'une part et à la validation du modèle thermique du satellite d'autre part. Avec cette caractérisation précise en orbite, il a été possible de démontrer que les variations au cœur de l'instrument étaient inférieures à $0,1 \mu\text{K}$ à f_{EP} , valeurs bien inférieures aux premières estimations faites dans le PRL 2017. L'erreur systématique induite a pu alors être réduite d'un facteur 7.

Enfin le dernier défi a consisté à faire face aux craquements du satellite. Ces craquements sont dus aux variations thermoélastiques de la couverture thermique du satellite qui génère des micro-accélérations sous forme de pics brefs et inférieurs à la seconde. Ces micro-accélérations se répètent régulièrement en fonction de l'éclairement du Soleil et de la Terre sur les différentes faces du satellite créant des effets d'ombre et de lumière et donc de variations locales de température. Compte tenu du mouvement orbital du satellite, des occurrences de pics à la fréquence f_{EP} persistent. Même si en théorie, dans la mesure différentielle cette accélération aurait dû disparaître, dans la pratique, les défauts instrumentaux non étalonnables en vol projettent une partie de cette perturbation dans la mesure différentielle. Ce défi était d'autant plus difficile que le bruit haute fréquence de l'accéléromètre masquait en partie ces pics sur l'axe sensible qui était également l'axe où l'occurrence de pics était la plus faible. Un processus de détections des pics sur tous les axes de mesure de l'accéléromètre a été mis en œuvre sur tous les axes après filtrage de la donnée pour détecter un maximum d'occurrence d'évènements. Ensuite, ces données perturbées ont été supprimées et un traitement temporel appelé MECM (*Modified-Expectation-Conditional-Maximization*) a été développé et appliqué. MECM est une méthode de moindre carré évolué qui maximise la vraisemblance des données disponibles grâce à l'estimation du bruit des données manquantes et optimisation du bruit total. C'est une méthode itérative qui est également étudiée dans le projet de détection des ondes gravitationnelles LISA. Afin de valider ce processus, des signaux fictifs de différentes amplitudes ont été injectés dans toutes les données brutes avant traitement et retrouvées avec une précision de 0,1 % même pour les plus faibles.

Une fois ces défis relevés, les résultats finaux de la mission ont été validés et soumis dans les revues *Physical Review Letters* et *Classical Quantum Gravity* [10, 11]. Les résultats du traitement pour le SUEP donnent une différence relative entre masse grave et inertielle pour le Titane et le Platine de $[1,5 \pm 2,3(\text{stat}) \pm 1,5(\text{sys})] \times 10^{-15}$ à 1σ , c'est-à-dire que le signal à f_{EP} (et donc la violation du principe d'équivalence) a une probabilité de 68 % d'être inférieur à $2,7 \times 10^{-15}$ en incluant toutes les barres d'erreurs statistiques et systématiques.

Le SUREF a fourni une vérification de l'expérience en démontrant que le signal nul à f_{EP} attendu était bien évalué à $[0,0 \pm 1,1(\text{stat}) \pm 2,3(\text{sys})] \times 10^{-15}$ à 1σ .

5. Conclusion

La notion d'universalité de la chute libre remonte probablement à l'antiquité et s'est effectivement formalisée avec Galilée. Depuis, ce test qui traduit le principe d'équivalence n'a cessé d'être amélioré. Le 20^e siècle a apporté de nouvelles techniques et moyens métrologiques (tir laser Terre-Lune, balance de torsion...) qui ont amené la précision du test à des niveaux de quelques 10^{-13} au début des années 2000 (Figure 2).

L'expérience spatiale MICROSCOPE marque un saut dans la précision du test en l'amenant à 10^{-15} et conforte une nouvelle fois la théorie de la relativité générale d'Einstein élaboré il y a un siècle. Les théories alternatives ou les extensions de la relativité générale s'en trouvent plus contraintes aujourd'hui et le champ des possibles réduit. Il y a un consensus pour dire que la relativité générale est incomplète et que l'identification d'une violation du principe d'équivalence serait déterminante pour établir la présence d'une nouvelle interaction.

