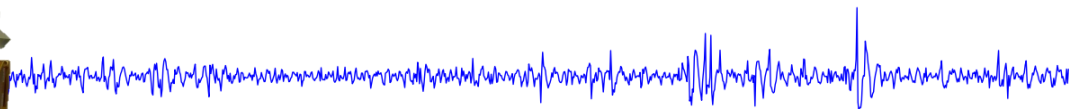
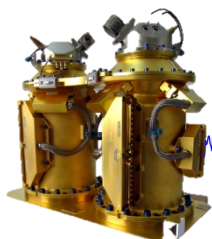


First Results of the MICROSCOPE mission

A test of the Equivalence principle in space



Pierre Touboul, Manuel Rodrigues, Gilles Métris
on behalf of the MICROSCOPE team

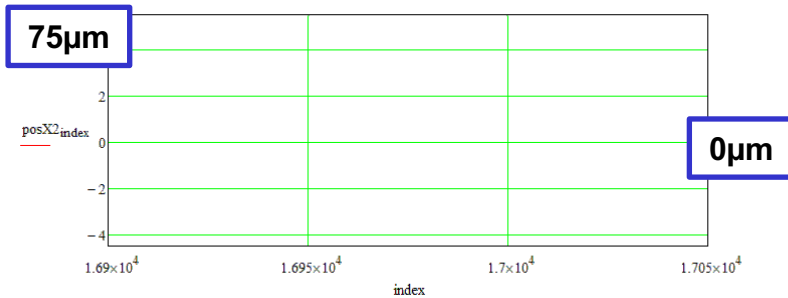


Launched on the 25th of April 2016

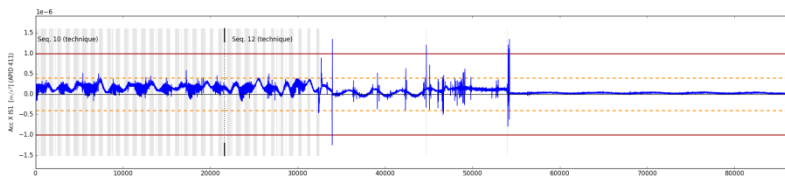


- 25th of April : satellite launch as piggy bag of Sentinel 1B by Soyutz

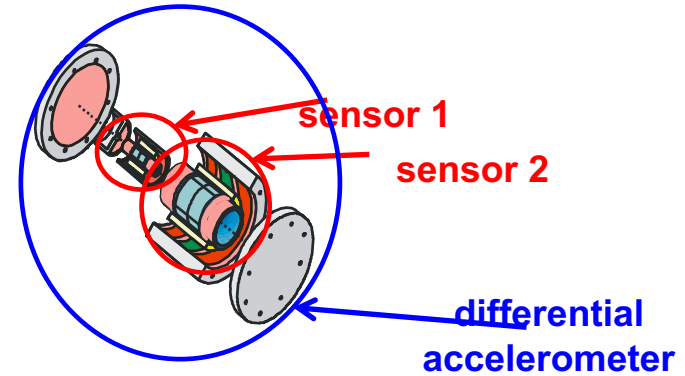
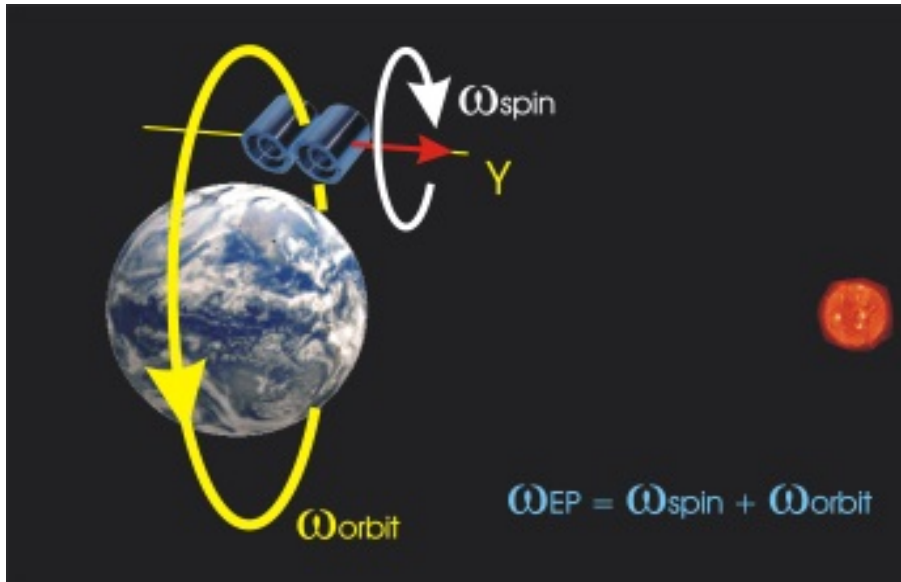
SUEP – titanium TM acquisition along X



- 2nd of May : test-masses release and electrostatic control in robust mode
- 11th May : 1st test of Payload science mode
- 7th of June: 1st Attitude control with hybridization of the Star Sensor & the Payload angular accelerometer
- 9th of June : 1st “drag-free” above 6 axes



Principle of the test in space



- Comparison of the measured accelerations (a_1 & a_2) applied on a pair of test-masses when orbiting on the same orbit in the Earth's gravity field ($7,92\text{m/s}^2$ @ 717km)
- 2 test bodies in Pt(Rh10%) for systematic error evaluation : **SUREF**
- 2 test bodies in Pt(Rh10%) vs Ti(Al6%) for the EP test : **SUEP**
- The measurement axis, X, is in the orbital plane = cylinder axis

$$\eta = \frac{a_1 - a_2}{\frac{1}{2}(a_1 + a_2)} = \frac{\left(\frac{mg}{mi}\right)_1 - \left(\frac{mg}{mi}\right)_2}{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{mg}{mi}\right)_1 + \left(\frac{mg}{mi}\right)_2\right]}$$

