

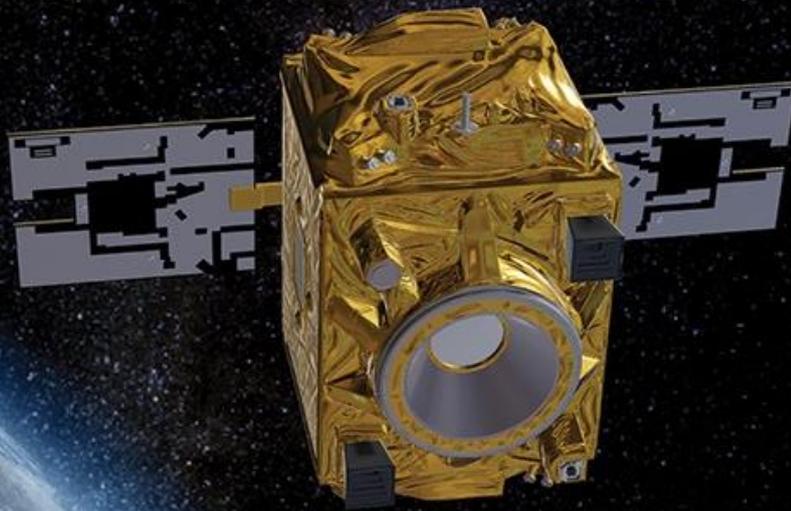
**Un record de précision :  $2.10^{-14}$**

--

**10x mieux que les meilleures expériences**

--

**MICROSCOPE prouve le principe  
d'équivalence d'Albert Einstein**



**4 décembre 2017**

**Les premiers résultats de MICROSCOPE**

## 1. Objectifs scientifiques

Microscope est un satellite, véritable laboratoire spatial, qui teste les limites de la **théorie de la relativité générale** élaborée par Albert Einstein il y a un siècle. Cette théorie décrit la gravitation comme une courbure de l'espace-temps et elle n'a jamais été mise en défaut lors des multiples expériences réalisées, y compris avec les premières observations d'ondes gravitationnelles. La gravitation est le moteur de la structuration et de l'évolution de l'univers. Et pourtant il subsiste une énigme que la théorie de la relativité générale ne peut résoudre qu'en introduisant arbitrairement une nouvelle composante pour une énergie noire. Sa nature est totalement inconnue, comme celle de la matière noire, et à elles deux elles composeraient **95 % de l'Univers** ! Certaines théories récentes visent à généraliser la théorie de la relativité générale et à la rendre compatible avec l'autre grande théorie du 20<sup>e</sup> siècle, la théorie quantique des champs qui décrit le monde des particules. Ces nouvelles théories prédisent que le **principe fondateur de la relativité générale, l'équivalence entre gravitation et accélération, pourrait être violé à un niveau très faible**. Cette violation se manifesterait par des chutes libres différentes pour des masses de compositions différentes.

L'objectif est de **tester la validité du principe d'équivalence** dans l'espace. Le défi consiste à atteindre une précision 100 fois meilleure que toutes les expériences réalisées jusqu'à présent dans le monde, ce qui ouvrira de nouveaux horizons aux théories de la gravitation.



Microscope avant assemblage sur le lanceur Soyouz

© CNES/GRIMAULT Emmanuel, 2015

## 2. Premiers résultats

Après 7 mois de recette en vol, Microscope a réalisé 1 an d'exploitation scientifique, et collecté **1900 orbites** de mesures pour le test du principe d'équivalence. C'est l'équivalent d'une chute de la moitié de la distance Terre Soleil. L'analyse de 10% de ces données a permis d'atteindre **une précision de  $2 \cdot 10^{-14}$** , ce qui est déjà **10 fois mieux que les meilleures expériences** conduites jusqu'à présent. Avec ce niveau de précision, **Microscope montre qu'il n'y a pas de violation du principe d'équivalence**.