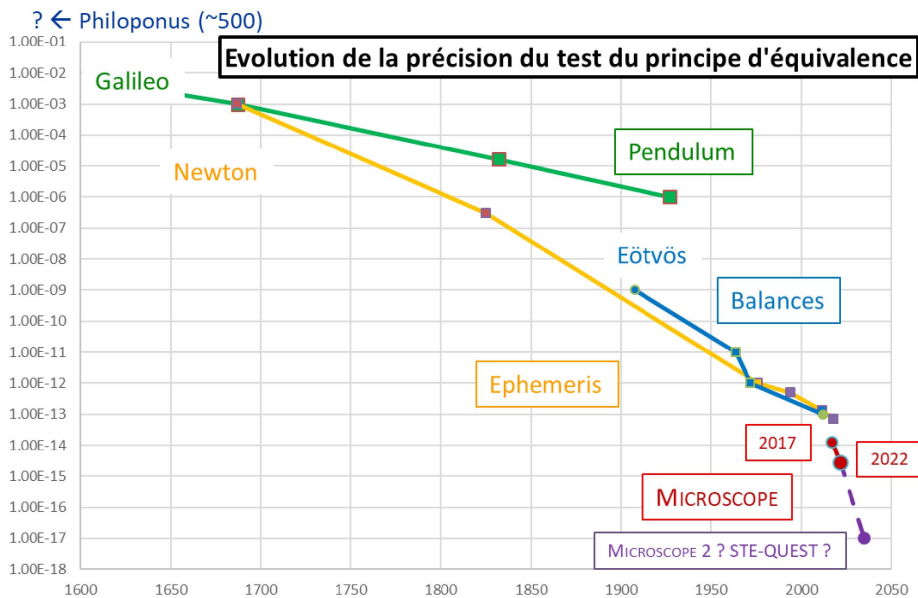


FIGURE 2. Graphique d'évolution de la précision du test du principe d'équivalence jusqu'à MICROSCOPE et perspective au-delà avec MICROSCOPE2 et STE-QUEST.

En cela les projets futurs visant 100 fois mieux que MICROSCOPE (Microscope2 et STE-QUEST) sont à même de fournir un autre saut de précision à l'horizon 2040.

Acronymes

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

CNES : Centre National d'Études Spatiales

OCA : Observatoire de la Côte d'Azur

ESA : Agence Spatiale Européenne

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 (Brême, Allemagne).

Conflit d'intérêt

L'auteur n'a aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Références

- [1] M. Rodrigues, « De la loi de la gravitation universelle à MICROSCOPE », *Trajectoire(s)* **1** (2022), p. 30-31.
- [2] A. Einstein, « Die grundlage der allgemeinen relativitätstheorie », *Ann. Phys. (Berlin)* **49** (1916), p. 252, English translation in A. Engel and E. Schucking, *The Collected Papers of Albert Einstein* (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1989), Vol. 6, doc. 30.
- [3] T. A. Wagner, S. Schlamminger, J. H. Gundlach, E. G. Adelberger, « Torsion-balance tests of the weak equivalence principle », *Class. Quantum Gravity* **29** (2012), article no. 184002.

- [4] J. G. Williams, S. G. Turyshev, D. H. Boggs, « Lunar laser ranging tests of the equivalence principle », *Class. Quantum Gravity* **29** (2012), article no. 184004.
- [5] V. Viswanathan, A. Fienga, O. Minazzoli, L. Bernus, J. Laskar, M. Gastineau, « The new lunar ephemeris INPOP17a and its application to fundamental physics », *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* **476** (2018), n° 2, p. 1877-1888.
- [6] F. Hofmann, L. Biskupek, J. Müller, « Contributions to reference systems from Lunar Laser Ranging using the IfE analysis model », *J. Geod.* **92** (2018), n° 9, p. 975-987.
- [7] T. Damour, F. Piazza, G. Veneziano, « Runaway dilaton and equivalence principle violations », *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002), article no. 081601.
- [8] P. Touboul, M. Rodrigues, G. Métris, B. Taty, « MICROSCOPE, testing the equivalence principle in space », *C. R. Acad. Sci. Paris Ser. IV* **2** (2001), p. 1271-1286.
- [9] P. Touboul *et al.*, « MICROSCOPE mission : first results of a space test of the equivalence principle », *Phys. Rev. Lett.* **119** (2017), article no. 231101.
- [10] P. Touboul *et al.*, « Result of the MICROSCOPE weak equivalence principle test », *Class. Quantum Gravity* **39** (2022), article no. 204009.
- [11] P. Touboul *et al.*, « MICROSCOPE mission : final results of the test of the equivalence principle principle », *Phys. Rev. Lett.* **129** (2022), article no. 121102.