La mission MICROSCOPE pour le Test du Principe d'Equivalence

Gilles METRIS

Manuel Rodrigues (ONERA)
Chef de Projet instrument
Responsable CMS

Pierre Touboul (ONERA)
Principal Investigateur

Gilles Metris (CNRS-UCA-OCA-Géoazur)
Co PI – Analyse des données

Pierre-Yves Guidotti (CNES)
Chef de Projet MICROSCOPE

Alain Robert (CNES)
Responsable Groupe Performances

SOMMAIRE

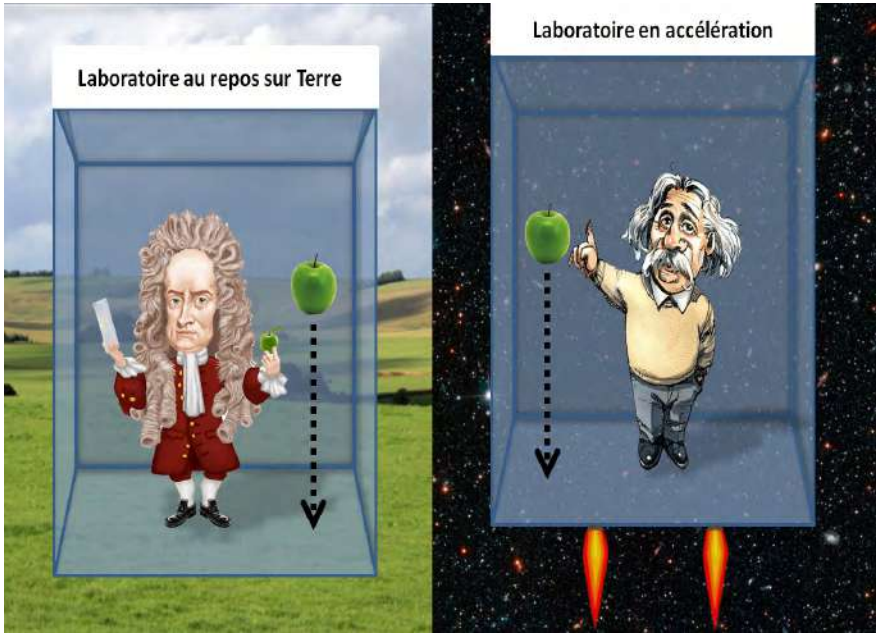
- Le Principe d'Equivalence : enjeux et statut
- La mission Microscope
- Que mesure-t-on ?
- Premiers résultats
- La suite

Le Principe d’Equivalence enjeux et statut

Le contexte en quelques mots

- **La Relativité Générale (RG) est la théorie consacrée pour la gravitation**
  - Toutes ses prédictions ont été vérifiées…
  - Le Principe d'Equivalence (PE) est l'un des piliers de la RG
- **Des théories tentent d'unifier la gravitation avec les autres interactions**
  - Elles permettent en général une violation du PE
  - Le niveau de violation n'est pas explicitement prédit mais des arguments dimensionnels permettent de l'envisager à un niveau accessible aux tests actuels
- **Améliorer le test du PE est donc important pour guider l'élaboration de théories unificatrices**

Le Principe d'Equivalence : un fait expérimental, pilier de la RG



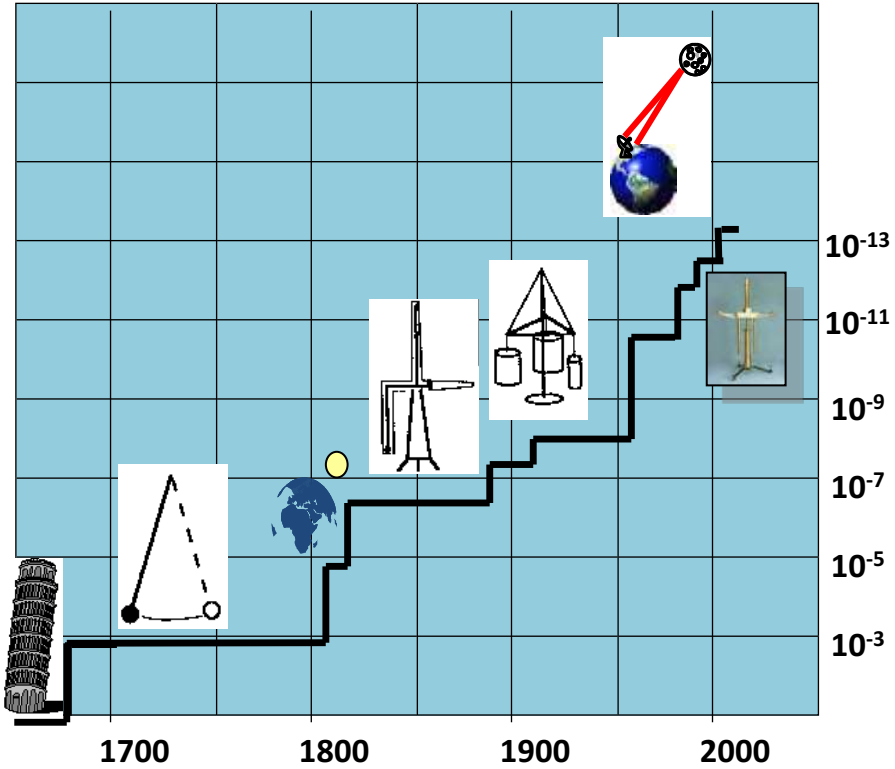
Aucune expérience locale ne permet de distinguer une accélération gravitationnelle d'une accélération non gravitationnelle

- **Forme dite faible : équivalence entre masse grave et masse inertertielle**
- **Paramètre d'Eötvös :**

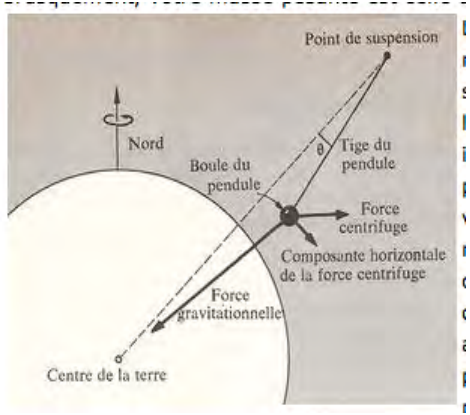
$$\eta(A,B) = 2\,\frac{\dfrac{m_{gA}}{m_{iA}} - \dfrac{m_{gB}}{m_{iB}}}{\dfrac{m_{gA}}{m_{iA}} + \dfrac{m_{gB}}{m_{iB}}} \simeq \frac{m_{gA}}{m_{iA}} - \frac{m_{gB}}{m_{iB}}$$

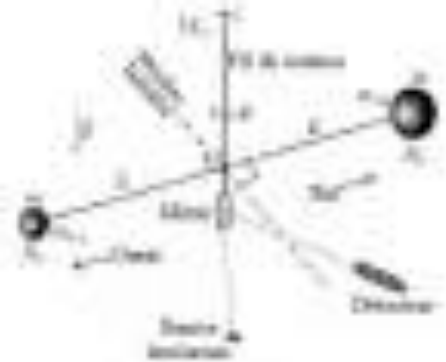
- **Conséquence : universalité de la chute libre**
- **Violations possibles**
  - Dépendance de la composition
  - Dépendance de la quantité de l'énergie d'auto-gravitation