C'est un résultat intermédiaire remarquable, et de grande importance pour la construction des théories alternatives à la relativité générale.

Ce résultat démontre aussi qu'il est possible d'atteindre des performances exceptionnelles pour des expériences de physique fondamentale sur un microsatellite en orbite basse.

### Qu'est-ce que le principe d'équivalence?

Au XVII<sup>e</sup> siècle, Galilée imagine une expérience du haut de la Tour de Pise, où il laisse tomber en même temps deux objets de masses et de compositions différentes. Les deux corps touchant le sol exactement au même moment, il en déduit que dans le vide, tous les corps tombent avec le même mouvement, indépendamment de leur masse et de leur composition. C'est une expérience de pensée qui transcrit les expériences réelles qu'il a réalisées sur des plans inclinés.

Cette découverte se traduit par l'universalité de la chute libre, ou encore l'équivalence entre la masse gravitationnelle (qui intervient dans l'attraction gravitationnelle) et la masse inerte (qui intervient lors d'un changement de mouvement).

Elle a mobilisé les plus grands physiciens. Albert Einstein en a fait un principe sur lequel il a bâti sa théorie de la relativité générale où il identifie gravitation et accélération.

Lancement	25/04/2016
Durée de vie	2 ans
Altitude	710 km
Orbite	Circulaire héliosynchrone
Lanceur	Soyouz (depuis Kourou-Guyane)

### 3. Microscope, comment ça marche ?

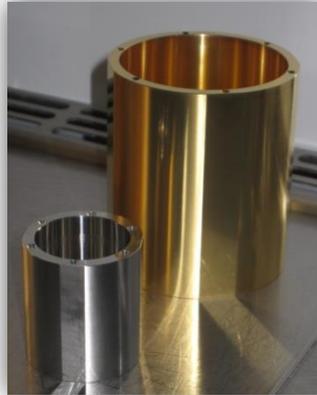
En allant dans l'espace, Microscope bénéficie de 2 atouts. Son mouvement orbital est **une chute libre permanente**, qui permet de très longues mesures. L'espace offre par ailleurs **un environnement beaucoup moins perturbé** que l'environnement terrestre.

Microscope est un microsatellite du CNES qui s'appuie sur de nombreux équipements et fonctions de la filière Myriade.

Pour les besoins de la mission il embarque 2 nouveaux éléments de très haute technologie :

- un système de contrôle d'attitude et de **compensation de traînée**, utilisant un système de micro-propulsion à gaz froid développé par le CNES avec des fournitures ESA.
- les **accéléromètres** de l'ONERA qui mesurent avec une infime précision les différences de position et d'accélération entre des masses d'épreuve.

L'instrument est placé dans un cocon thermique et magnétique protecteur au cœur du satellite. La durée de la mission est limitée par la quantité de gaz nécessaire au contrôle ultrafin du satellite.



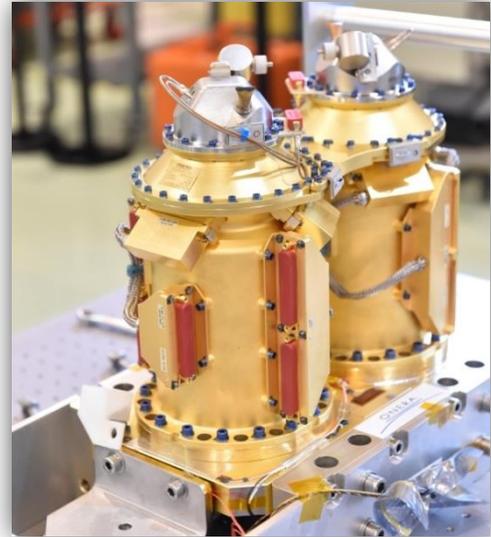
2 des 4 masses d'épreuve  
Platine (gauche), Titane doré (droite)

© ONERA

#### Qu'est-ce qu'un satellite à compensation de traînée ?

La compensation de traînée met en jeu des micro-propulseurs afin de compenser les infimes accélérations dues à l'atmosphère résiduelle et aux photons de la lumière du Soleil, et ainsi placer l'instrument de mesure dans une chute libre purement gravitationnelle. Les forces appliquées sont de **quelques micro-newtons**, comparables au poids d'un moustique.