evaluated @ 10^{-15} level

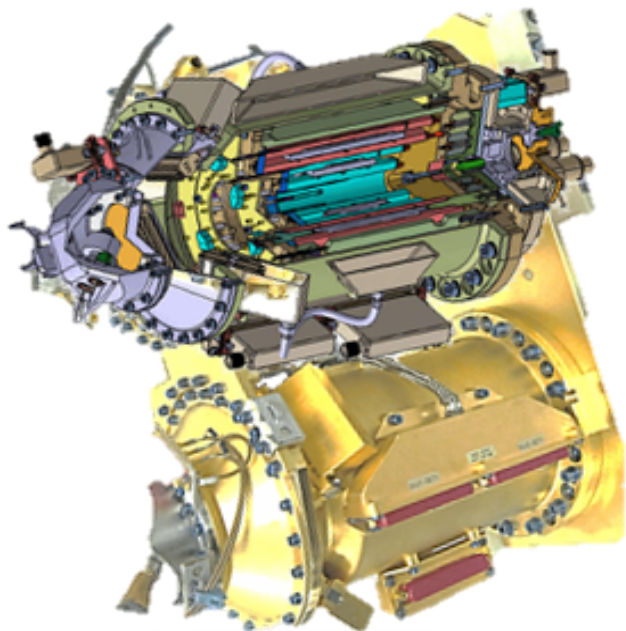
The eventual violation signal frequency is at orbital frequency + s/c rotation rate (spin mode)

$$\rightarrow F_{ep} = F_{orb} + F_{spin}$$

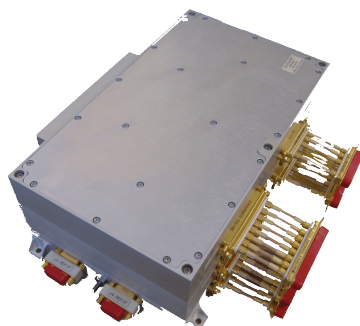
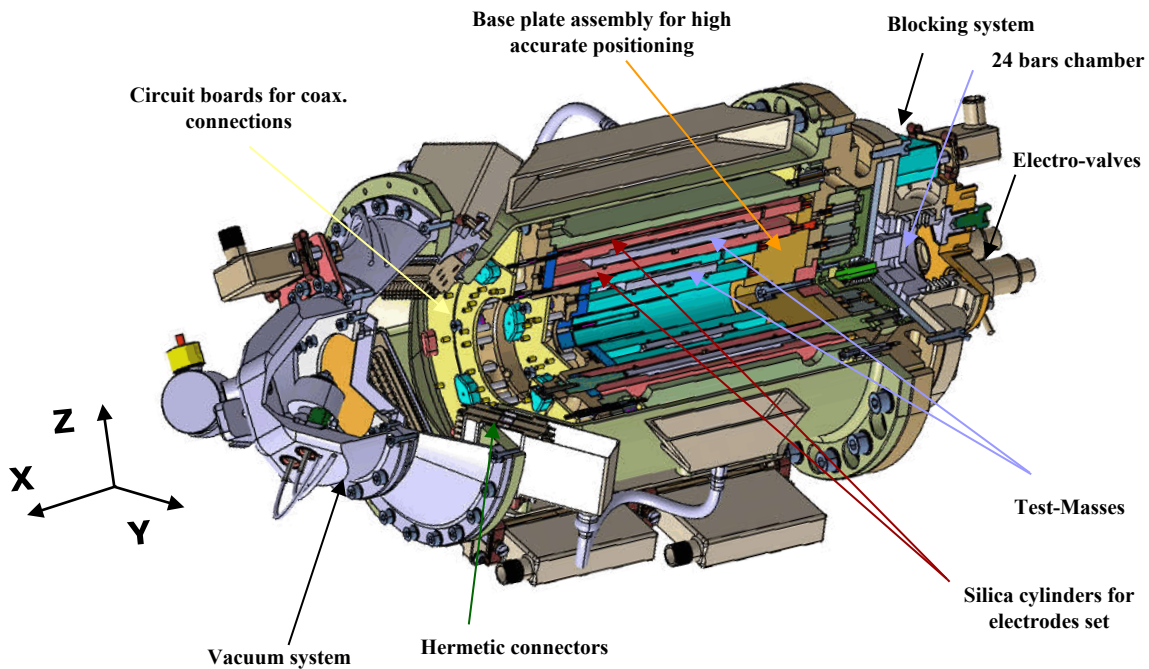
The instrument



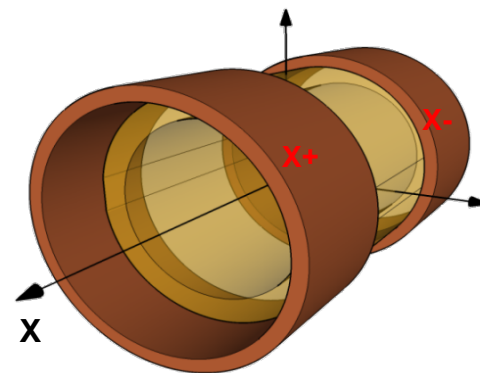
ICU : digital control laws, data conditioning