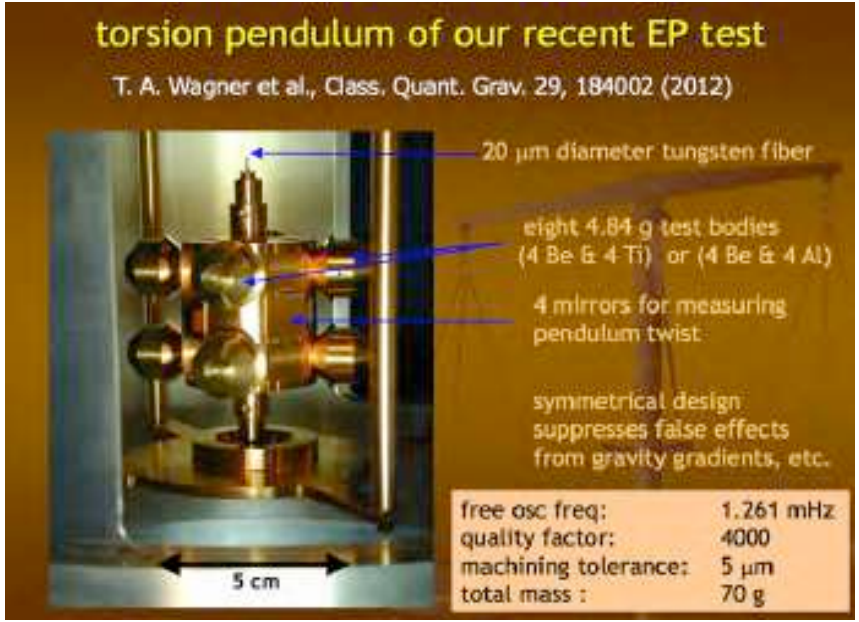
Le test du PE : une longue histoire



Balance de torsion : expérience Eotwash



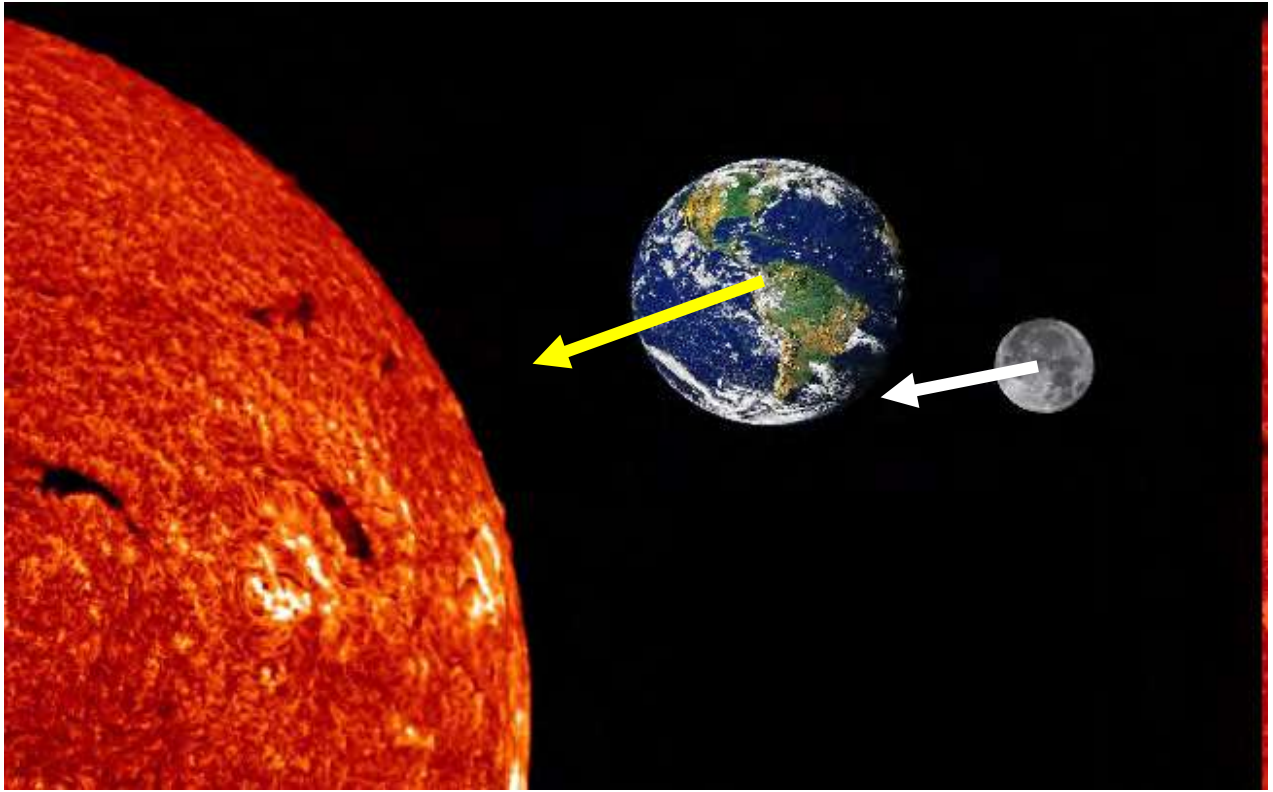




Credit University of Washington

$$\eta(Be,Ti) = (0.3 \pm 1.8) \times 10^{-13}$$
$$\eta(Be,Al) = (-0.7 \pm 1.3) \times 10^{-13}$$

Chute de la Terre et de la Lune



La Terre et la Lune ont-elles la même chute libre dans le champ de gravitation du Soleil ?

Télémétrie laser

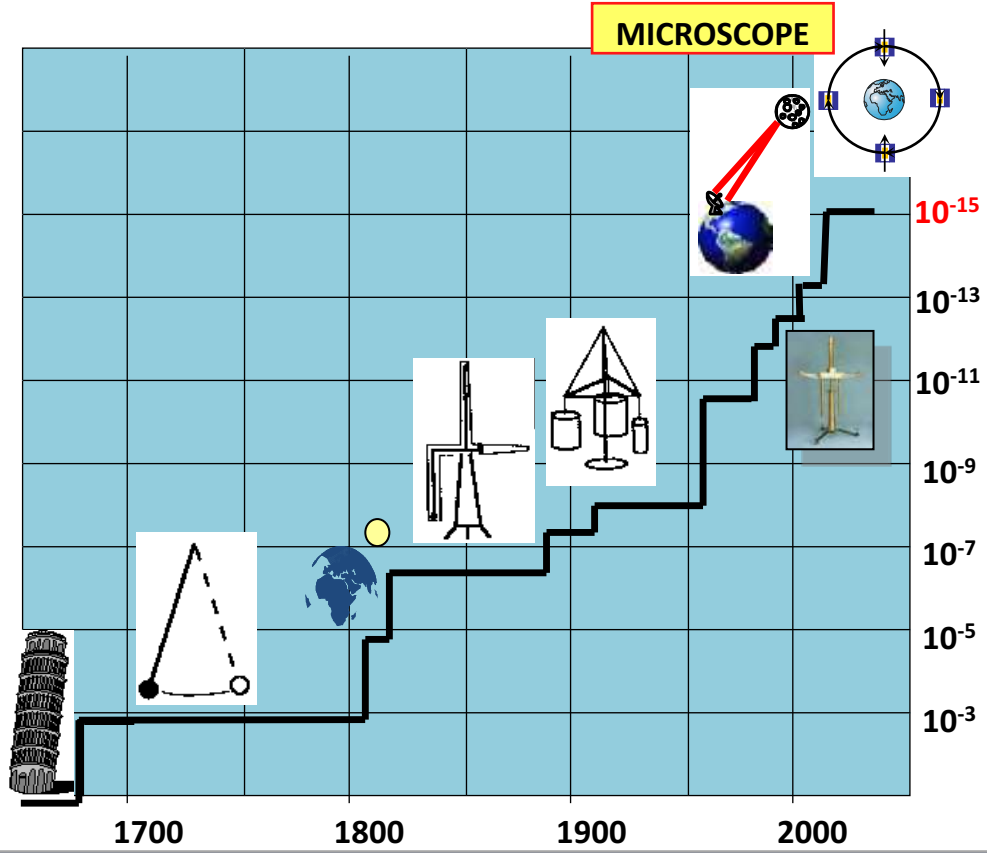
MeO: télémétrie laser sur satellites et sur la Lune (plateau de Calern)

$\eta(Terre, Lune) = (-0.8 \pm 1.3) \times 10^{-13}$ (Williams et al, 2013)
$\eta(Terre, Lune) = (-3.8 \pm 7.1) \times 10^{-14}$ (Viswanathan et al, 2018

Paramètre de Nordvedt δ_N qui quantifie l'impact de l'énergie interne de self-gravité

$$\eta = \delta_N (E_T - E_L);\ \delta_N = 4\beta - \gamma - 3$$

MICROSCOPE : une nouvelle étape vers 10^{-15}



Cela veut dire quoi 10^{-15} ?

