

L'espace comme laboratoire de physique fondamentale :

## Le projet MICROSCOPE

**R. Bonneville**

**Grain de Ciel  
Pornichet, le 10/06/2022**

**I. Qu'est ce que le Principe d'Equivalence ?**

**II. Tester le PE**

**III. Le projet Microscope**

# **I. Qu'est ce que le Principe d'Equivalence ?**

# La physique aujourd'hui

- **la physique repose sur 2 constructions théoriques de nature et de structure très différentes :**
- **la Relativité Générale**
  - une théorie géométrique et non quantique de la gravitation
  - elle décrit l'univers à grande échelle
- **le « modèle standard » de la physique des particules**
  - basé sur des théories quantiques des champs
  - il rend compte du catalogue des particules élémentaires et de leurs interactions autres que la gravitation
    - interaction électromagnétique
    - interaction nucléaire faible
    - interaction nucléaire forte
    - champ de Higgs

# Singularité de la gravitation

➤ 1<sup>ère</sup> loi de Newton :  $\Sigma \mathbf{F} = m_i \boldsymbol{\gamma}$

- $m_i$  : « masse inertielle »

- mesure l'inertie d'un corps (sa résistance au mouvement dans un champ de forces quelconque)

➤ 2<sup>ème</sup> loi de Newton :  $\mathbf{F}_g(1 \leftrightarrow 2) = G m_g(1)m_g(2)/R_{12}^2$  ou  $\mathbf{F}_g = m_g \mathbf{g}$

- $m_g$  : « masse gravitationnelle »

- mesure la charge gravitationnelle d'un corps (détermine le champ gravitationnel qu'il subit ou qu'il exerce)

- à comparer par exemple avec la loi de Coulomb en électrostatique :  $\mathbf{F}_e = q \mathbf{E}$

➤ constat empirique :  $m_i = m_g$

➤ conséquence :  $\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{g}$   
en l'absence de forces non gravitationnelles

» « principe d'équivalence »

# Le principe d'équivalence

- conséquence du PE : **universalité de la chute libre**
  - 2 corps de masse et/ou de composition chimique différentes tombent avec une même accélération dans un champ de gravitation
- cette identité entre gravitation et accélération en l'absence d'autres forces est validée pour des masses d'épreuve soumis à un champ de gravité extérieur (*équivalence faible*) mais aussi pour des objets qui sont eux-mêmes source de gravité (*équivalence forte*)

# Le principe d'équivalence

- **le PE est une caractéristique fondamentale de la RG**
  - **la gravitation y est interprétée comme la déformation de l'espace – temps par la distribution de matière et de rayonnement**
    - cette distribution modifie la géométrie de l'espace – temps
    - en retour, cette géométrie détermine le mouvement des objets

# Problème

- la RG n'est pas la théorie ultime de la gravitation car elle ne prend pas en compte les effets quantiques, essentiels dans l'univers primordial
- or il n'existe pas aujourd'hui de théorie quantique satisfaisante de la gravitation ...
- ... ni *a fortiori* de théorie unifiant la gravitation avec les autres interactions fondamentales

## Les théories d'unification

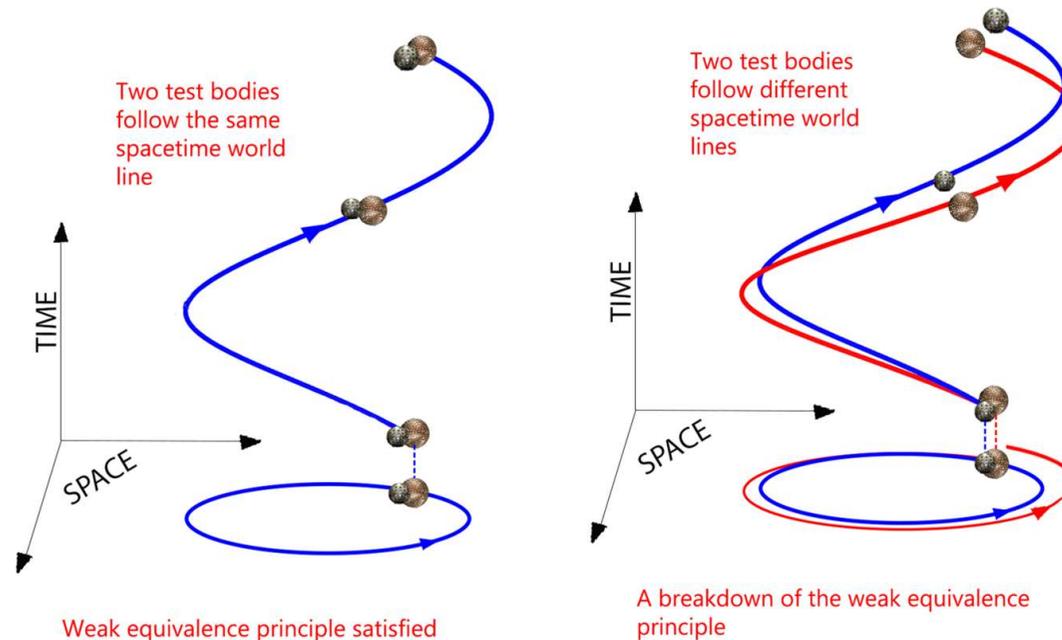
- toutes les tentatives théoriques pour unifier la gravitation avec les autres interactions fondamentales (i.e. pour concilier la Relativité Générale et la physique quantique) présentent des ingrédients communs, e.g. des dimensions supplémentaires (4d →  $\geq 10$ d)
- **ces théories supposent et/ou impliquent notamment l'existence de nouvelles particules et de nouvelles interactions**
- les prédictions de ces constructions théoriques peuvent être confrontées aux observations et aux expériences, ce qui permet d'éliminer ou de contraindre certains modèles