SU: 2 Sensor units REF + EP



FEEU : 2 low noise Electronics units

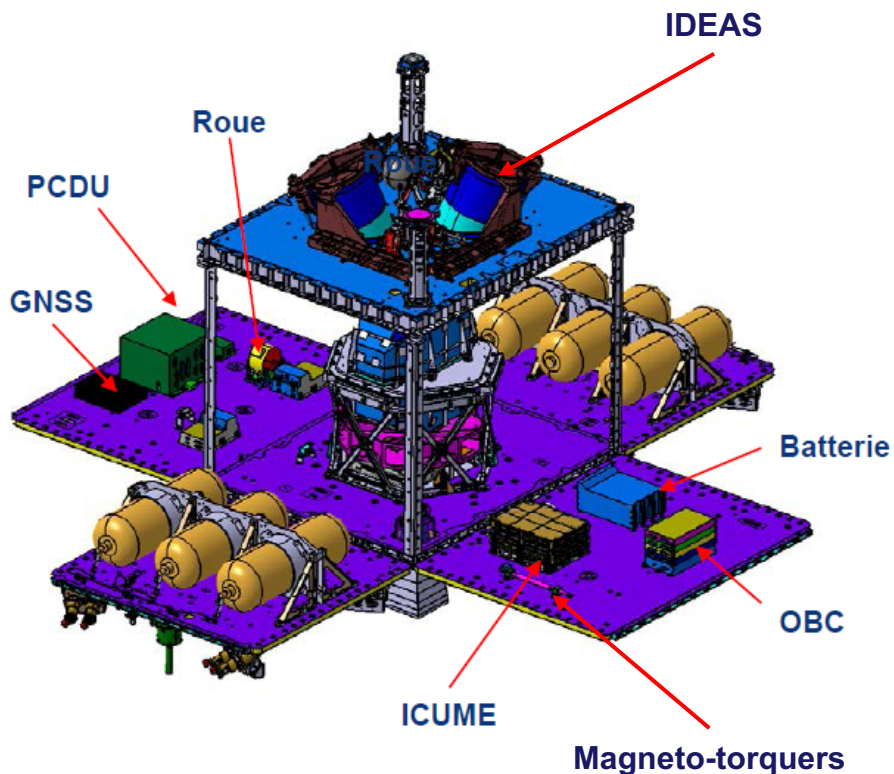


The payload inside the satellite

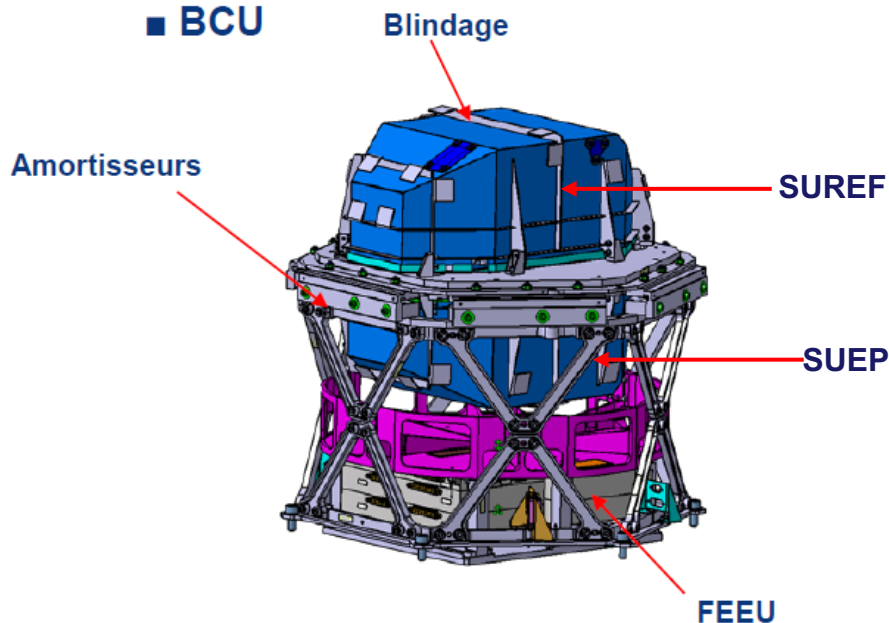


■ Satellite panneaux ouverts

Concept panneaux identiques Myriade



■ BCU

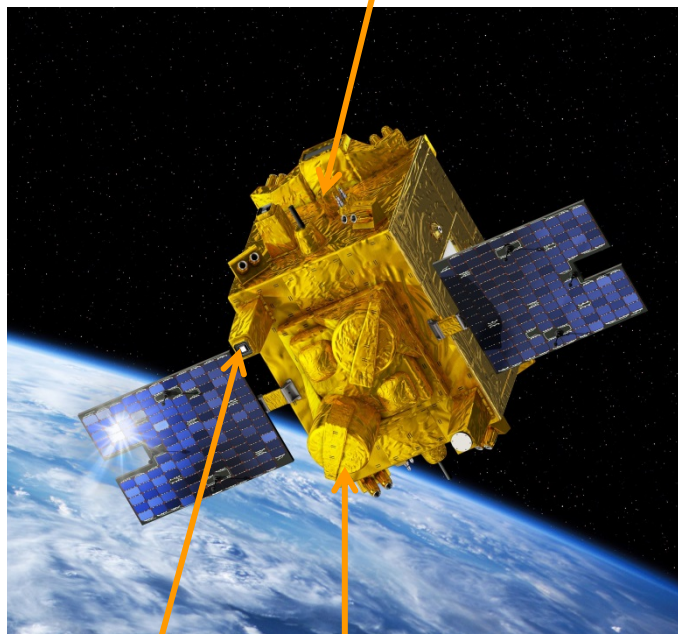


- The Sensor (SU) and the Low noise electronics (FEEU) is accommodated inside a passive thermal cocoon.
- The SU is accommodated inside a magnetic shield.

The cubic satellite



4 pods of redundant thrusters
Propulsion Wall System (reservoir+electronics)