**Microscope réalise la meilleure compensation de traînée jamais atteinte en orbite basse !**



Les accéléromètres T-SAGE de l'ONERA

© CNES/GIRARD Sébastien, 2014

### 4. Les partenaires du projet

Le **CNES** est le maître d'ouvrage de la mission, et assure la maîtrise d'œuvre du système et du satellite, sans appel à un maître d'œuvre industriel. Cela inclut la conception globale, le développement ou les approvisionnements de composantes, l'intégration et la validation du satellite, du segment sol et des éléments logiciels associés. Le CNES prend en charge les opérations sur le système spatial, et réalise des expertises complémentaires pour fournir des données exploitables par les scientifiques.

**L'ONERA** est responsable scientifique de la mission et du développement de l'instrument T-Sage. L'ONERA a développé et exploite le Centre de Mission Scientifique.

Le **laboratoire GEOAZUR (Observatoire de la Côte d'Azur/CNRS)** co-proposant de la mission, participe à la préparation du plan de mission et réalise des traitements scientifiques en collaboration avec l'ONERA.

**L'ESA** a fourni les moteurs du système de micro-propulsion avec leurs électroniques de commandes.

Le **DLR** supervise les participations des laboratoires **PTB** et **ZARM**. Le PTB, laboratoire de métrologie allemand membre du Bureau International des Poids et Mesures, a développé les outils de réalisation et de métrologie des masses d'épreuve. Le ZARM a participé à la validation de l'instrument, en réalisant des essais dans sa tour de chute libre, et contribue au traitement des données.

Le **SWG** (Science Working Group), qui comprend des experts scientifiques français et étrangers dans divers domaines de la physique, supervise l'exploitation des données de la mission.



© CNES/AITY. Le Deuff

Un panneau propulsif avec 4 paires de micro-propulseurs dans les coins, et un réseau complexe de régulation et de distribution du gaz

Dimension du satellite	1,4 m x 1 m x 1,5 m
Poids du satellite	300 kg
Poids du gaz (azote)	16 kg
Poids des masses d'épreuve	entre 0,3 kg et 1,36 kg



© CNES/GIRARD Sébastien, 2014

L'instrument T-SAGE dans son cocon protecteur avant intégration au cœur du satellite

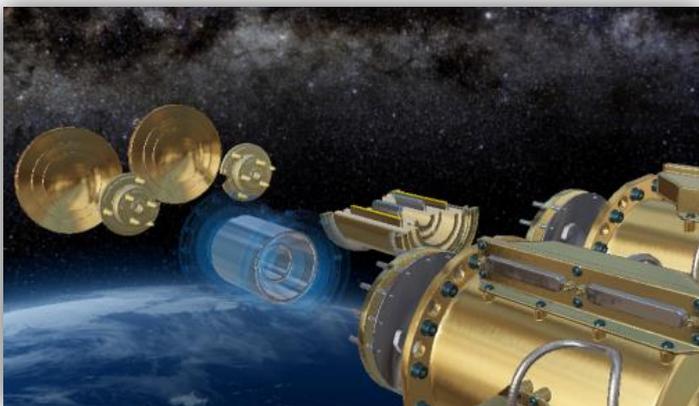
## 5. La mesure instrumentale décortiquée

L'instrument est constitué de 2 unités. L'unité de référence comprend 2 masses d'épreuve de matériau identique, en alliage de platine : elle sert de référence de mesure. L'autre unité comprend une masse en alliage de platine et une en alliage de titane : c'est elle qui peut détecter une éventuelle violation du principe d'équivalence.