## Les théories d'unification

- ces nouvelles interactions prédites par les théories d'unification se coupleraient différemment aux leptons (électrons) et aux baryons (neutrons et protons)
- elles dépendraient donc de la composition chimique des corps ( $L = Z$ ,  $B = N+Z$ )
- l'existence de ces interactions se traduirait donc par une violation du PE à un certain degré de précision
- selon des développements théoriques récents (Damour et Veneziano) une telle violation se produirait entre  $10^{-13}$  et  $10^{-15}$

# Les théories d'unification

- **tester la validité du PE a donc un intérêt majeur pour la physique fondamentale**
  - un résultat positif serait la signature d'une nouvelle interaction et donc d'une nouvelle physique au-delà de la RG et du modèle standard
  - un résultat négatif contraindrait fortement les constructions théoriques



## **II. Tester le PE**

## Un peu d'histoire



# Galilée



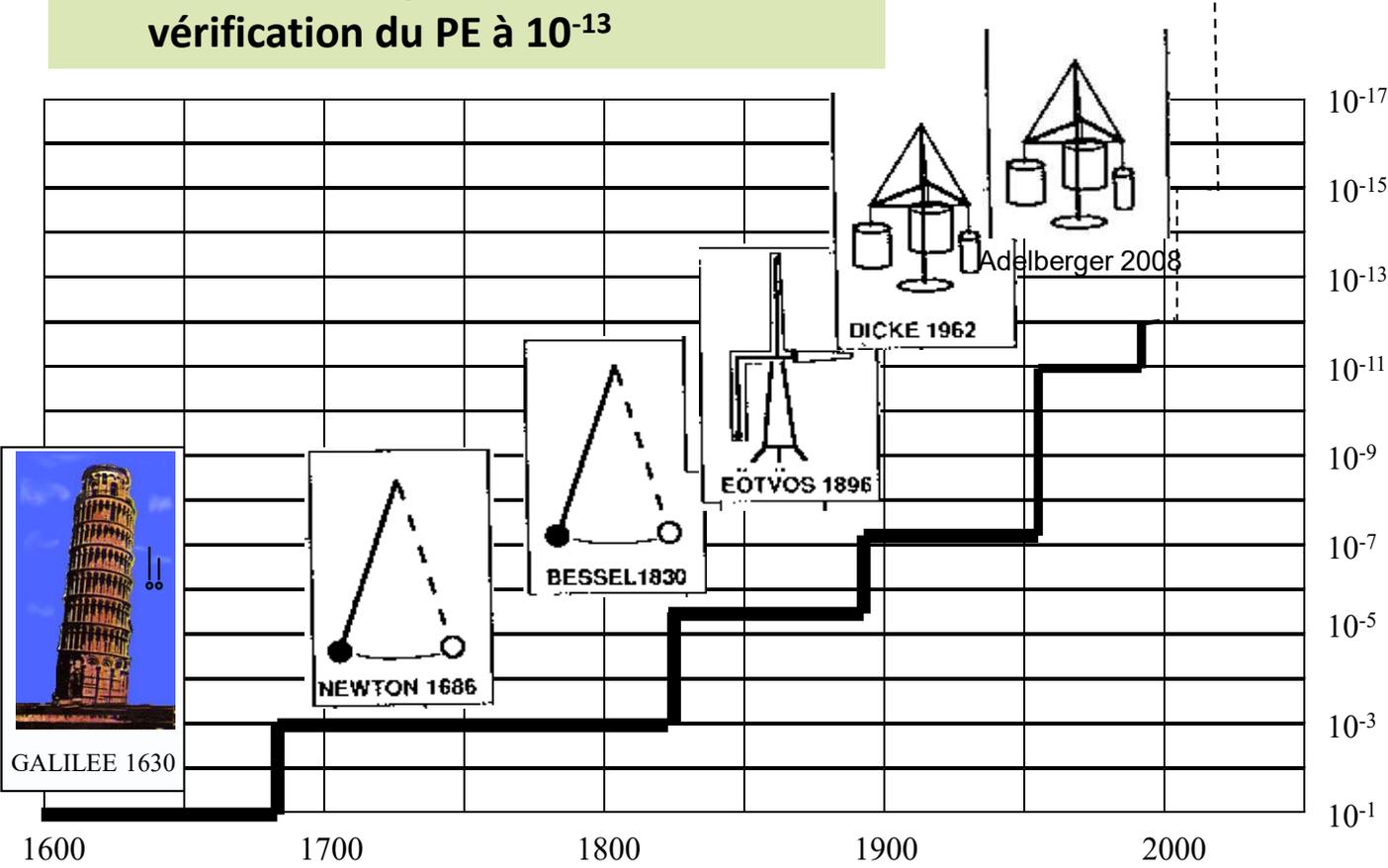
**Le principe de l'universalité de la chute libre a été formulé par Galilée (*Dialogue concernant deux sciences nouvelles*, 1636)**



