



HAL
open science

MICROSCOPE : un test de la relativité générale d'Einstein dans l'espace

Manuel Rodrigues, Pierre Touboul

► **To cite this version:**

Manuel Rodrigues, Pierre Touboul. MICROSCOPE : un test de la relativité générale d'Einstein dans l'espace. La Lettre AAAF, 2018, pp.24-27. hal-01997023

HAL Id: hal-01997023

<https://hal.science/hal-01997023v1>

Submitted on 28 Jan 2019

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.

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

MICROSCOPE : UN TEST DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE D'EINSTEIN DANS L'ESPACE

par Manuel Rodrigues, Chef de projet MICROSCOPE à l'ONERA
et Pierre Touboul, Responsable scientifique de la mission, ONERA

MICROSCOPE, MICROsatellite à traînée compensée pour l'Observation du Principe d'Équivalence, est une expérience spatiale de physique fondamentale proposée au CNES par l'ONERA et l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) en 1999. Le satellite lancé en avril 2016 comporte un seul instrument, un double accéléromètre différentiel, développé par l'ONERA.

Cette mission est le fruit d'une coopération internationale sous maîtrise d'œuvre du CNES. Ce dernier a développé le satellite sur la base de la filière microsatellite Myriade, fourni le lancement et assuré la gestion du segment sol. L'ESA a délivré les propulseurs, le DLR a financé le développement des masses d'épreuves des accéléromètres par le PTB, laboratoire allemand de physique et est membre du BIPM (Bureau International des Poids et Mesures). Le DLR a également financé l'équipe du laboratoire de microgravité ZARM à Brème qui y a testé l'instrument en chute libre et qui a contribué à la définition de la mission et à l'analyse des données.

En plus de l'instrument, l'ONERA est en charge du centre de mission scientifique et de l'exploitation de la mission avec la collaboration de l'OCA, partenaire depuis plusieurs décades.

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

En 1905, Einstein proposait avec sa théorie de la relativité restreinte une nouvelle vision de la physique. Il établit en particulier une nouvelle constante: la vitesse de la lumière ne dépend pas du référentiel d'observation en mouvement uniforme.

Deux ans plus tard, dans le bureau des brevets de Berne, il lui vient l'idée suivante : « une personne en chute libre ne sentira plus son poids ». Cette simple idée contient une notion de physique fondamentale : le principe d'équivalence. Comme l'indiquait Newton un corps de masse m_i qui est accéléré résiste à ce mouvement d'inertie par la force $:m_i a$ où a est l'accélération. Mais s'il est soumis à un champ de pesanteur uniforme, g , il va subir une force : $m_g g$, avec la masse gravitationnelle. Les deux masses m_g , grave, lié à la gravitation, et m_i , masse inerte, liée au mouvement, n'ont conceptuellement a priori rien à voir. Et pourtant, les physiciens depuis Galilée ont été surpris du lien intime entre gravitation et inertie : l'observateur dans l'ascenseur acquiert une accélération identique à l'intensité de pesanteur, et donc : $m_g = m_i$

C'est à partir de ce principe fondateur qu'Einstein va introduire la gravitation dans sa théorie de la relativité. Le fait que toute expérience de physique soit identique dans un référentiel accéléré ou dans un champ de pesanteur indique que la gravitation est décrite par une théorie géométrique de l'espace et du temps et non par une théorie de champ: la relativité générale.

Cette théorie n'a jamais été mise en défaut depuis sa publication en 1916.

POURQUOI TESTER LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ?

À la même période où la relativité générale était proposée, Einstein a participé à la construction de la théorie quantique des champs. C'est le domaine de physique qui a le plus bouleversé le 20^e siècle par ses applications : lasers, nucléaire, semi-conducteurs, ordinateurs, smartphones, écrans LCD, etc. Une des applications courantes de la relativité générale est le GPS.

La physique quantique décrit avec une grande précision l'infiniment petit. La relativité générale, quant à elle, prédit avec précision le mouvement des planètes et des galaxies ainsi que l'existence des ondes gravitationnelles et des trous noirs qui n'ont été réellement observés et confirmés que bien des décennies après. On a donc deux physiques qui sont très bien vérifiées mais qui semblent totalement incompatibles : la première quantifie l'énergie, alors que l'autre non.