- **En terme de rapport de forces :**

➔ rapport entre le poids d'un moustique et celui d'un supertanker

- **En terme d'accélération :**

$$\Delta\left(\frac{m_g}{m_i}\right) = 10^{-15} \Rightarrow \Delta\gamma = 10^{-15} g \sim 8\ 10^{-15}\ \mathrm{ms}^{-2}$$

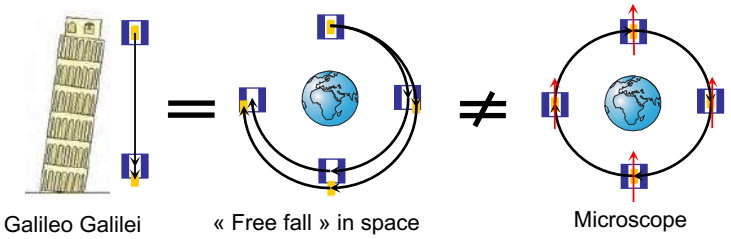
➔ 4 millions d'années pour passer de 0 à 1 m/s (marche lente)

La mission Microscope

MICROSCOPE

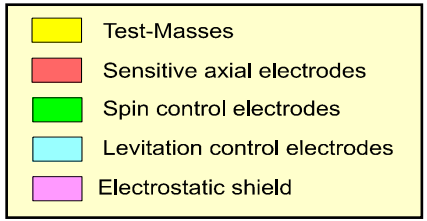
MICROSatellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence

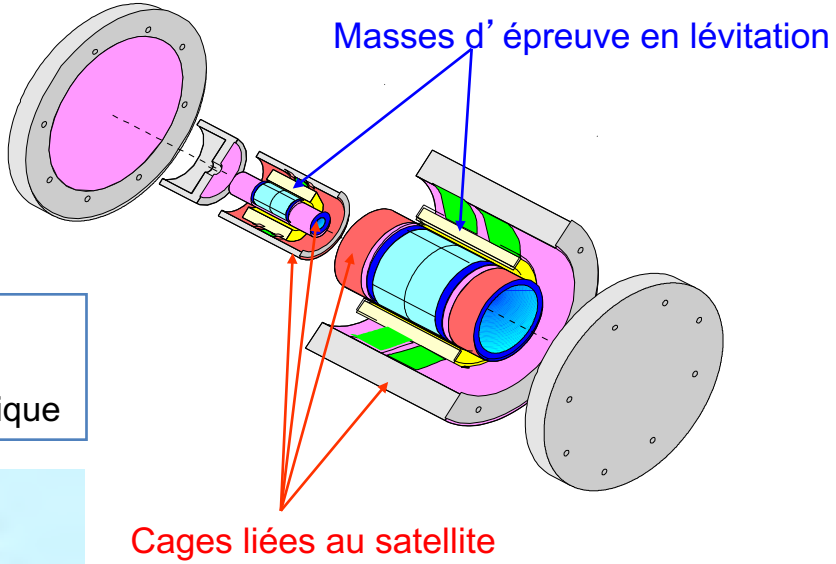
De Galilée à MICROSCOPE



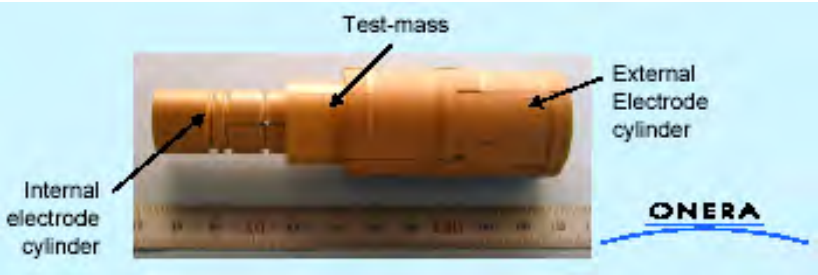
- Source gravitationnelle : la Terre
- Accélération inertielle: Mouvement orbital
- Contrôle des 2 masses de compositions différentes(< 10^{-11}m)

Les détecteurs : des accéléromètres différentiels (ONERA)





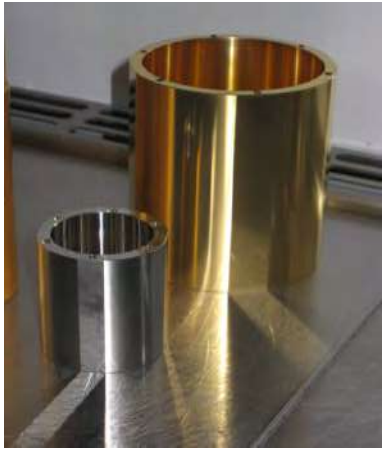
Le mouvement des masses (jaunes)
est mesuré par détection capacitive
et compensé par une force électrostatique



Document ONERA

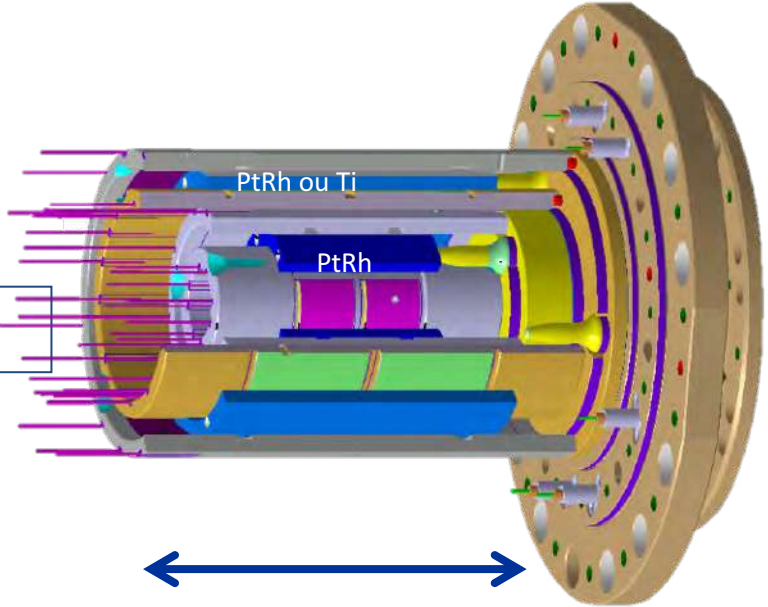
Document ONERA

T-SAGE : une ensemble de 2 accéléromètres différentiels



Masses d'épreuve fabriquées par le PTB (Allemagne)

- 1 senseur avec 2 masses identiques (Pt) : SUREF
- 1 senseur avec 2 masses différentes (Pt, Ti) : SUEP



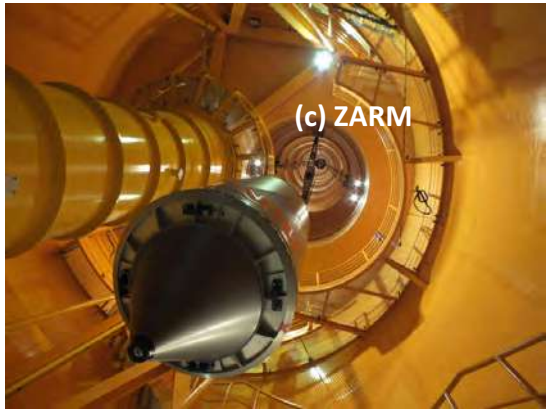
115 mm

Métrologie : précision ~ 1à 5 µm

Tests dans la tour de chute libre BREMEN

CENTER OF APPLIED SPACE TECHNOLOGY AND MICROGRAVITY ZARM

(c) ZARM



H = 120 m
➔ 5 s de chute libre
➔ 10 s avec catapulte

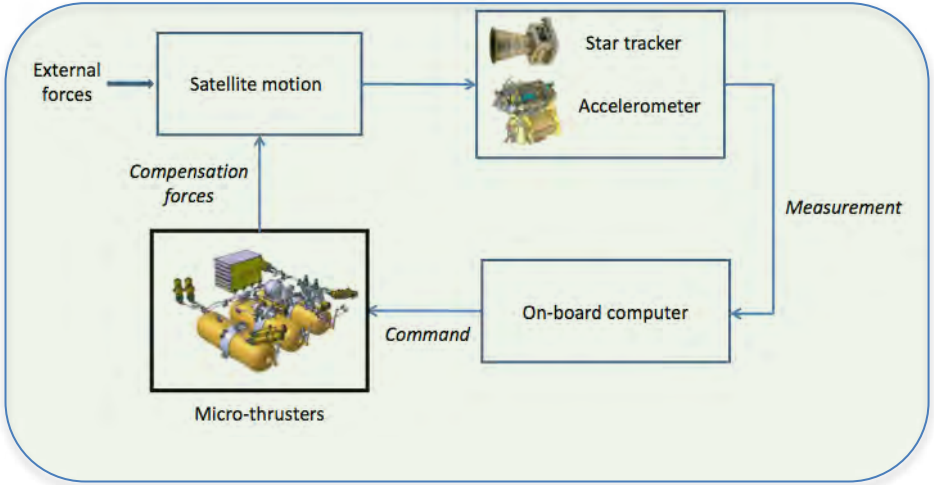
Le satellite MICROSCOPE

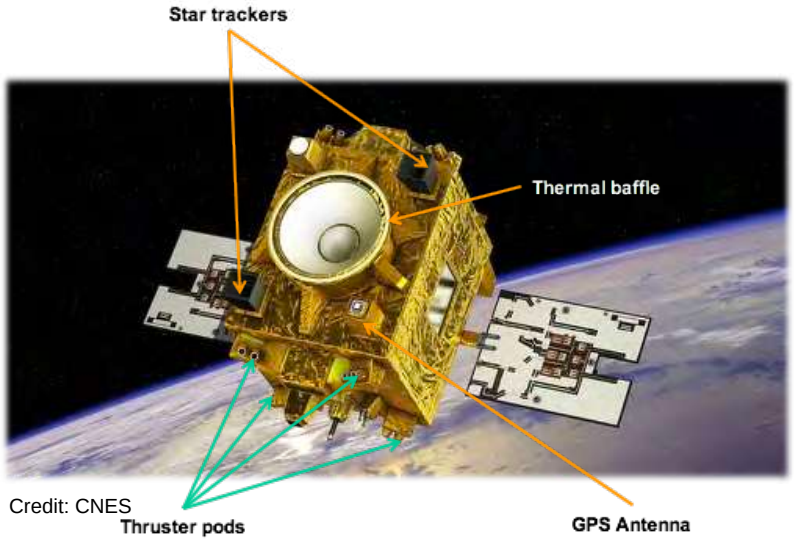
- **Un laboratoire spatial de 300kg**
- **Dimensions : 1,4 m x 1 m x 1,5 m**
- **Orbite :**
  - H = 710 km
  - Quasi-circulaire
  - Heliosynchrone