[A propos de la résistance de l'air](#)

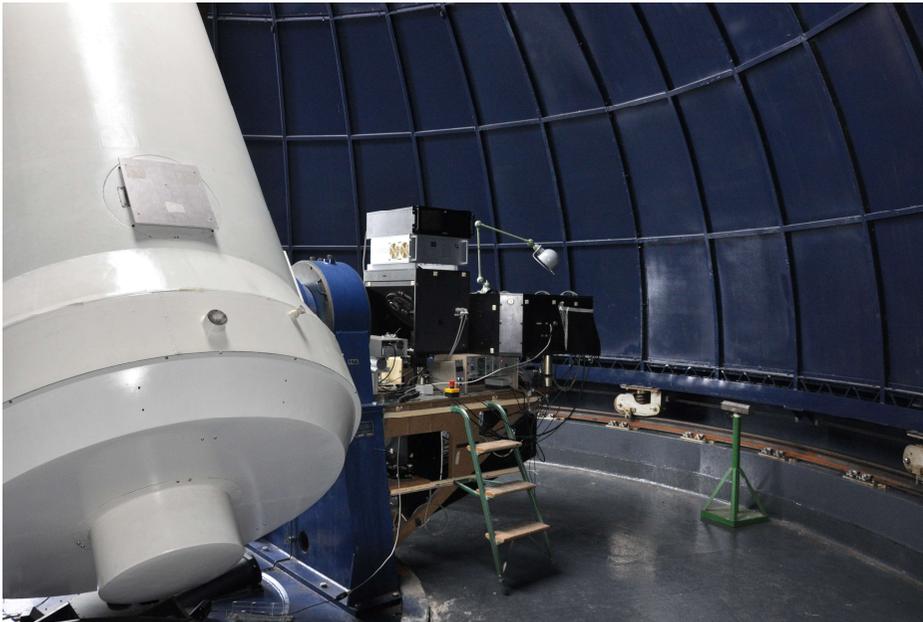
# Où en est-on?

meilleures expériences au sol :  
vérification du PE à  $10^{-13}$

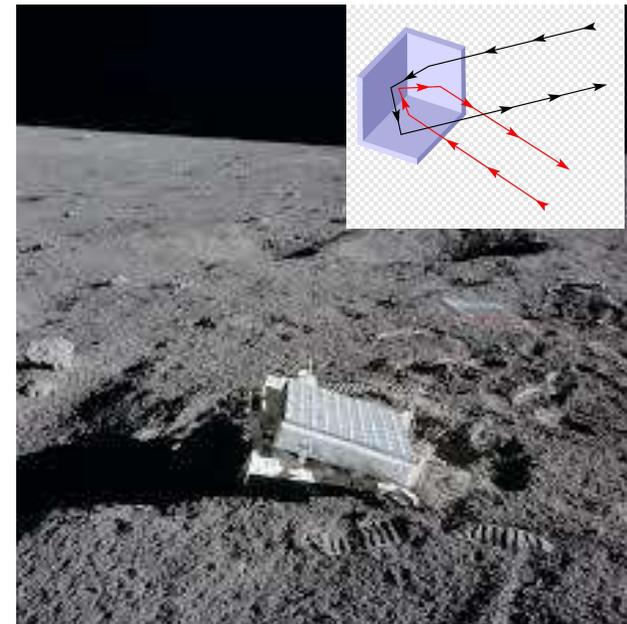


# L'expérience de tir laser Lune (Lunar Laser Ranging)

Station de tir laser Lune du plateau de Calern à Grasse  
(crédit: Observatoire de la Côte d'Azur)