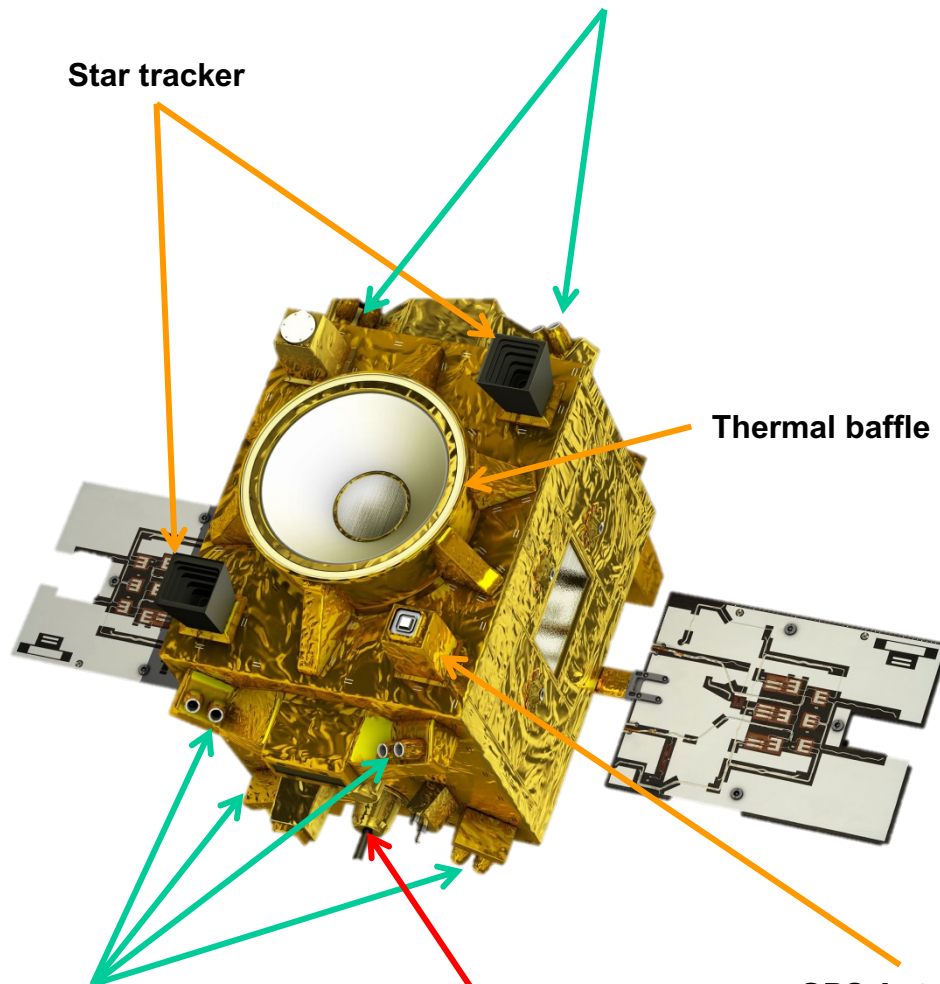


GPS antenna

IDEAS
De-orbitation system

Star tracker

Thruster pods



© CNES/ill./DUCROS David, 2016

Thruster pod

TM antenna

Thermal baffle

GPS Antenna



DFACS : control loop of 6 degrees of freedom

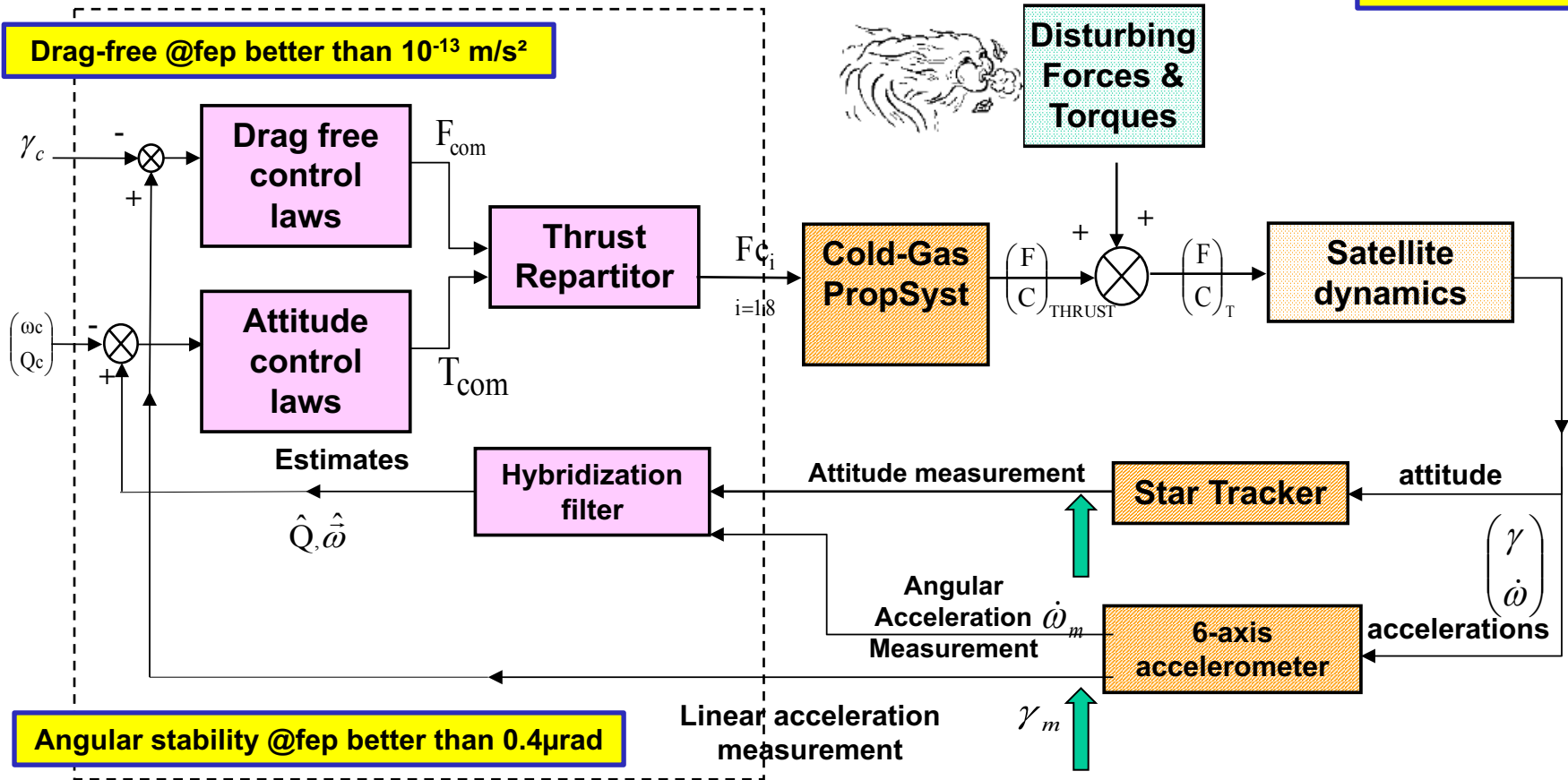


Bandwidths: 12 SU control loops (1Hz) + 6 DFACS loop (0.1Hz)
+ 8 thruster loop (10Hz)

Secondary Inputs For CAIBRATION

MCA software : 4Hz measure sampling rate

Drag-free @fep better than 10^{-13} m/s^2



Angular stability @fep better than $0.4 \mu\text{rad}$



The differential acceleration measured on the x axis (in the orbital plan)