Le Système de Contrôle d'Attitude et d'Accélération

Objectifs :

- **minimiser les accélérations en mode commun : forces non gravitationnelles… ➔ « drag-free »**
- **Contrôler le mouvement angulaire**



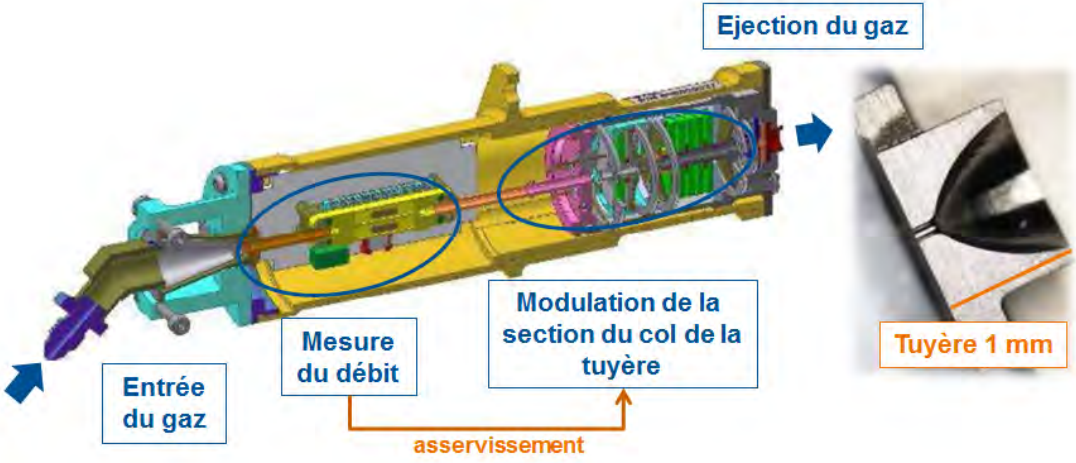


Credit: CNES

Performance meilleure que 10^{-12} m/s^2,
1 à 2 ordres de grandeur mieux que la spec.

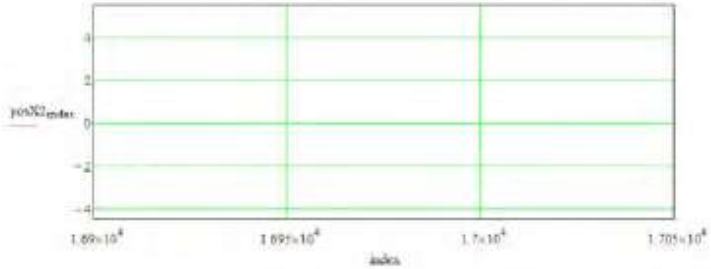
La micro-propulsion gaz froid

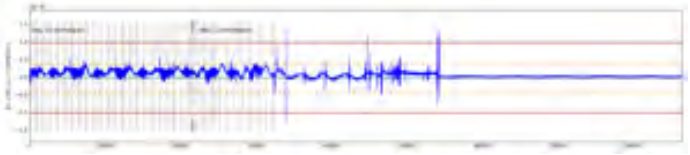
2 x 3 réservoirs ➔
16 kg de gaz à 350 bars en début de vie



Résolution de quelques µNewtons
= poids d'un grain de sable sur Terre

Lancement et premières étapes clef





- **<u>25 avril 2016 :</u> lancement depuis Kourou par Soyuz**
- **<u>2 mai :</u> libération des masses d'épreuve et activation du contrôle électrostatique**
- **<u>7 juin :</u> 1er contrôle d'attitude par hybridation des senseurs stellaires et des mesures d'accélération angulaire par T-SAGE**
- **<u>9 juin :</u> 1er drag-free 6 axes (36 boucles d'asservissement)**
- **16 décembre : début des opérations scientifiques**

Que mesure-t-on ?

Mesure théorique

L'accélération électrosatique (mesurée) équilibre les accélérations "naturelles"

$$
\begin{aligned}
\vec{\gamma}_i = & -[\mathbf{T}]\,\overrightarrow{GO}_i && \textit{gravity gradient}\\
& +(\delta_S - \delta_i)\,\vec{g} && \textit{EP violation}\\
& +[\mathbf{In}]\,\overrightarrow{GO}_i + 2\,[\mathbf{\Omega}]\,\mathring{\overrightarrow{GO}}_i + \mathring{\mathring{\overrightarrow{GO}}}_i && \textit{inertial accel. and relative motion}\\
& +\frac{\vec{F}}{M} + \vec{p} && \textit{non grav. forces including propulsion}\\
& -\frac{\vec{fp}_i}{m_i} && \textit{NG perturbations on the test mass}\\
& -\vec{g}_S(m_i) && \textit{local gravity (satellite and the rest of the payload)}\\
& -\sum_{j\neq i}\frac{\vec{fe}_j}{M} && \textit{electrostatic forces on other proof mass}
\end{aligned}
$$

Accélération « mesurée »

➔Satellite position
+ Earth's gravity model
+ Non gravit. model
+ Satellite attitude

➔Satellite attitude

➔control law of inertial sensors

➔control law of the drag-free system

Réponse des senseurs

- sensor (test mass) k
- theoretical acceleration (input): $\vec{\gamma}^{(k)}$
- measured acceleration (output): $\vec{\Gamma}^{(k)}$

$$\vec{\Gamma}^{(k)} = \vec{B}^{(k)} + [\mathbf{M}]^{(k)} [\mathbf{\Theta}]^{(k)} \vec{\gamma}^{(k)} + \vec{Q}^{(k)} + \left[\mathbf{N}^{(\mathbf{k})}\right] \vec{\dot{\Omega}}^{(k)} + \vec{\Gamma}_n^{(k)}$$

Biais

Scale factors
+ axis coupling
(symmetric matrix)

Test mass rotation

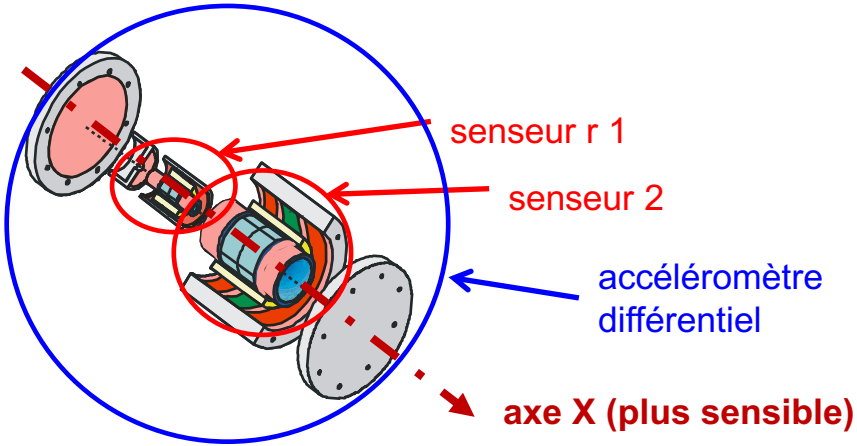
Quadratic terms

Angular to linear
acceleration coupling

Noise
(not white!)