Einstein a tenté toute sa vie d'élucider ce paradoxe, sans succès. C'est le « Graal » de la physique moderne : trouver la nouvelle interaction, le nouveau concept de physique qui permettrait d'obtenir la « théorie du tout », ou une théorie unifiée de la physique quantique et de la gravitation. Des candidats existent comme la théorie des cordes ou la gravitation quantique, mais cette nouvelle physique butte sur le principe d'équivalence : il doit être violé.

Tester le principe d'équivalence, pierre fondatrice de la relativité générale, s'avère donc un test fondamental de la gravitation : une observation de la violation du principe d'équivalence serait un indice fort d'une nouvelle théorie alternative.

Depuis Galilée, différentes expériences ont démontré que le principe d'équivalence était valide (Figure 1). Après avoir imaginé une expérience de chute libre depuis le haut de la tour de Pise, Galilée vérifie finalement le principe avec des boules de différents matériaux roulant sur des plans inclinés. Puis Newton, Bessel, Etovos, Dicke, Dickey

LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

PRÉCISION DU TEST À TRAVERS L'HISTOIRE

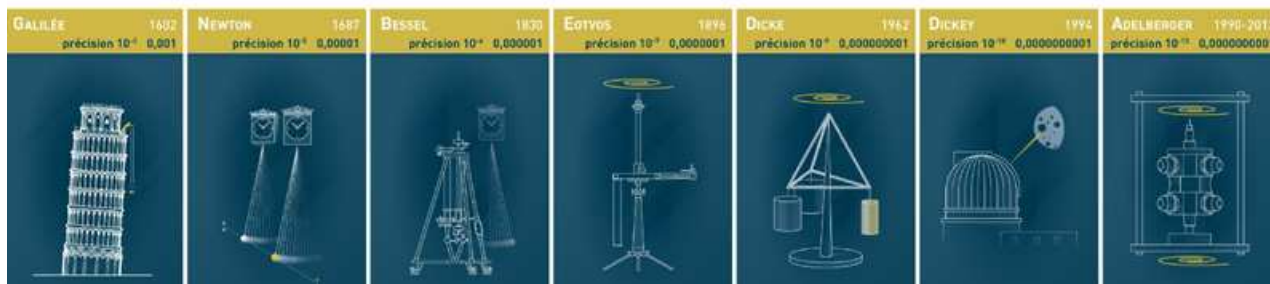


Figure 1 : Expériences de vérification du principe d'équivalence

et l'équipe EotWash (à Seattle, aux USA) n'ont cessé d'améliorer le test avec différentes techniques.

Pour résumer, toutes ces techniques s'appuient sur l'effet d'une source de gravitation (la Terre ou le Soleil) sur le mouvement pendulaire ou de chute de deux matériaux différents. *In fine*, on va comparer la différence d'accélération cinématique de deux corps dans un champ de gravitation :

$$a_1 - a_2 = \left(\frac{m_{g1}}{m_{i1}} - \frac{m_{g2}}{m_{i2}} \right) g$$

On définit le paramètre d'Eötvös par :

$$\delta = \frac{a_1 - a_2}{\frac{1}{2}(a_1 + a_2)} = \frac{\frac{m_{g1}}{m_{i1}} - \frac{m_{g2}}{m_{i2}}}{\frac{1}{2} \left(\frac{m_{g1}}{m_{i1}} + \frac{m_{g2}}{m_{i2}} \right)}$$

définissant la précision de validité du principe d'équivalence.

Les expériences menées par le groupe EotWash ou obtenues à l'issu de tir laser sur la Lune ont démontré que le principe était exact à 2,1 x 10⁻¹³ près. Certaines théories prédisent justement une violation au niveau de 10⁻¹⁴ : trop petit pour être détecté par les expériences menées avant 2017 et suffisamment significatif pour les objectifs de MICROSCOPE.

LE TEST DU PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE DANS L'ESPACE

Ce qui a motivé la réalisation du test dans l'espace, c'est avant tout la limitation au sol des précisions introduites par l'environnement de l'expérience : dans le cas d'EotWash, à cause des perturbations du champ de gravité local par l'activité humaine ou la météo, dans le cas du tir laser Terre-Lune à cause de la résolution limitée par la détectivité du pulse laser après la double traversée de l'atmosphère terrestre. Dans les deux cas, l'espoir pour ces laboratoires d'obtenir une amélioration des résultats à court terme était très limité.