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

$g = 8 \cdot 10^{-15}$

Eötvös parameter

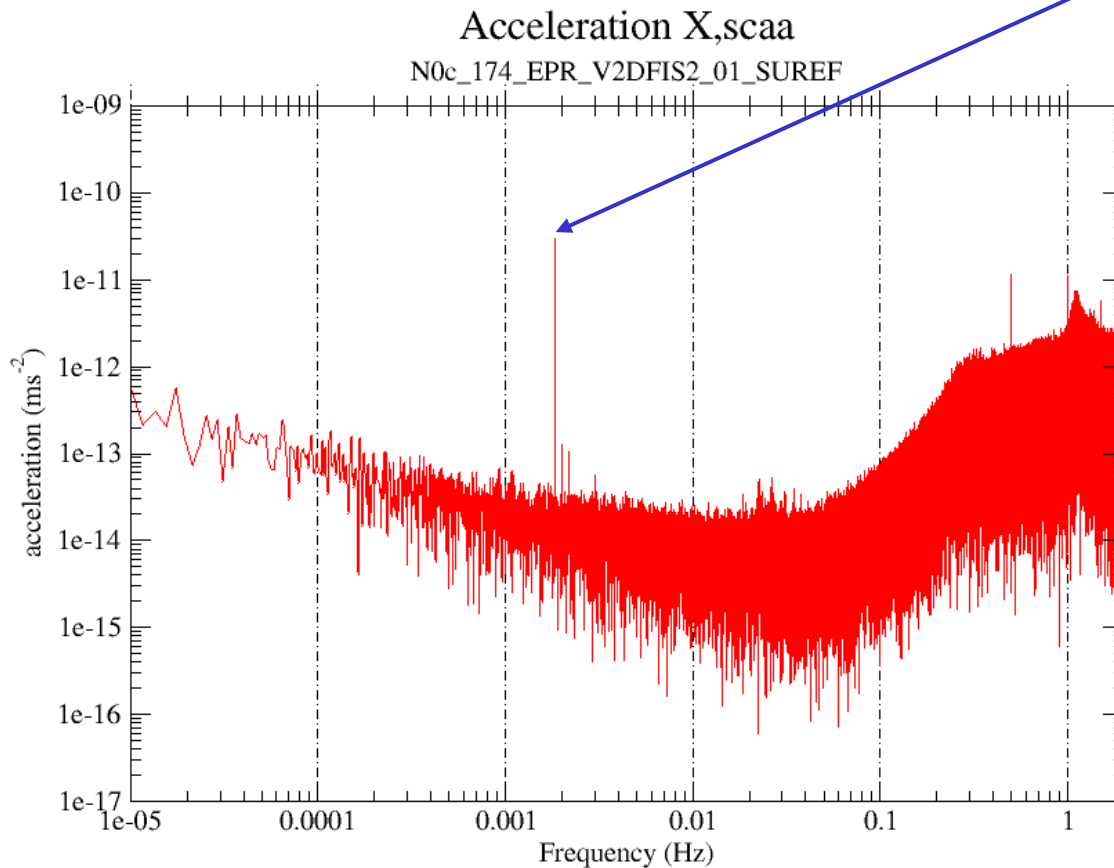
estimated by calibration
 observed or/and computed
 negligible at Fep

Symmetric part of gravity and inertial gradient
 with unknown off-centering Δ

Off-centering estimations



The in-plan (orbital) components of the off-centering ΔX and Δz can be estimated very accurately thanks to the very clear 2 Fep harmonic



Comment est le vrai MICROSCOPE ?

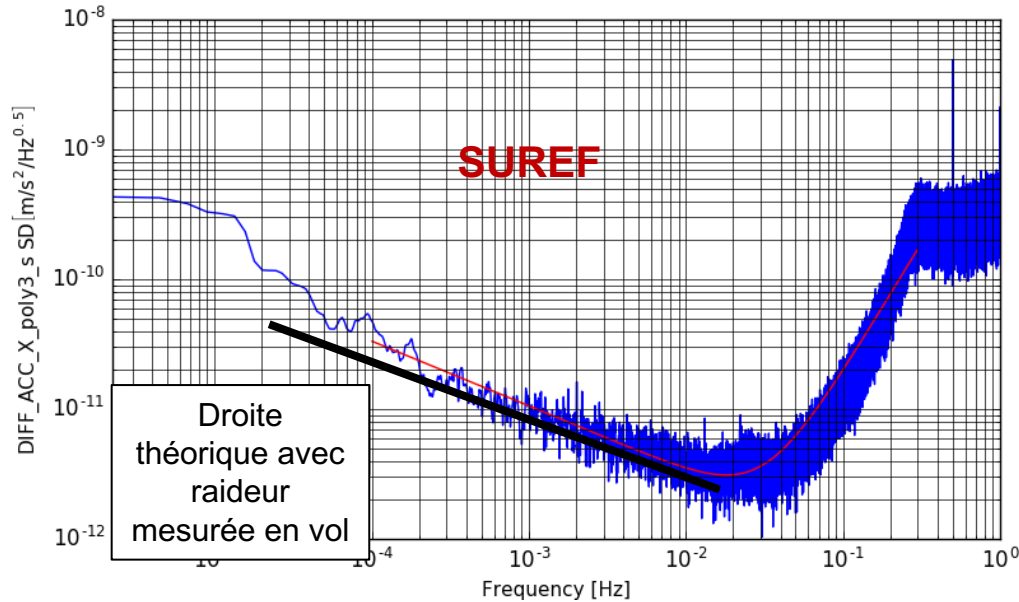


- La phase de recette en vol (terminée en novembre 2016) puis les premières sessions scientifiques ont permis d'optimiser certains paramétrages
- La quasi-totalité des sous systèmes ont des performances meilleures que les spécifications (orbite, attitude, drag-free, thermique...)
- 2 exceptions :
 - Court-circuit dans 2 capacités de l'électronique FEEU du SUREF
 - Surconsommation électrique et chauffage plus important
 - Pas d'impact direct sur les performances
 - Risque élevé si court-circuit sur une autre capacité → impact sur la stratégie d'utilisation des instruments.
 - Un niveau de bruit sur les accéléromètres plus élevé que l'attendu

Niveau de bruit des accéléromètres



- Raideur et amortissement du fil d'or (qui relie les masses d'épreuve à la masse) plus élevés que prévu => augmentation du biais et du bruit