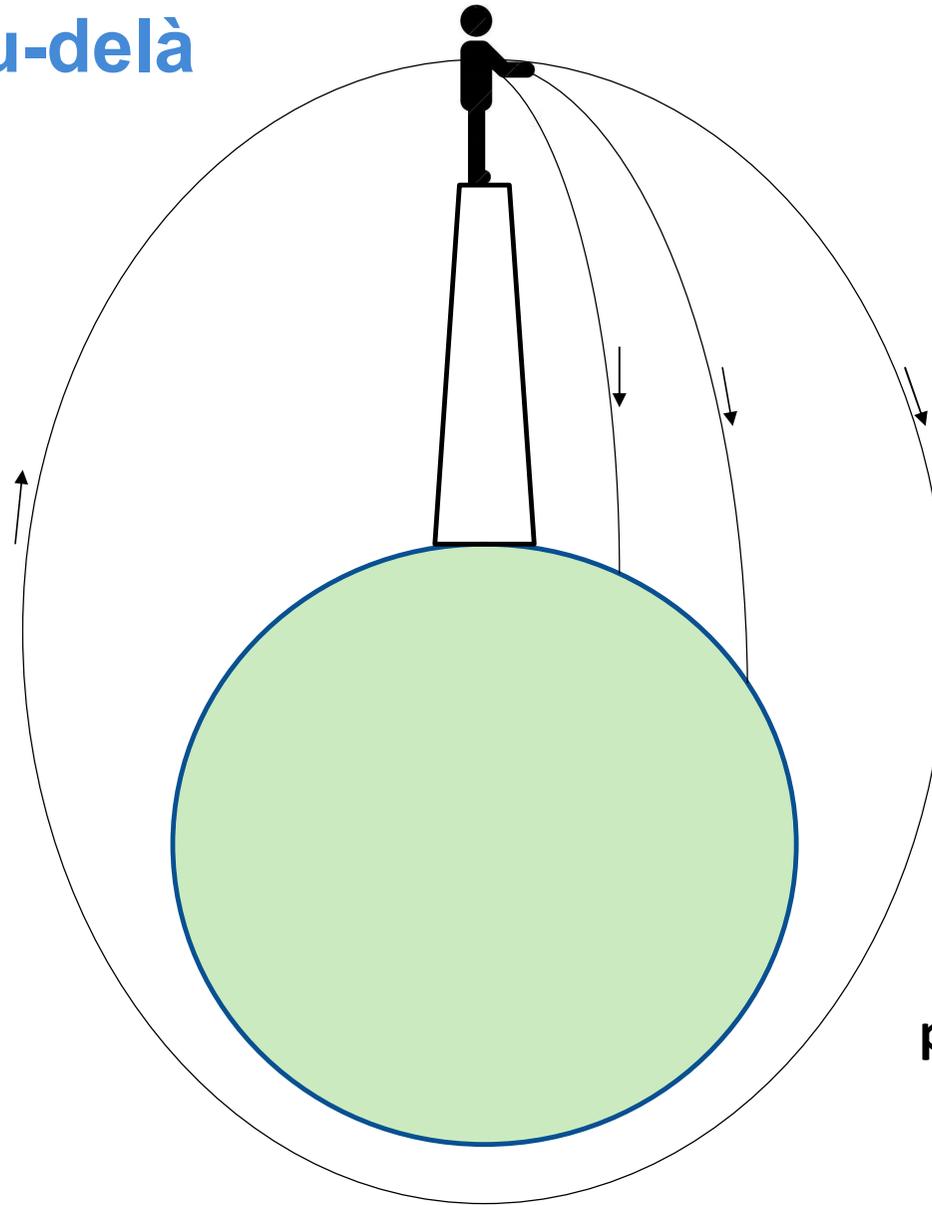
Réflecteur lunaire (crédit: NASA)



De la mesure précise du temps AR de l'impulsion laser on déduit la distance Terre – Lune.  
La Lune et la Terre, 2 objets en interaction gravitationnelle, tombent ensemble vers le Soleil.  
On vérifie ainsi le PE fort avec une précision de  $10^{-13}$  (Williams, Turyshev and Boggs, 2012).

## Pour aller au-delà

le mouvement  
d'un satellite en orbite  
autour de la Terre ...



... ça n'est rien d'autre  
que sa chute libre  
permanente dans le champ  
de gravité terrestre

## Pour aller au-delà

- **conséquence: à l'intérieur d'un vaisseau spatial en orbite terrestre, tous les objets subissent la même accélération et ont le même mouvement, quelle que soit leur masse**
- **un observateur à l'intérieur du vaisseau a l'impression de flotter et voit tous les objets autour de lui flotter pareillement**
- **dans un satellite en orbite terrestre on peut effectuer l'expérience (fictive) de la tour de Pise en réalisant la chute libre de 2 masses d'épreuve dans le vide pendant une très longue durée**