Le principe consiste à maintenir immobiles et parfaitement concentriques les 2 masses de chaque unité par des forces électrostatiques. Elles subissent ainsi un même mouvement de chute autour de la Terre. S'il y a violation du principe d'équivalence, les accélérations d'origine électrostatique nécessaires pour maintenir les deux masses sur exactement la même trajectoire seront différentes. **C'est la différence d'accélération fournie par T-SAGE qui définit la mesure.**

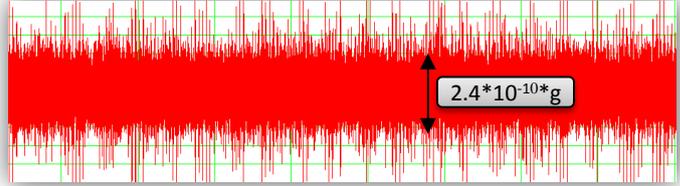
A 710 km d'altitude l'intensité du champ de gravité (g) est de  $7.92 \text{ m/s}^2$ . L'objectif de **mesurer une violation à la précision de  $10^{-15}$  revient à mesurer une différence d'accélération avec la précision de  $10^{-15} * g$ .**

Le signal de la gravité de la Terre vu par les masses d'épreuve est lié à l'orientation du satellite par rapport à la Terre. On peut donc moduler le signal de mesure recherché à une fréquence précise, et se concentrer dans le traitement des données sur cette fréquence attendue.



© CNES / Virtual-IT 2017

Représentation en éclaté des accéléromètres et des 4 masses d'épreuve  
Unité de référence à gauche, unité de la mesure en coupe à droite



© OCA / ONERA  
CMS Microscope

18h (11 orbites) de mesures : différence d'accélération exprimée en g

## 6. Collecte et traitement des données

Les activités opérationnelles sont organisées en sessions, qui définissent chacune une configuration particulière du laboratoire spatial Microscope. **Les sessions durent de 8 heures à 8 jours** selon leur objectif. Elles sont dédiées à des étalonnages de l'instrument ou bien à des mesures de longue durée du test du principe d'équivalence, en alternant entre unité étalon et unité de la mesure.

Les télémesures sont collectées, via un réseau de stations sol, par le CNES qui les met ensuite en forme. Un centre d'expertise au CNES y adjoint des estimations précises sur la position et l'orientation du satellite nécessaires aux traitements scientifiques.

Le centre de mission scientifique de l'ONERA récupère toutes ces données et met en œuvre les algorithmes pour identifier les paramètres instrumentaux et corriger puis filtrer la mesure scientifique. Ces traitements s'appuient sur des outils développés par l'OCA et l'ONERA.

**Parvenir à extraire un signal de quelques  $10^{-15} * g$  est un véritable défi.** La mesure instrumentale, échantillonnée à 4 Hz, est dominée par le bruit des accéléromètres et par des micro-craquements du satellite, mais à des niveaux très faibles ( $2.4 * 10^{-10} * g$ ). Le bruit est notamment généré par les fluctuations d'amortissement d'un minuscule fil d'or de  $7 \mu\text{m}$  de diamètre qui assure le contact électrique pour chaque masse d'épreuve.

Cachés sous le bruit de mesure se trouvent d'autres signaux parasites, comme celui généré par le gradient de gravité. Bien qu'excellent (mieux que  $20 \mu\text{m}$ ), le centrage des masses d'épreuve ne peut en effet pas être parfait. Légèrement décalées dans le champ de gravité de la Terre, les 2 masses perçoivent donc une petite différence d'attraction gravitationnelle. Ce signal est 15 fois plus faible que le bruit et 10000 fois plus grand que le signal de violation recherché. Il est principalement visible à une fréquence 2 fois supérieure à celle du test du principe d'équivalence ce qui le rend identifiable. **Le décentrage des masses est ainsi estimé à mieux que  $1/10^{\text{ème}}$  de micromètre.** Et la mesure d'accélération différentielle peut alors être corrigée de l'effet du gradient de gravité à toutes les fréquences.