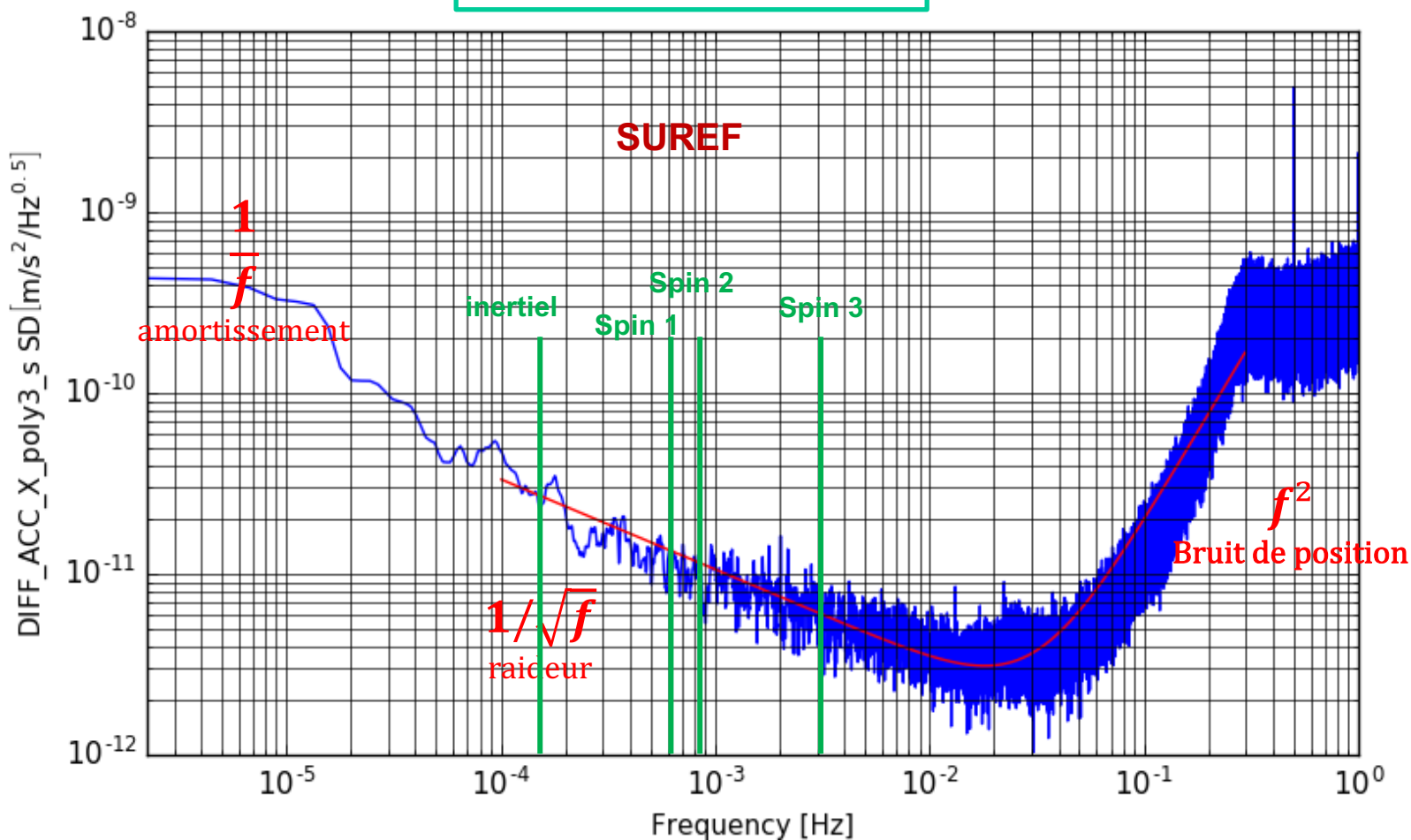


- Bruit plus élevé sur SUEP que sur SUREF (pas encore totalement compris)