Accélération différentielle

1 accélerométre différentiel = 2 senseurs (masses)



Nous nous intéressons à :

- **l'accélération différentielle (pour observer la différence de chute libre),**
- **projetée sur l'axe sensible X (axial)**

Accélération différentielle mesurée sur l'axe sensible X

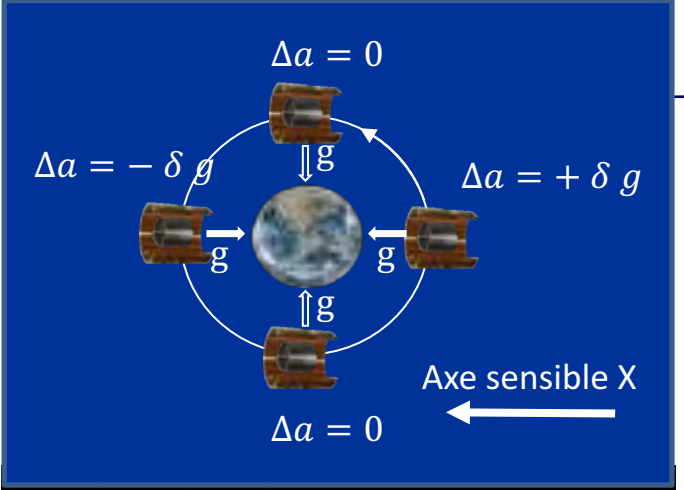
$$
\begin{aligned}
2\Gamma_x^{(d)} &= 2B_x^{(d)} \\
&+ \delta_x g_x + \delta_y g_y + \delta_z g_z \\
&+ \Delta_x S_{xx} + \Delta_y S_{xy} + \Delta_z S_{xz} + (ac_{13}\Delta_y + ac_{12}\Delta_z) S_{yz} + ac_{12}\Delta_y S_{yy} + ac_{13}\Delta_z S_{zz} \\
&+ (-ac_{13}\Delta_y + ac_{12}\Delta_z + 2nd_{11})\dot{\Omega}_x - (\Delta_z - 2ac_{13}\Delta_x + 2nd_{12})\dot{\Omega}_y + (\Delta_y - 2ac_{12}\Delta_x + 2nd_{13})\dot{\Omega}_z \\
&+ 2\left(-ac_{13}\dot{\Delta}_y + ac_{12}\dot{\Delta}_z\right)\Omega_x - 2\left(\dot{\Delta}_z - 2ac_{13}\dot{\Delta}_x\right)\Omega_y + 2\left(\dot{\Delta}_y - 2ac_{12}\dot{\Delta}_x\right)\Omega_z \\
&- mc_{11}\ddot{\Delta}_{x,inst} - mc_{12}\ddot{\Delta}_{y,inst} - mc_{13}\ddot{\Delta}_{z,inst} \\
&+ 2\left(ad_{11}\Gamma_x^{(c)} + ad_{12}\Gamma_y^{(c)} + ad_{13}\Gamma_z^{(c)}\right) \\
&+ K_{2xx}^{(1)}\left(\frac{\Gamma_x^{(1)} - {b_{0x}}^{(1)}}{{K_{1x}}^{(1)}}\right)^2 - K_{2xx}^{(2)}\left(\frac{\Gamma_x^{(2)} - {b_{0x}}^{(2)}}{{K_{1x}}^{(2)}}\right)^2
\end{aligned}
$$

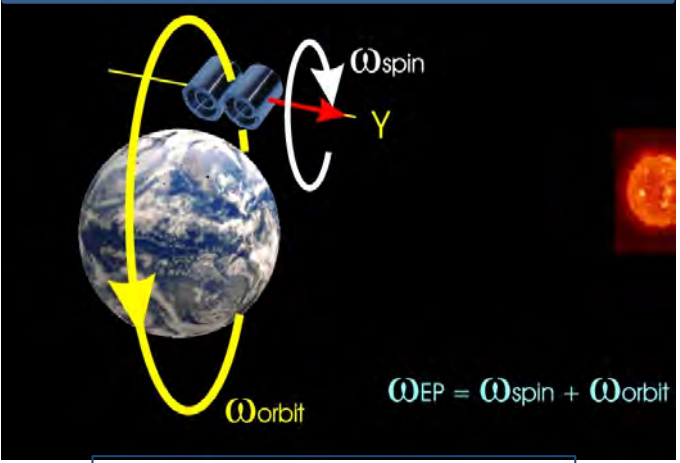
g = 8 ms^{-2}

Eötvös parameter

estimated by calibration
observed or/and computed
negligible at Fep

Gradient de gravité
avec des décentrages Δ inconnus





Fréquence fondamentale
Fep = Fspin + Forb

Spiner le satellite pour contrôler Fep

- **Le spin permet d'adapter la fréquence fondamentale du signal PE (Fep)**
- **Permet de minimiser le niveau de bruit**
- **Mais…**
  - La micro-propulsion impose une limite de la vitesse de spin
  - Tourner plus vite consomme plus de gaz
- **4 configurations implémentées :**
  - Pas de spin (pointage quasi-inertiel) ➔ Fep = Forb = 1.7 10^{-4} Hz
  - Spin V1, f = 5.9 10^{-4} Hz ➔ Fep = 7.6 10^{-4} Hz
  - Spin V2, f = 7.6 10^{-4} Hz ➔ Fep = 9.3 10^{-4} Hz
  - Spin V3, f = 2.94 10^{-3} Hz ➔ Fep = 3.11 10^{-3} Hz

Premiers résultats

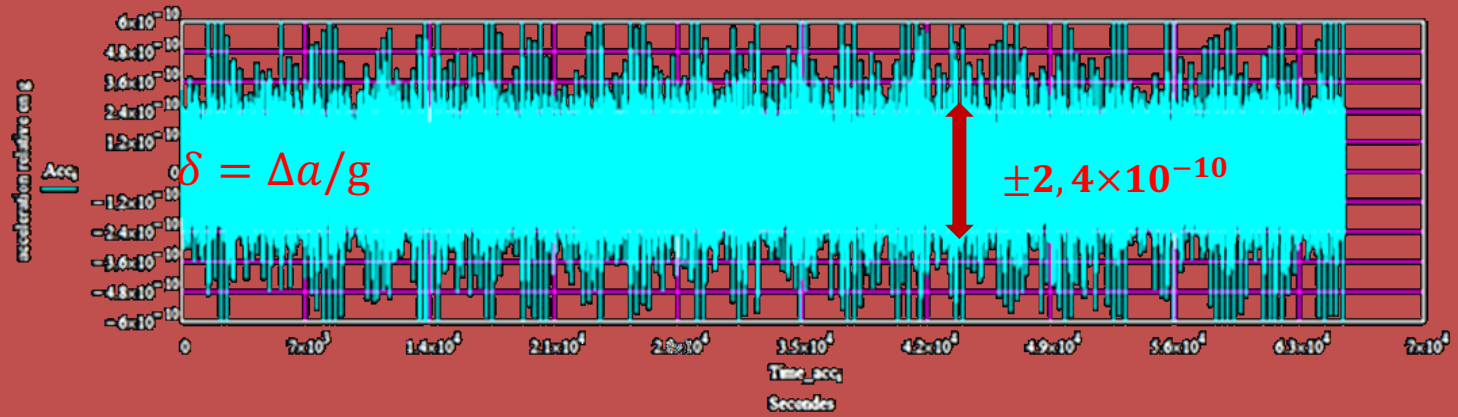
Les premières sessions de test du PE

171	2017-01-18T14:12:59.978006		3944	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	1.01295	E	0.9	0.9	6808.7	6826.2	
172	2017-01-18T16:03:22.968294	CAL_K1dxDFIS2_01_SUREF	3945	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	5.07000	E	4.7	5.6	6804	6820.6	
173	2017-01-19T00:25:49.137973		3950	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	3.07939	E	2.5	2.5	6801.2	6818	
174	2017-01-19T05:30:59.159261	EPR_V2DFIS2_01_SUREF	3953	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	120.00000	E	81.1	67.5	6720	6750.3	
175	2017-01-27T11:42:57.925815		4073	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	1.51531	E	1	0.6	6719	6740.6	
176	2017-01-27T14:13:07.942964	EPR_V2DFIS2_01_SUREF	4074	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	82.00000	E	56	48.4	6662.9	6701	
177	2017-02-02T05:39:19.100109		4156	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	2.57703	E	1.8	2	6661	6699	
178	2017-02-02T09:54:42.094912	CAL_tetadZDFIS2_01_SUREF	4159	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	5.07000	E	3.1	2.8	6657.8	6696.2	
179	2017-02-02T18:17:08.262799		4164	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	1.01295	E	0.6	0.7	6657.2	6695.5	
180	2017-02-02T19:57:31.253445	CAL_tetadYDFIS2_01_SUREF	4165	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	5.07000	E	2.6	3.1	6654.6	6692.4	
181	2017-02-03T04:19:57.421332		4170	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	1.18063	E	3.9	3.6	6650.5	6688.3	
182	2017-02-03T06:16:57.435594	CAL_deltaYDFIS2_01_SUREF	4171	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	5.07000	E	13.2	13.5	6637.1	6674.5	
183	2017-02-03T14:39:23.805273		4176	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	1.18365	E	0.4	0.6	6636.6	6673.8	
184	2017-02-03T16:36:41.576425	CAL_K21xx_02_SUREF	4178	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	1	10.00000	E	5.1	5.3	6631.4	6668.5	