### **III. Le projet Microscope**

# Le projet Microscope

- **objectif scientifique : test du PE à  $10^{-15}$ , soit une mesure de 2 ordres de grandeur meilleure que les meilleurs tests au sol**
  - **principe : comparer le mouvement de 2 masses d'épreuve constituées de matériaux différents en chute libre permanente dans le champ de gravité terrestre**
  - **elles sont placées à bord d'un satellite à traînée compensée (« drag-free ») de façon à éliminer l'effet des forces non gravitationnelles (atmosphère résiduelle, pression de radiation)**
    - **senseurs : accéléromètres ultrasensibles**
    - **actuateurs : micropropulseurs à poussée continue**
- **satellite de la famille des microsattelites Myriade du CNES (décision Juin 2004)**

# Le projet Microscope

- **objectif technologique : qualification d'un système de compensation de traînée et de contrôle d'attitude**
  - **actuateurs : micropropulseurs à gaz froid ( $N_2$ ) à poussée continue ( $\mu N$ ) : fourniture ESA du type utilisé pour la mission d'astrométrie GAIA (2013-2020)**
  - **senseurs : microaccéléromètres à détection capacitive via l'instrument T-SAGE (voir plus loin) utilisé pour tester le PE (ONERA) ; algorithmes de commande du système de contrôle d'attitude et de compensation de traînée (CNES)**
  - **intérêt pour de futures missions de l'ESA**
    - physique fondamentale : LISA
    - interférométrie : DARWIN
    - vol en formation, métrologie, géodésie ...
- **coopération CNES - ESA (accord signé Juin 2001)**

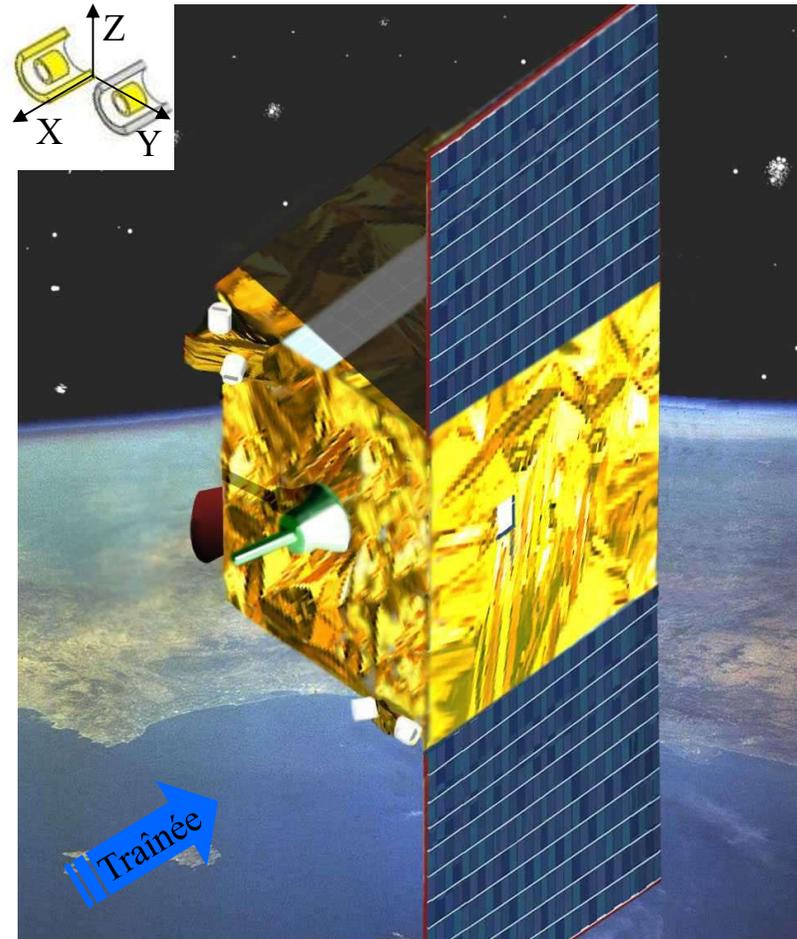
# Le satellite

## ➤ Filière MYRIADE

- équipements communs : calculateur, mémoire, batteries, panneaux solaires AsGa, gestion alimentation, senseur stellaire, antennes, télécommandes / télémesures...
- segment sol : centre de contrôle, bancs de validation système

## ➤ Microscope :

- masse : 303 kg
- dimensions sous coiffe :  $1,4 \times 1 \times 1,5 \text{ m}^3$
- attitude: stabilisation 3 axes
- système de contrôle d'attitude et compensation de traînée
- panneaux solaires fixes



Microscope, un microsatellite de la famille Myriad du CNES (vue d'artiste, crédit : CNES)

# Scénario de mission

## ➤ orbite

- orbite héliosynchrone à 700 km, 6h/18h (9 mois sans éclipse)
- excentricité :  $5 \times 10^{-3}$ , inclinaison :  $95^\circ$

## ➤ durée de mission

- mission nominale : 1 an
- extension possible 1 an

## ➤ réalisation

- lancement le 25/04/2016 depuis Kourou sur Soyouz en passager de Sentinel 1B (ESA)
- fin de mission scientifique : Février 2018
- désorbitation : Octobre 2018