Augmentation de la fréquence de spin

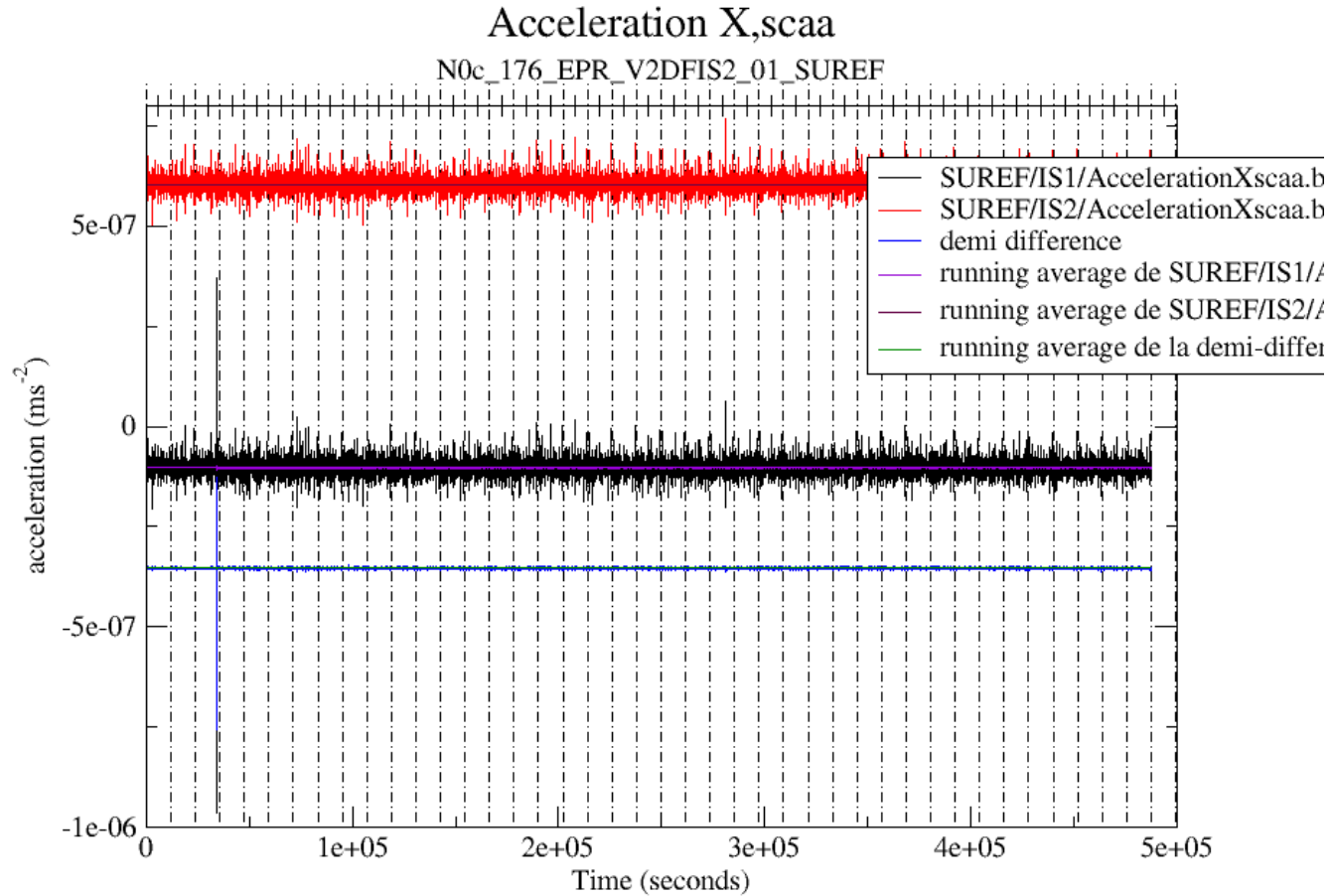


Rappel : $F_{ep} = F_{orb} + F_{spin}$



- Gain d'un facteur 3 sur le bruit SUEP en passant de spin2 à spin3
- On consomme 5 fois plus de gaz
- Bientôt testé sur SUREF

Numerous crackles are eliminated in differential mode



Où en est-on ?



- Plus de 1000 orbites en spin V3 sur SUEP
- Plus de 200 orbites en spin V2 sur SUREF
- Plus de 30 sessions d'étalonnage
- Paramètres instrumentaux mieux que spécifiés et très stables

Les résultats présentés dans la suite ne concernent que SUREF

Calibrations of differential, linear, responses



- All factors are small, well observed and very stable

Session	Differential Scale factors	Alignments end coupling	
		ad12 ($y \rightarrow x$)	ad13 ($z \rightarrow x$)
70	$-1.5 \cdot 10^{-2}$ ($\sigma=6 \cdot 10^{-5}$)		
114	$-1.5 \cdot 10^{-2}$ ($\sigma=10^{-4}$)		
128	$-1.45 \cdot 10^{-2}$ ($\sigma=2 \cdot 10^{-4}$)		
172	$-1.47 \cdot 10^{-2}$ ($\sigma=10^{-4}$)		
192	$-1.43 \cdot 10^{-2}$ ($\sigma=10^{-4}$)		
122		$-2.3 \cdot 10^{-5}$ ($\sigma=3 \cdot 10^{-6}$)	
178		$-2.6 \cdot 10^{-5}$ ($\sigma=2 \cdot 10^{-6}$)	
124			$-8.6 \cdot 10^{-5}$ ($\sigma=3 \cdot 10^{-6}$)
180			$-8.9 \cdot 10^{-5}$ ($\sigma=2 \cdot 10^{-6}$)

Off-centering

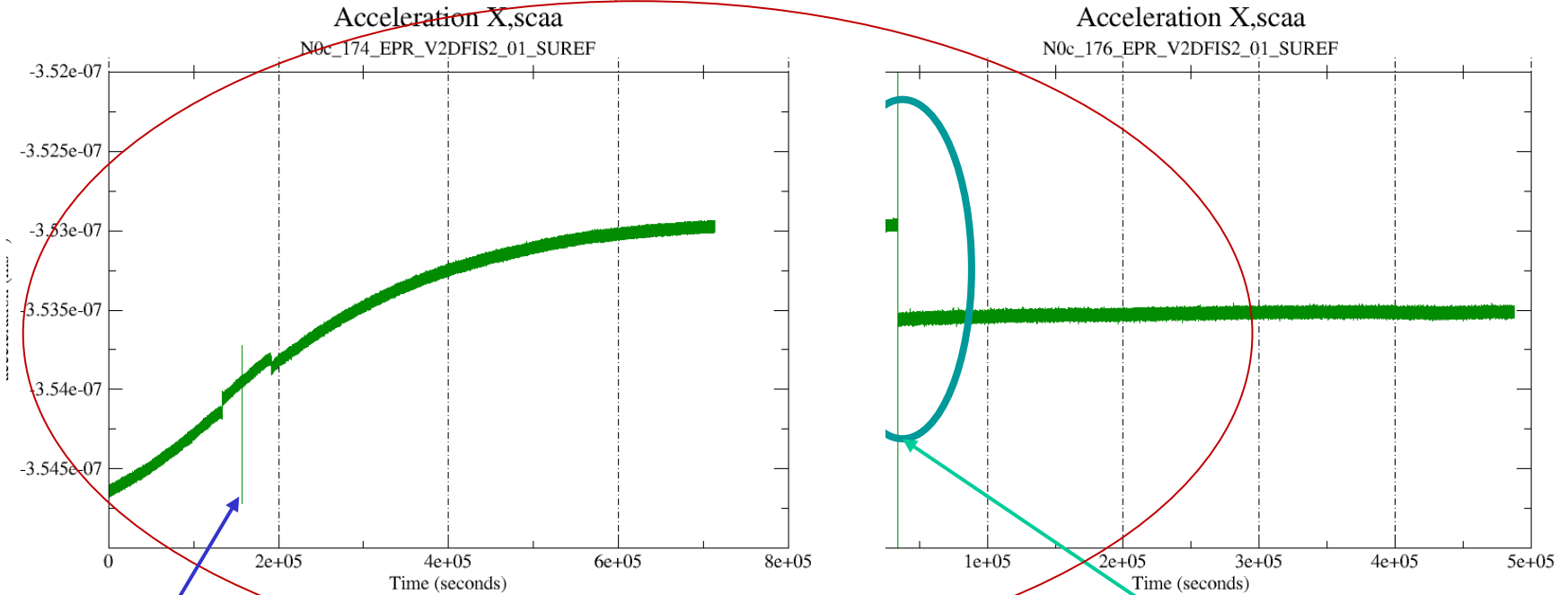


- During EP sessions for in plan (X,Z) components
- Dedicated calibration sessions for Y