Petit-à-petit, la mesure brute constituée de près de 3 millions d'échantillons pour une session est ainsi nettoyée avec précaution. Une des hypothèses à vérifier est par exemple la stabilité temporelle des signaux estimés, ce que le ZARM a confirmé.

L'application de ces traitements complexes a ainsi permis à l'OCA et l'ONERA d'affirmer, sur la base d'une session de 200 heures (ou 120 orbites), que le signal est de  $-1 * 10^{-15} * g$  avec une précision de  $2 * 10^{-14} * g$ .

## 7. Contenu de la publication sur les premiers résultats

Le résultat annoncé dans la revue PRL<sup>(1)</sup> est formulé de façon précise en  $\delta(Ti, Pt) = [-1+/-9(stat)+/-9(syst)]*10^{-15}$ . Il signifie que la différence relative d'accélération de chute libre entre le Titane et le Platine est de  $-1*10^{-15}$  avec une erreur statistique de  $9*10^{-15}$  (écart type) et une erreur systématique maximale de  $9*10^{-15}$  (l'égalité de ces 2 types d'erreur est un hasard). Cela veut dire **que l'on a une probabilité de 68% que la violation soit inférieure à  $19*10^{-15}$**  (et une probabilité de 95% pour que la violation soit inférieure à  $28*10^{-15}$ ) : il y a absence de violation statistiquement significative.

La barre d'erreur statistique est la conséquence du résidu de bruit après application des traitements de filtrage sur la mesure brute. Cette dispersion résiduelle est estimée par les algorithmes du centre de mission scientifique. Elle diminue naturellement par l'accumulation des mesures, en « racine du temps » : **une session de mesure 4 fois plus longue fournira un résultat statistique 2 fois meilleur.**

La barre d'erreur systématique quantifie le maximum des signaux perturbateurs qui pourraient fausser de façon répétable la mesure. Il y a notamment le résidu de compensation de traînée, le contrôle d'attitude et l'environnement thermique du satellite, qui sont en fait bien plus performants qu'attendus. En particulier la variation de température au cœur des instruments, à la fréquence d'intérêt, est inférieure à **20  $\mu$ K** (20 millièmes de degrés).

Les mesures de l'unité de référence avec ses 2 masses en Platine conduisent au résultat comparatif suivant :  $\delta(Pt, Pt) = [-4+/-4(stat)]*10^{-15}$ . Cela est compatible avec une valeur nulle comme attendue, et conforte la confiance dans les résultats de la mission. L'évaluation des erreurs systématiques pour cette unité sera faite une fois réalisées en vol toutes les sessions de caractérisation associées.

## 8. Et demain ?

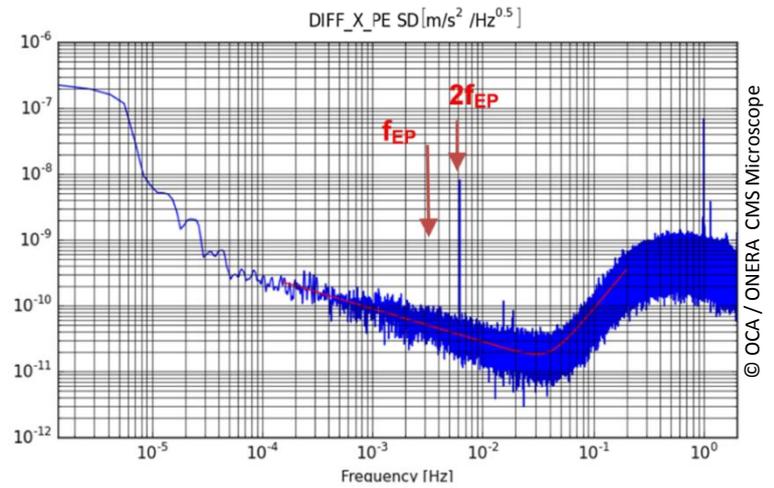
Les premiers résultats de la mission spatiale Microscope ont été obtenus sur la base de 120 orbites. Or plus de 1900 orbites scientifiques ont déjà été accumulées et d'autres continueront de l'être jusqu'en mars 2018, **ce qui laisse augurer encore d'un gain notable sur les erreurs statistiques.** Il reste par ailleurs du chemin à parcourir pour le traitement scientifique qui va se focaliser sur une meilleure connaissance des erreurs systématiques. Tout cela permettra de se rapprocher de l'objectif de précision de  $10^{-15}$ .