# Organisation du projet

- **responsable scientifique (PI) : P. Touboul (ONERA \ DMPH)**
- **co-PI : G. Métris (Observatoire de la Côte d'Azur \ Gemini)**
- **co-I et chef de projet T-SAGE : M. Rodrigues (ONERA \ DMPH)**
- **maître d'œuvre : CNES (chef de projet : Y. André)**
- **partenaires : ESA, DLR, Université de Brême (ZARM), PTB**





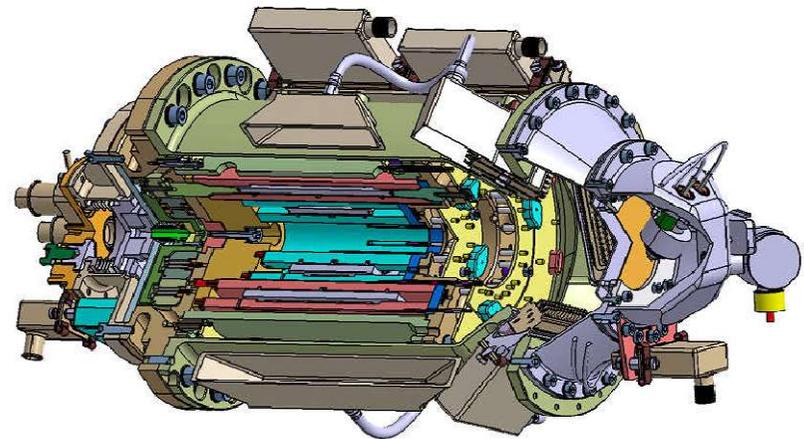
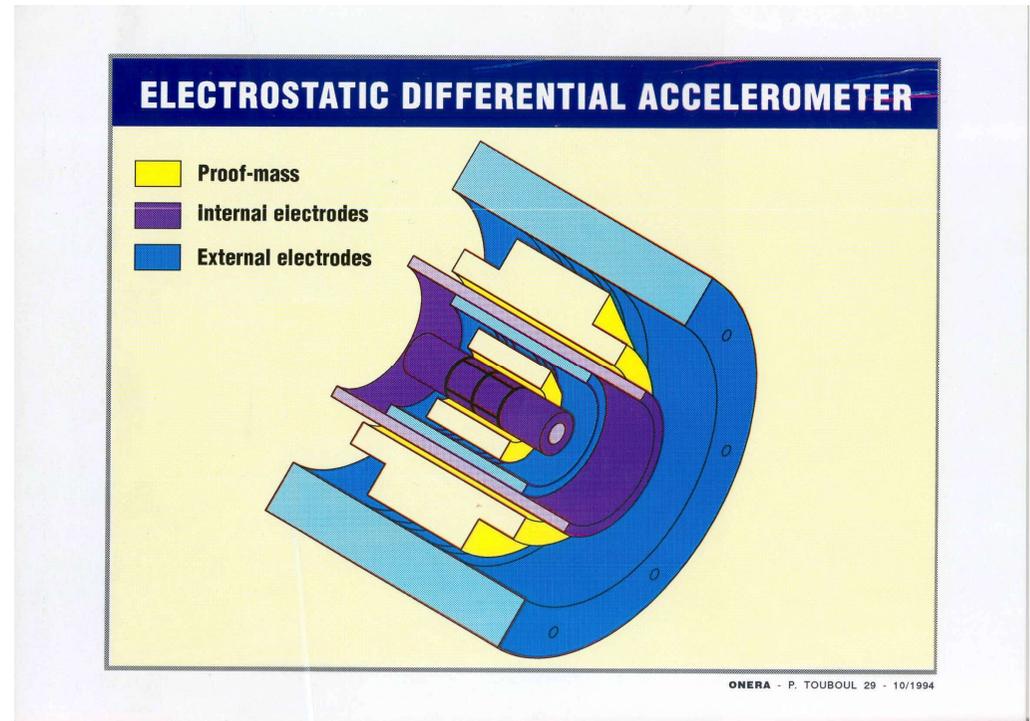
# L'instrument T-SAGE

- **une paire de 2 accéléromètres différentiels ultrasensibles à détection capacitive (ONERA)**
- **contributions allemandes :**
  - ZARM sur financement DLR : essais des accéléromètres dans la Tour à Chute Libre de l'Université de Brême (120 m)
  - PTB : réalisation des masses d'épreuve