Session	Δx (σ) in μm	Δz (σ) in μm	Δy (σ) in μm
120 (64 orb.)	-35.34 ($\sigma=0.025$)	5.57 ($\sigma=0.025$)	
174 (86 orb.)	-35.57 ($\sigma=0.016$)	5.52 ($\sigma=0.016$)	
176 (62 orb.)	-35.38 ($\sigma=0.017$)	5.54 ($\sigma=0.017$)	
126 (5 orb.)			5.82 (0.14)
182(5 orb.)			5.91 (0.06)

- Without correction of differential scale factors

Thermal stabilisation after a change of configuration



Micro-debris impact

Filtered data (running average)

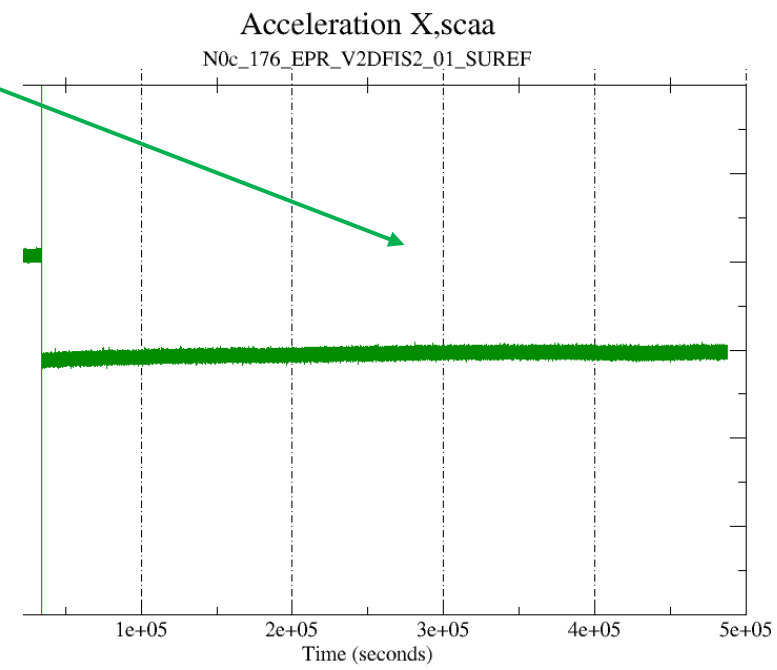
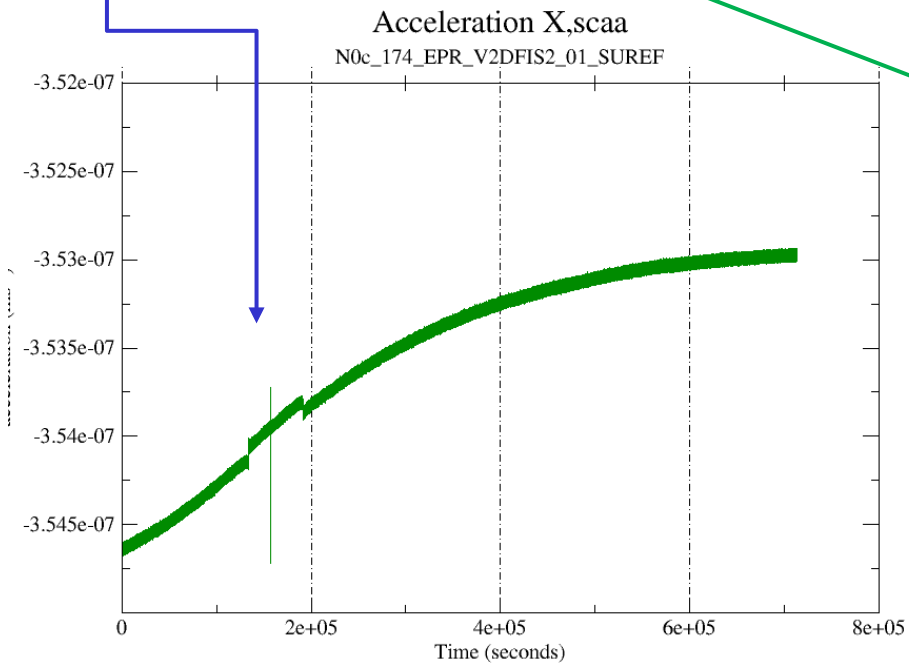
Leap

Estimation of the Eötvös parameter for Pt-Pt : preliminary results



- Jan. 2017 (science) : session 174, 120 orbits
only 86 continuous orbits without event (leap of bias)
→ $\eta = (11 \pm 5) 10^{-15}$
- Jan. 2017 (science) : session 176, 82 orbits
only 62 orbits usable with the best resituated attitude
→ $\eta = (4 \pm 4) 10^{-15}$

Preliminary



Et la suite?



- Satellite actuellement en veille pour cause de saison d'éclipses
- Reprise en septembre
- La date de fin de mission (conditionnée par les ressources en gaz) est liée aux configuration des sessions :
 - Sessions SUEP (les plus consommatrices) → meilleure précision sur η (Pt ; Ti)
 - Sessions SUREF (moins consommatrices sauf si V3) → caractérisation globale des erreurs systématiques
 - Sessions caractérisation (peu consommatrices) → caractérisation détaillée de l'expérience
- il reste 3.3kg de gaz sur les 8.3kg initiaux soit 975 orbites possibles en spin V3 pour le test EP.
- Stratégie pour la suite à valider par le Comité Directeur suite à la REVEX (aujourd'hui et demain)
- La stratégie que nous proposons conduit à un fin de mission EP en février 2018
- Il resterait alors un peu de gaz pour des essais techno. non liés au test EP.

Conclusion



- Microscope est un système poussé au limites (par exemple 38 boucles d'asservissement combinées) pour améliorer le test du PE d'un facteur 100
- Malgré 2 anomalies (2 capas en court-circuit), et un bruit plus élevé qu'attendu sur les accéléromètres, le comportement général est excellent
- L'analyse de deux sessions SUREF donne un sigma au niveau de $4 \cdot 10^{-15}$ pour le paramètre d'Eötvös Pt-Pt
- Le cumul des données de plusieurs sessions (non présenté ici) va améliorer le rapport signal à bruit
- Etant donnée la qualité de tous les sous-systèmes, les bilans montrent que l'erreur est dominée par le stochastique sur l'instrument
- Résultats pour SUEP à venir
- Des caractérisations complémentaires vont être conduites en seconde partie de mission

Thank you for your attention