L'ONERA a donc proposé de faire une mesure dans l'espace à bord d'un satellite qui serait un laboratoire spatial avec peu de perturbations. Comme on souhaite comparer l'accélération de deux corps, très naturellement la réalisation d'un accéléromètre avec deux masses d'épreuve cylindriques et concentriques s'avère judicieuse. Pour bien comparer l'accélération des deux masses, il est nécessaire que les deux masses subissent le même champ de pesanteur : la précision de concentricité par construction a été spécifiée à 20µm après assemblage de toutes les pièces.

Pour réaliser l'expérience, on dispose en fait de deux accéléromètres à deux masses chacun (Figure 2) :

- le premier 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 est nulle (le paramètre d'Eötvös est nul) ;
- le second accéléromètre comporte deux masses de matériaux différents, l'alliage de platine pour la masse interne et un alliage de titane (TA6V aéronautique) pour la masse externe ; c'est l'accéléromètre, SUEP, avec lequel on souhaite vérifier le principe d'équivalence.

Figure 2 : Accéléromètre à deux masses



Figure 2.1 : Cœur mécanique du SUEP : cylindre en silice dorée pour les portes électrodes, masses d'épreuve (titane doré et platine)

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

MICROSCOPE : UN TEST DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE D'EINSTEIN DANS L'ESPACE



Figure 2.2 : Livraison du capteur électro-mécanique : charge utile T-SAGE¹ pour la mission MICROSCOPE

Chaque masse d'épreuve est entourée de tubes en silice dorée sur lesquels ont été gravées des électrodes permettant la mesure du mouvement des masses suivant ses 6 degrés de liberté par mesure capacitive. Sur ces mêmes électrodes, une électronique d'asservissement vient appliquer des tensions électriques pour maintenir les masses d'épreuve immobiles. La résolution de position est alors 10^{-12} m, soit 1% de la taille atomique, après une moyenne sur 720 000 secondes (120 orbites). L'amplitude des tensions appliquées est alors représentative de l'accélération.

Les deux accéléromètres sont placés au cœur du satellite MICROSCOPE qui orbite en moyenne à 710 km d'altitude où l'intensité de gravité est de $7,9 \text{ m/s}^2$ (Figure 3). L'axe des cylindres est parallèle au plan orbital et il définit l'axe de mesure principal. Le satellite étant en légère rotation ($f_{\text{spin}} < 3 \times 10^{-3}$ Hz) autour de l'axe normal au plan de l'orbite, le signal de gravité va être vu par l'accéléromètre sur l'axe principal de mesure comme modulé à la fréquence $f_{\text{spin}} + f_{\text{orb}}$ où f_{orb} est la fréquence orbitale. C'est à cette fréquence que l'on appelle f_{EP} que l'on pourrait observer un signal de violation éventuel en phase et colinéaire avec le champ de gravité terrestre.

Pour améliorer les conditions expérimentales, le satellite utilise la mesure accélérométrique « 6 axes » pour agir sur des micro-propulseurs à gaz froid afin de compenser les perturbations externes du satellite : traînée atmosphérique, pression de radiation (solaire et albédo terrestre), couple dû au champ magnétique terrestre, couple gyroscopique ou gravitationnel.

¹ T-SAGE : Twin - Space Accelerometers for Gravity Experiment

Grâce à ce système de contrôle et d'asservissement de l'accélération et de l'attitude du satellite, le satellite constitue pour l'instrument un laboratoire expérimental avec très peu de perturbations externes : le résidu d'accélération est réduit à 10^{-12} m/s^2 au niveau de l'instrument.

Réaliser un test du principe d'équivalence à 10^{-15} signifie réaliser une mesure sur la différence d'accélération avec une précision de $7,9 \times 10^{-15} \text{ m/s}^2$.



Figure 3 : Visual de la Terre, du satellite MICROSCOPE en orbite et des senseurs SUEP et SUREF.

© CNES / Virtual-IT2017+ONERA 2017

LES PREMIERS RÉSULTATS DE LA MISSION MICROSCOPE

Ils ont été publiés en décembre 2017 dans la prestigieuse revue *Physical Review Letters*. Ces résultats concernent 120 orbites (soit 720 000 s) pour le SUEP et 60 orbites pour le SUREF. Ces données ont été collectées en février 2017 et ont nécessité plusieurs mois de traitement, d'analyse et de vérification avant publication.