205	2017-02-13T13:50:55.846867		4321	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	1.01295	E	0.7	1.1	6587	6622.4	
206	2017-02-13T15:40:18.833216	CAL_K1dxDFIS1_01_SUEP	4322	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	5.07000	E	4	3.7	6582.9	6618.5	
207	2017-02-14T00:02:44.983178		4327	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	1.01295	E	0.5	0.6	6582.5	6617.9	
208	2017-02-14T01:43:07.970959	CAL_K1dxDFIS2_01_SUEP	4328	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	5.07000	E	2.9	3.3	6579.4	6614.3	
209	2017-02-14T10:05:34.128091		4333	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	3.07939	E	10	9.3	6569.1	6604.9	
210	2017-02-14T15:10:44.141758	EPR_V8DFIS2_01_SUEP	4337	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	50.00000	E	176	151.3	6392.6	6453.3	
211	2017-02-18T01:45:43.539435		4387	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	1.51531	El	5.4	4.2	6386.9	6448.7	
212	2017-02-18T04:15:53.554441	EPR_V3DFIS2_01_SUEP	4388	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	76.07591	El	261.5	235.1	6123.1	6213.3	
213	2017-02-23T09:55:00.000000		4464	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	0	0.00000	E	0	0	6123.1	6213.3	
214	2017-02-25T09:55:00.000000	TSNA	4484	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	0	61.80639	E	0	3.3	6123.9	6209.7	Rep
215	2017-02-27T16:00:00.028541		4526	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	1.01295	E	1.3	1.1	6121.7	6207.8	
216	2017-02-27T17:40:23.014532	CAL_K1dxDFIS2_03_SUEP	4527	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	5.07000	E	4.9	8.3	6116.9	6199.3	
217	2017-02-28T02:02:49.169908		4532	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	3.07939	E	10.4	11	6106.4	6187.8	
218	2017-02-28T07:07:59.169132	EPR_V3DFIS2_01_SUEP	4535	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	120.00000	E	384.8	405.8	5721	5781.7	
219	2017-03-08T13:19:57.511429		4655	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	2.57703	E	3.7	4.9	5716.8	5776.4	
220	2017-03-08T17:35:20.494387	CAL_tetadZDFIS2_01_SUEP	4658	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	5.07000	E	3.9	7.9	5712.9	5768.3	
221	2017-03-09T01:57:46.642557		4663	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	1.01295	E	0.8	1.4	5712.1	5766.8	
222	2017-03-09T03:58:09.628548	CAL_tetadYDFIS2_01_SUEP	4664	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	5.07000	E	5.6	8.3	5706.3	5758.3	
223	2017-03-09T12:00:35.776718		4669	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	1.18063	E	2.9	4	5705	5754	
224	2017-03-09T13:57:35.785554	CAL_deltaYDFIS2_01_SUEP	4670	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	5.07000	E	11.9	15.7	5692.6	5738	
225	2017-03-09T22:20:01.933724		4675	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	1.18366	E	0.4	1.6	5691.9	5735.9	
226	2017-03-10T00:17:19.958477	CAL_K21xx_02_SUEP	4676	NO_ECLIPSE_NO_LUNE	2	5.07000	E	3.3	7.3	5688.3	5728.3	

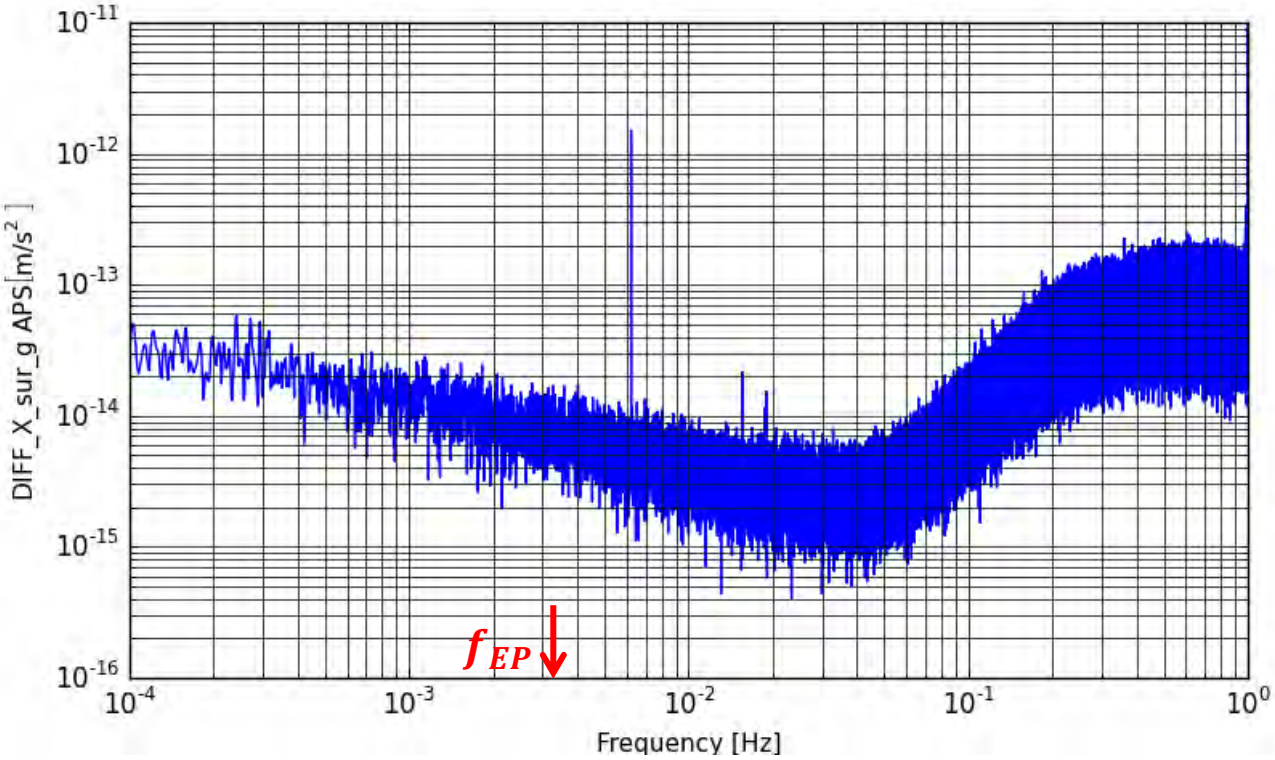
La mesure sur la session 218 (SUEP)

120 orbites = 8,25 jours ➔ 2 Giga octets de données



- Beaucoup de bruit… mais réparti sur toutes les fréquences
- Le traitement s'apparente à de la détection synchrone à f_{EP}

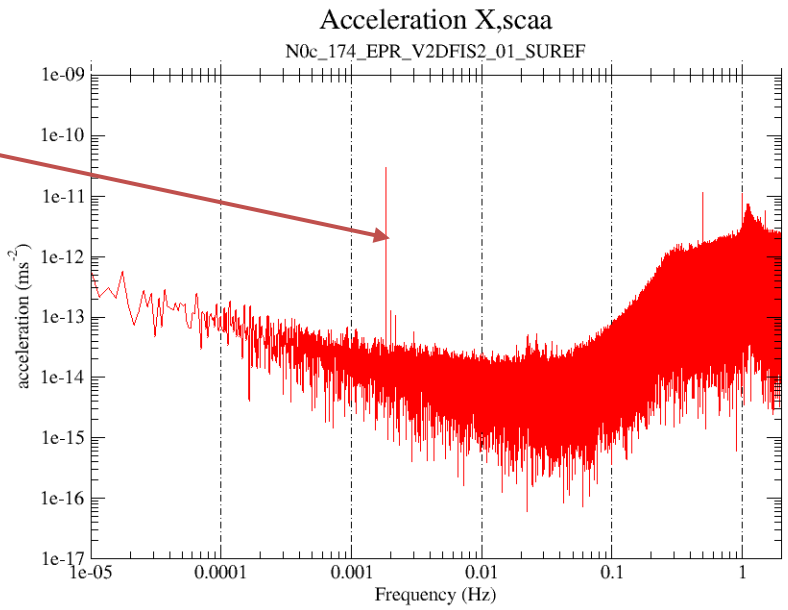
Analyse fréquentielle du signal



Gradient de gravité : estimation des “décentrages”

Les composantes ΔX and ΔZ (dans le plan orbital) peuvent être estimées grâce à ce signal à 2 Fep (amplitude + phase ➔ 2 paramètres)