# L'instrument T-SAGE

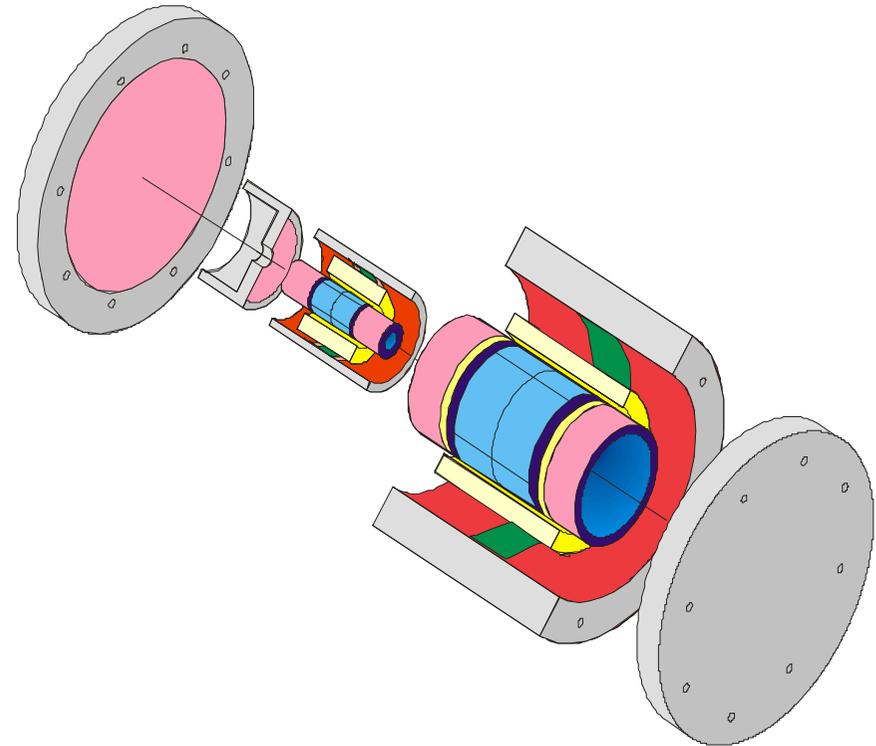
- chacun des 2 accéléromètres A et B est constitué de 2 ensembles cylindriques concentriques faits d'une paire d'électrodes et d'une masse d'épreuve suspendue électrostatiquement
- pour A les 2 masses sont de nature chimique différente => test du PE
- pour B les 2 masses sont de même nature => vérification de la précision du test du PE et détection d'éventuel off-set



# L'instrument T-SAGE

## ➤ Caractéristiques d'un accéléromètre :

- masses d'épreuve :  
pour A : Pt-Rh/Pt-Rh (0.5kg / 1.7kg)  
pour B : Pt-Rh/TA6V (0.5kg / 0.4kg)
- chaque senseur inertielle fournit 3 accélérations linéaires et 3 accélérations angulaires



Vue éclatée (crédit : ONERA)

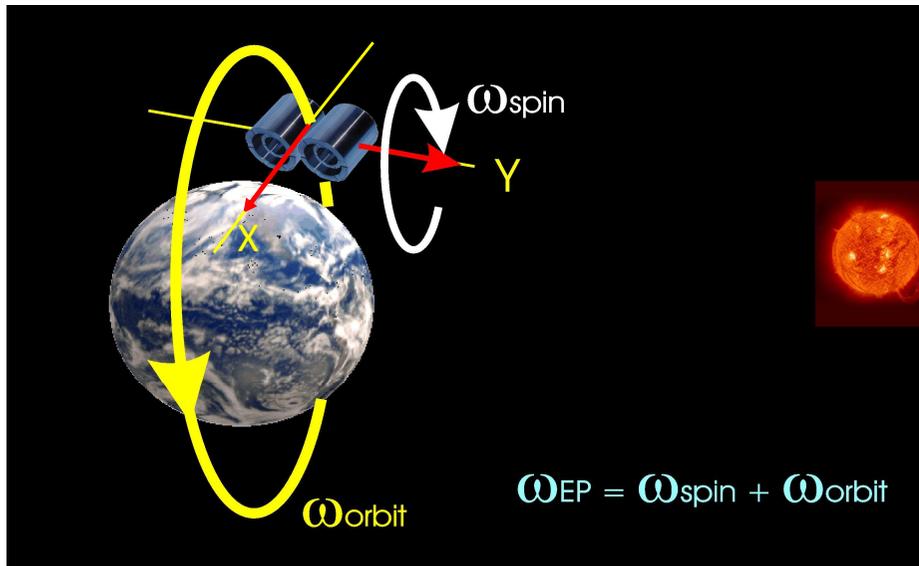
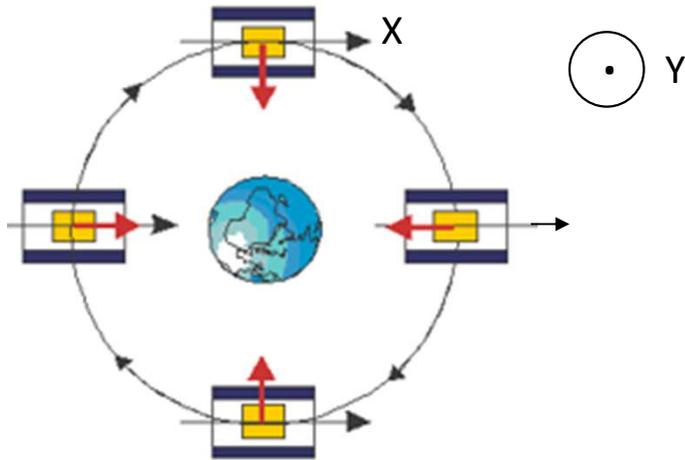
# Principe de la mesure