**Le résultat intermédiaire obtenu est déjà extraordinaire et va être repris par de multiples études** afin de mieux contraindre les théories candidates à l'unification entre gravitation et monde quantique.

La collecte de données scientifiques se poursuivra jusqu'en mars 2018. Il ne restera alors plus que 6% des réserves de gaz dans le satellite, qui seront mises à profit d'autres d'expérimentations plus technologiques. La passivation du satellite et sa désorbitation seront entreprises à la fin de l'année 2018.

Il faudra attendre 2019 pour connaître les résultats finaux de la mission Microscope, et savoir si le principe d'équivalence reste vérifié toujours plus loin dans la précision ou si au contraire une violation apparaît.

Et alors, au-delà de ces avancées expérimentales et théoriques, quelles seront les applications concrètes de cette expérience hors du commun ? Nul ne le sait. Souvenons-nous qu'en 1915 quand Albert Einstein a mis au point la relativité générale, personne n'imaginait qu'elle deviendrait un élément essentiel au système GPS !



Densité spectrale de puissance de l'accélération différentielle (Ti, Pt)  
 $f_{EP}$  (3 mHz ici) est la fréquence à laquelle on recherche le signal.  
 La raie à la fréquence  $2*f_{EP}$  est celle du gradient de gravité.



Le satellite et ses panneaux ouverts. Au centre l'instrument.

Durée développement	<b>16 ans</b> avant lancement
RH développement	427 années temps plein
RH exploitation en vol	57 années temps plein

<sup>(1)</sup>Physical Review Letters: « The MICROSCOPE mission: first results of a space test of the Equivalence Principle »

En savoir plus : <https://microscope.cnes.fr/>

En savoir plus : <https://microscope.onera.fr/>

Photothèque : <http://cnes.photonpro.net/cnes/categories/654>

# Chiffres clés

5% de matière connue dans l'univers, 95% d'énergie et de matière noires comprises

Sans relativité Générale, le GPS dériverait de 10km par jour

$2 \cdot 10^{-14} =$   
0.00000000000002  
rapport entre le poids d'une mouche domestique et d'un supertanker

Avec une accélération de  $10^{-15}$ .g il faudrait 5 millions d'années pour atteindre la vitesse d'un piéton : l'âge de l'australopithèque

1900 orbites de science en 1 an : une chute équivalente à la moitié de la distance Terre Soleil

16 ans de projet avant le lancement  
427 années équivalentes temps plein

28000 km/h : vitesse de satellisation pour mettre MICROSCOPE en orbite

L'environnement thermique est stable à 0.00002 degré près

Les forces commandées vont de 1 micro-newton (10% du poids d'un moustique) à 500µN

1 mm : dimension d'une tuyère  
50 µm : largeur de l'orifice (épaisseur d'un cheveu)

Masses d'épreuve maintenues en lévitation, avec une précision de  $10^{-10}$  m : la taille d'un atome

Un fil d'or de 7 µm d'épaisseur, 1/10<sup>ème</sup> de cheveu : il assure le contact électrique nécessaire à la lévitation



**Dernier regard sur Microscope  
avant fermeture du lanceur**