L'analyse des données décrite dans cet article se résume à une transformée de Fourier de la différence de mesure d'accélération et sa projection sur l'axe du champ de gravité autour de la fréquence F_{EP} , qui définit la fréquence de modulation du champ de gravité en fonction du mode de rotation choisi. En effet l'axe de mesure, défini par l'axe du cylindre est aligné et dans le même sens que le vecteur g (champ de gravité de la Terre) une fois par orbite quand le satellite est inertiel [f_{orb} = fréquence orbitale]. Si

SCIENCES ET TECHNIQUES AÉROSPATIALES

MICROSCOPE : UN TEST DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE D'EINSTEIN DANS L'ESPACE

on fait tourner le satellite autour de la normale au plan orbital (Figure 3) à la fréquence f_{spin} , alors la projection du champ de gravité est modulée à $f_{\text{or}} + f_{\text{spin}}$ que l'on appelle F_{EP} . L'amplitude est restituée par une méthode des moindres carrés dans l'espace des fréquences. On peut apparenter cette technique à une détection synchrone où le signal de référence est le champ de gravité. Ce dernier est calculé grâce au modèle précis du champ d'une part, ITSG-GRACE2014s obtenu lors des missions spatiales de géodésie², à la mesure de position du satellite par récepteur GPS à bord ou par effet Doppler de la télémétrie d'autre part, et enfin à la mesure d'attitude fournie par le senseur stellaire.

La position du satellite est obtenue au décimètre près et son pointage angulaire à quelques centièmes de micro-radians dans la bande de fréquence autour de f_{EP} . La stabilité du pointage en accélération angulaire est meilleure que 5×10^{-12} rad/s².

Dans cette première publication, qui ne concerne qu'une seule session de mesure de 120 orbites, il est montré que le principe d'équivalence n'est pas violé au-dessus de $1,9 \times 10^{-14}$ (à 1 sigma, c'est-à-dire avec une probabilité de 65%). C'est un gain d'un facteur 10 sur les meilleures expériences obtenues jusqu'alors. L'exploitation du SUREF est par ailleurs cohérente avec un signal nul attendu du paramètre d'Eötvös à un niveau de $0,8 \times 10^{-14}$.

Ces résultats ont été obtenus sur seulement l'exploitation de 10% des données scientifiques collectées. La mission doit se terminer en septembre 2018 et l'accumulation de données doit permettre d'améliorer significativement la précision et la confiance des mesures pour se rapprocher de l'objectif de 10^{-15} . Pour cela, il est prévu de tenir compte de la calibration en vol des alignements et facteurs d'échelle instrumentaux pour mieux rejeter le résidu d'accélération du satellite dans la différence de mesure d'accélération. Il faut également améliorer l'estimation des erreurs systématiques grâce à des expériences de sensibilité à la température et au champ magnétique résiduel qui ont eu lieu à bord depuis l'obtention de ce premier résultat.

CONCLUSION

MICROSCOPE a été un défi technologique remporté par une collaboration exemplaire des équipes du CNES et de l'ONERA. Cette mission spatiale place la France comme l'un des leaders mondiaux dans le domaine de la science du femto 10^{-15} g dans l'espace.

Les premiers résultats publiés en décembre 2017 repoussent d'un facteur 10 la validité du principe d'équivalence, pierre fondatrice de la relativité générale.

La publication inscrit l'ONERA et l'OCA comme référence mondiale de ce test qui dès décembre a déjà fait l'objet de nouvelles contraintes sur les théories du dilaton et du U-boson.

ACRONYMES :

- BIPM : Bureau International des Poids et Mesures
- CNES : Centre National d'Etudes Spatiales
- DLR : Agence aérospatiale allemande
- ESA : *European Space Agency*
- MICROSCOPE : Micro Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence
- PTB : Agence nationale de métrologie (Allemagne)
- OCA : Observatoire de la Côte d'Azur
- SUEP : *Sensor Unit for Equivalence Principle*
- SUREF : *Sensor Unit of REFerence*
- 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. Taty, *MICROSCOPE, testing the equivalence principle in space*, C. R. Acad. Sci. Paris Ser. IV 2, 1271 (2001).
- 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). ■

² L'ONERA a participé aux 3 grandes missions de géodésie spatiale du 21^e siècle, CHAMP (2000-2010), GRACE (2002-2018) et GOCE (2009-2013) en fournissant les accéléromètres électrostatiques. L'ONERA a également livré les accéléromètres de la future mission de géodésie américaine GRACE-FO devant être lancée en 2018.