- **instrument et système sont intimement liés via le système de compensation de traînée et de contrôle d'attitude**
- **on mesure la force électrostatique nécessaire pour maintenir les 2 masses d'épreuve centrées et immobiles**
  - le mode commun (déplacement du centre de masse du couple de masses) fournit le signal qui commande la compensation de traînée et le contrôle d'attitude
  - le mode différentiel (déplacement relatif des 2 masses) contient le signal de test du PE recherché

$$\Delta V = \Delta V(1) - \Delta V(2) \propto \eta$$
$$\eta = |(m_g/m_i)(1) - (m_g/m_i)(2)| / 2$$



# L'expérience



## ➤ configuration

- l'axe (X) de symétrie des accéléromètres est dans le plan orbital
- l'axe (Y) joignant les centres des deux accéléromètres est perpendiculaire au plan orbital
- rotation du satellite (« spin ») autour de Y

## ➤ déroulement de l'expérience

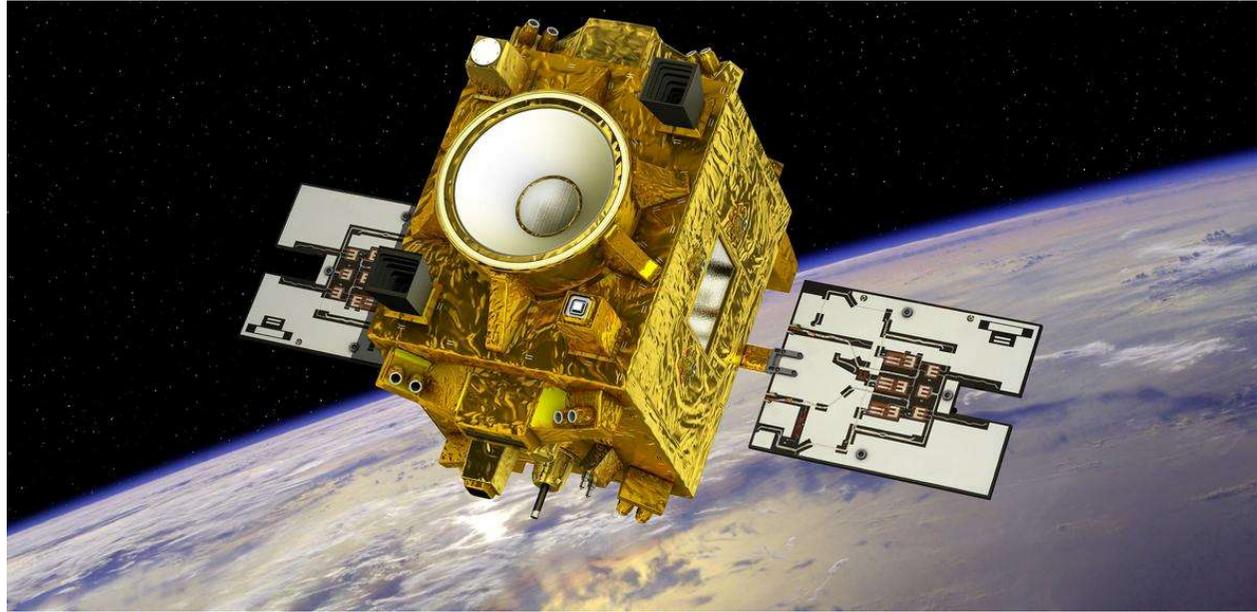
- sessions d'étalonnage (contrôle d'attitude et compensation de traînée)
- sessions de test du PE
- intégration en continu sur 20 orbites  $\approx$  30 heures (1 orbite  $\approx$  90 mn)

## ➤ signal scientifique

- fréquence  $\omega_{spin} \pm \omega_{orbit}$

## Résultats

- selon des résultats préliminaires portant sur 10% des données acquises, le PE est vérifié avec une précision de  $2 \times 10^{-14}$  (*Physical Review Letters* du 4 Décembre 2017)
- l'analyse des données s'est poursuivie
- résultats finaux (*Physical Review Letters* du 14 Septembre 2022): le PE est vérifié avec une précision de  $10^{-15}$
- **Microscope : une expérience qui pourrait marquer la physique comme l'expérience de Michelson en son temps**



**FIN**

**Je vous remercie de votre attention**



[Retour](#)