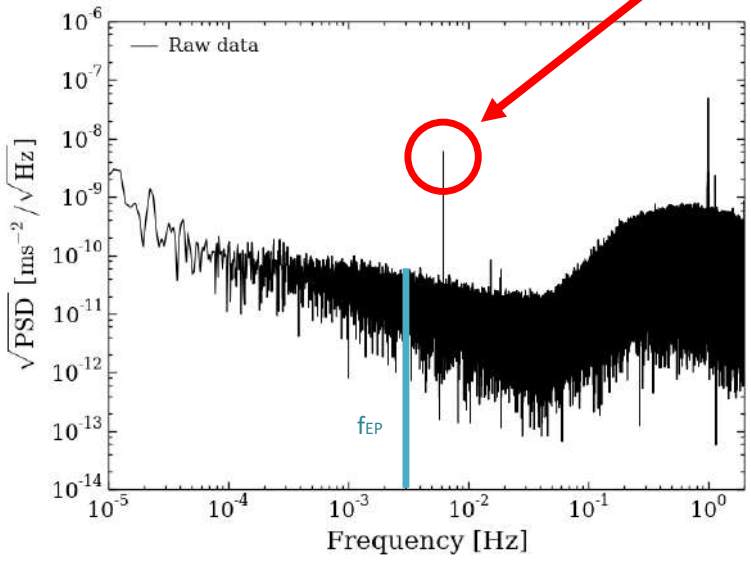
Δx = (-35.57 +/- 0.02) µm
Δz=(5.54 +/- 0.02) µm



Premières sessions de mesures : du gradient de gravité mais pas de signal de violation…

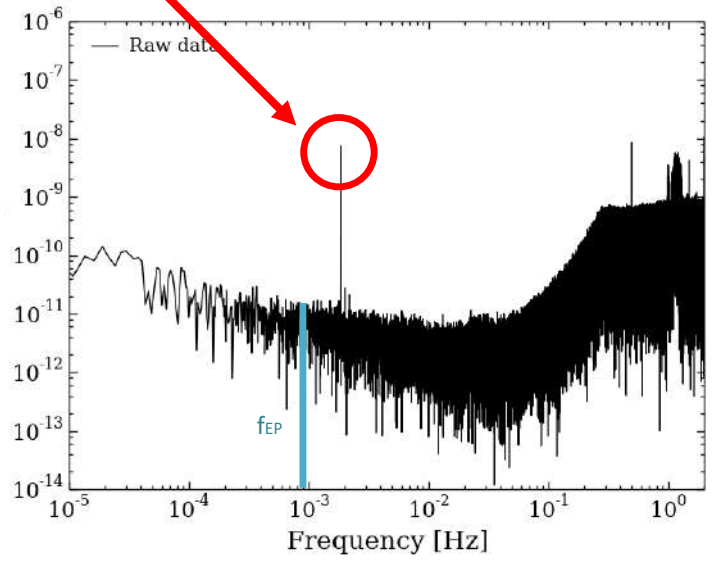
Gravity gradient effect:
due to an offcentring of the
test-mass as thin as the tenth of a hair!

EP accelerometer



$f_{\mathrm{EP}} = 3.11 \times 10^{-3}$ Hz

REF accelerometer



$f_{\mathrm{EP}} = 0.93 \times 10^{-3}$ Hz

En chiffres :

EP accelerometer				
Parameter	Unit	Estimation	Precision	Accuracy
$\delta(\mathrm{Ti},\mathrm{Pt})$	10^{-15}	1.0	9	9
Δ_x	$\mu\mathrm{m}$	20.1	0.04	0.1
Δ_y	$\mu\mathrm{m}$	-8.4	0.2	0.2
Δ_z	$\mu\mathrm{m}$	-5.6	0.04	0.1

Compatible avec 0

REF accelerometer				
Parameter	Unit	Estimation	Precision	Accuracy
$\delta(\mathrm{Pt},\mathrm{Pt})$	10^{-15}	+4	4	TBD
Δ_x	$\mu\mathrm{m}$	-3.5	0.02	0.1
Δ_y	$\mu\mathrm{m}$	5.9	0.06	0.2
Δ_z	$\mu\mathrm{m}$	+5.5	0.02	0.1

Pierre Touboul et al.
Phys. Rev. Lett. 119, 231101

Le consortium MICROSCOPE

PRL 119, 231101 (2017) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 8 DECEMBER 2017

MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle

Pierre Touboul,[1,*] Gilles Métris,[2,†] Manuel Rodrigues,[1,2] Yves André,[3] Quentin Baghi,[2] Joël Bergé,[1] Damien Boulanger,[4] Stefanie Bremer,[4] Patrice Carle,[5] Ratana Chhun,[1] Bruno Christophe,[1] Valerio Cipolla,[1] Thibault Damour,[6] Pascale Danto,[3] Hansjoerg Dittus,[6] Pierre Fayet,[7] Bernard Foulon,[1] Claude Gageant,[1] Pierre-Yves Guidotti,[3] Daniel Hagedorn,[8] Emilie Hardy,[1] Phuong-Anh Huynh,[1] Henri Inchauspe,[1] Patrick Kayser,[1] Stéphanie Lala,[1] Claus Lämmerzahl,[4] Vincent Lebat,[1] Pierre Leseur,[1] Françoise Liorzou,[1] Meike List,[4] Frank Löffler,[4] Isabelle Panet,[9] Benjamin Pouilloux,[3] Pascal Prieur,[3] Alexandre Rebray,[1] Serge Reynaud,[10] Benny Rievers,[4] Alain Robert,[3] Hanns Selig,[4] Laura Serron,[7] Timothy Sumner,[11] Nicolas Tanguy,[1] and Pieter Visser[12]

[1]*ONERA, chemin de la Hunière, BP 80100, F-91123 Palaiseau Cedex, France*
[2]*Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, IRD, Géoazur, 250 Avenue Albert Einstein, F-06560 Valbonne, France*
[3]*CNES, 18 Avenue Edouard Belin, F-31401 Toulouse, France*
[4]*ZARM, Center of Applied Space Technology and Microgravity, University of Bremen, Am Fallturm, D-28359 Bremen, Germany*
[5]*IHES, Institut des Hautes Études Scientifiques, 35 route de Chartres, F-91440 Bures-sur-Yvette, France*
[6]*DLR, Köln Headquarters, Linder Höhe, 51147 Köln, Germany*
[7]*LPTENS, École Normale Supérieure (PSL Research University), 24 Rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05, France*
[8]*PTB, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany*
[9]*IGN, Institut Géographique National, 73 Avenue de Paris, F-94160 Saint Mandé, France*
[10]*Laboratoire Kastler Brossel, UPMC-Sorbonne Université, CNRS, ENS-PSL Research University, Collège de France, F-75005 Paris, France*
[11]*Blackett Laboratory, Imperial College London, United Kingdom*
[12]*Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Kluyverweg 1, 2629 HS Delft, The Netherlands*

(Received 12 May 2017; revised manuscript received 20 September 2017; published 4 December 2017)

According to the weak equivalence principle, all bodies should fall at the same rate in a gravitational field. The *MICROSCOPE* satellite, launched in April 2016, aims to test its validity at the 10^{-15} precision level, by measuring the force required to maintain two test masses (of titanium and platinum alloys) exactly in the same orbit. A nonvanishing result would correspond to a violation of the equivalence principle, or to the discovery of a new long-range force. Analysis of the first data gives $\delta(\mathrm{Ti,Pt}) = [-1 \pm 9(\mathrm{stat}) \pm 9(\mathrm{syst})] \times 10^{-15}$ (1σ statistical uncertainty) for the titanium-platinum Eötvös parameter characterizing the relative difference in their free-fall accelerations.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.231101

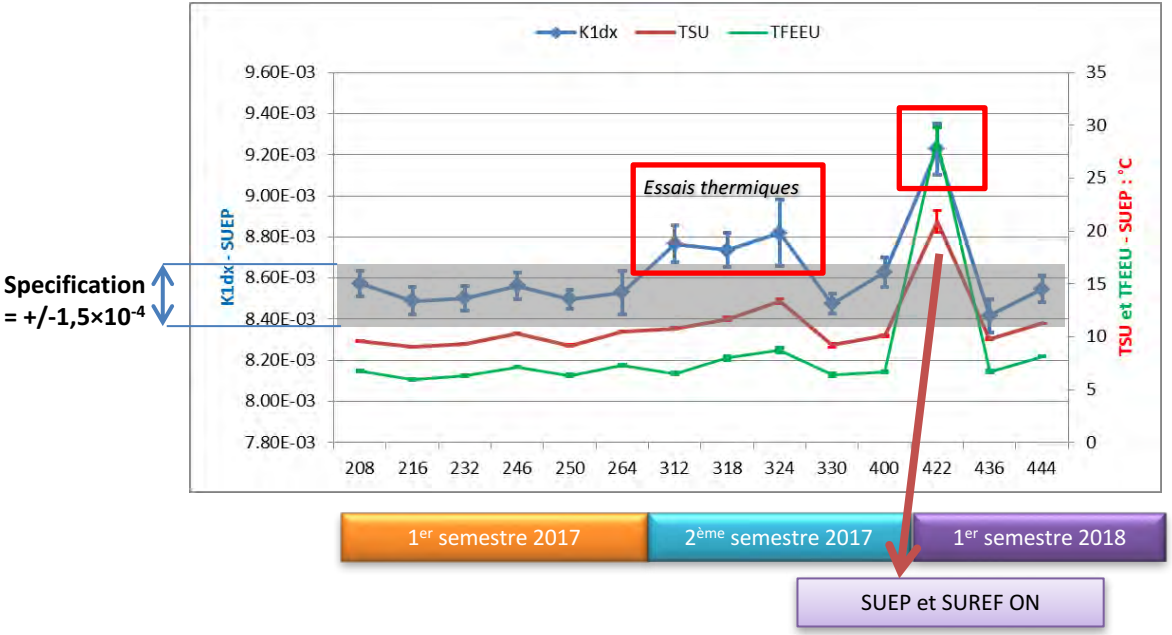
La suite

De nombreuses sessions scientifiques

- **Réduction des erreurs statistiques par accumulation de données :**
  - **1674 orbites (≈10^6 secondes) de test PE sur SUEP**
  - **766 orbites de test PE sur SUREF**

- **Réduire et mieux caractériser les erreurs systématiques :**
  - **Des dizaines d'étalonnages**
  - **De nombreuses sessions de caractérisation (thermiques…)**

Etalonnage : évolution des facteurs d'échelle sur SUEP



Corrélation avec la Température

Hors points chauds, Kd stable et les variations toujours dans l'enveloppe de spec sur 1 an.

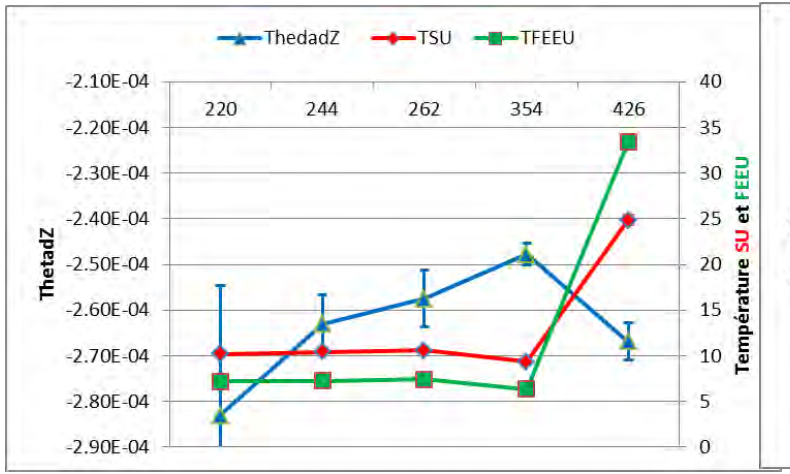
Estimée en vol toujours dans la spec.

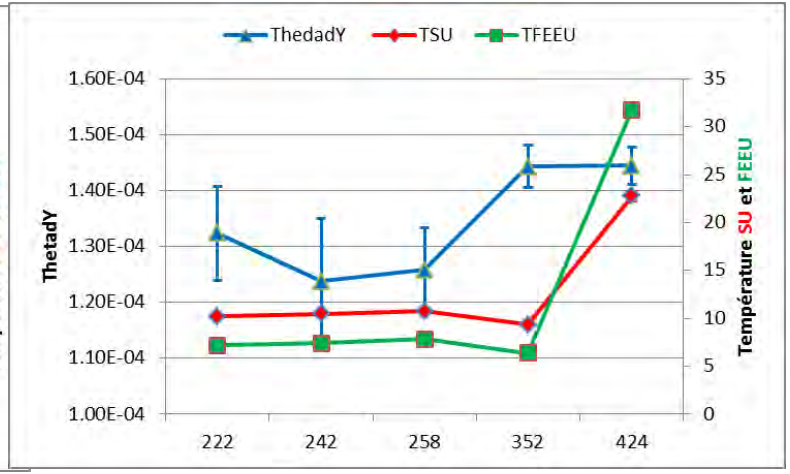
Pour ces points, une correction de la dérive de biais (ordre 1) préalable.

Etalonnage : évolution mes-alignement des masses d'épreuve sur SUEP

Les mes-alignements sont stables sur toute la mission : écart max < 30 µrad pour une spec à +/- 50µrad

Pas de lien évident avec la température





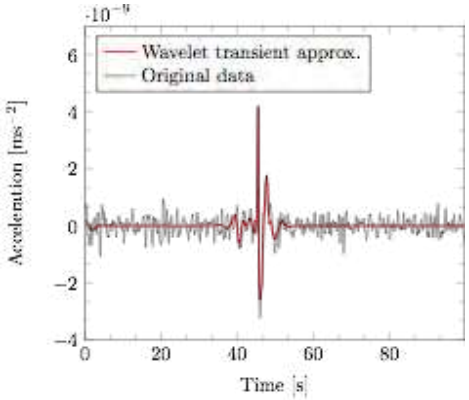
Bilan satellite au bout de 2 ans en orbites

Charge utile T-SAGE

- Malgré 3 anomalies sur des condensateurs (SUREF), les 2 doubles accéléromètres électrostatiques (SUEP et SUREF) ont bien fonctionné
- Beaucoup de données scientifiques et techniques à analyser finement pour améliorer le modèle instrumental (en particulier modèle thermique)
- Instrument très sensible (micro-débris ou craquement MLI-revêtement du satellite + des vibrations autour de 25-50Hz)

Satellite

- Orbite parfaite
- Très grande stabilité thermique
- SCAA excellent…
- …Mais tout a une fin, le gaz aussi



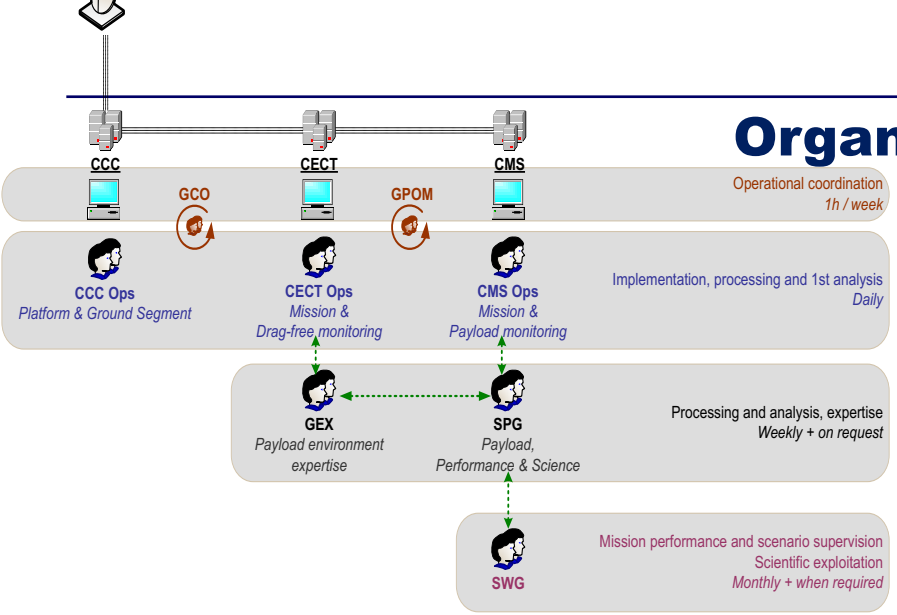
Statut de la mission

- Tir le 25 avril 2016
- 7 mois de recette en vol, compliquée
- Exploitation scientifique depuis décembre 2016
- Fin d’exploitation scientifique : été 2018
- Mesures d’aéronomie jusqu’en septembre 2018
- Retrait de service : semaine 42 (15-19 octobre) 2018
- Publication résultats complets en 2019

Les principaux organismes impliqués

- CNES: satellite, lancement, opérations sol, performances mission.
- ESA: propulseurs à gaz froid.
- DLR: masses d'épreuve (PTB), chutes libres et analyses (ZARM).
- ONERA: développement et tests de la charge, analyse mission and et performances, centre de mission scientifique.
- Géoazur (OCA-CNRS-UCA): analyses mission et spécifications, simulations et analyses des données.

Organisation



SWG :

- Noyau historique : P. Touboul, M. Rodrigues, G. Métris, C. Lämmerzahl, H. Dittus
- Représentants de thématiques scientifiques :
  - Gravitation : T. Damour
  - Fundamental Interactions : P. Fayet
  - Interdisciplinary Physics : S. Reynaud
  - Earth gravity field: I. Panet
  - Aeronomy : P. Visser
- Interaction autres missions ”similaires” : T. Sumner
- CNES : I. Petitbon, P.Y. Guidotti, A. Robert

Merci