

# Tests des lois de la gravité et physique fondamentale dans l'espace

Journées GRAM  
Nice  
29 nov 2010

**Serge REYNAUD**

[serge.reynaud@upmc.fr](mailto:serge.reynaud@upmc.fr)

avec les « anciens » du GREX,  
du GRAAPH et du GPhys,  
les membres des collaborations impliquées,  
le groupe « Physique Fondamentale dans l'Espace »  
auprès du CNES,  
les membres du « Fundamental Physics Roadmap  
Advisory Team » auprès de l'ESA,  
les participants aux séminaires de prospective  
du CNES (Biarritz 2009) et de l'INSU (Lalonde 2009)



...

*Document de prospective, CNES (2009)*

*Fundamental Physics Roadmap, ESA (2010)*

# Les principaux objectifs scientifiques

## Comprendre le cadre spatio-temporel dans lequel nous vivons

- Tester les lois de la physique dans un contexte dominé par les énigmes de la matière noire et de l'énergie noire
- Observations à grande échelle, tests dans le système solaire

## Explorer des voies d'accès possible à une « nouvelle physique »

- Unification à venir entre les deux grands piliers de la physique que sont la relativité générale et la théorie quantique
- On cherche des indices de petites modifications en améliorant la précision des mesures ou en explorant des territoires nouveaux

## Développer de nouveaux outils

- Nouveaux instruments, nouvelles expériences
  - ACES, MICROSCOPE, LISAPathFinder vont voler bientôt
  - T2L2 vole sur Jason 2
- Nouvelles interactions avec les domaines voisins
  - en particulier ceux du GRAM

# Les principaux objectifs scientifiques

## Tests du principe d'équivalence

- Prospective Microscope et post-Microscope, accéléromètres

## Interactions et constantes fondamentales

- Prospective Aces et post-Aces, horloges optiques et liens laser, nouvelles technologies quantiques pour l'espace

## Loi de la gravitation et Univers sombre

- Tests de la loi de gravitation d'Einstein à grande échelle (observer et comprendre la nature des observations)

## Détection des ondes gravitationnelles

- Ouvrir de nouvelles fenêtres d'observation sur les objets physiques exceptionnels que sont les trous noirs (relativité générale en champ fort) et l'univers primordial (fond d'ondes stochastiques)

VIRGO, LIGO, LISA ...

# La Relativité Générale

## Gravitation ↔ métrique dans l'espace-temps

- le principe d'équivalence comme principe géométrique
- les horloges idéales (atomiques) mesurent un temps propre le long de la trajectoire
- les masses en chute libre et les rayons lumineux suivent des géodésiques

$$ds^2 \equiv g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$\delta \left[ \int ds \right] = 0$$

## Un des principes les mieux testés en physique :

- les chutes libres de masses avec  $\neq$  compositions coïncident à quelques  $10^{-13}$  ; cette précision est atteinte en labo aussi bien que dans l'espace (**Laser-Lune**)
- les horloges atomiques fonctionnant sur  $\neq$  transitions donnent le même temps à quelques  $10^{-16}$  par an

# La Relativité Générale

Equation d'Einstein = le couplage entre la matière-énergie  
(le tenseur énergie-impulsion) et l'espace-temps (la métrique)

- En RG, le tenseur de courbure d'Einstein est directement proportionnel au tenseur énergie-impulsion

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$$

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Dans un modèle simple où le Soleil est une source ponctuelle immobile et en utilisant des coordonnées spatiales isotropes

$$ds^2 \equiv g_{00} c^2 dt^2 + g_{rr} dr^2, \quad dr^2 \equiv dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

on obtient la solution, écrite ici comme une série de Taylor du potentiel de Newton

$$g_{00} = 1 + 2\phi + 2\phi^2 + \dots$$

$$g_{rr} = -1 + 2\phi + \dots$$

$$\phi \equiv -\frac{m}{r}, \quad |\phi| \ll 1$$

$$m \equiv \frac{GM}{c^2} \simeq 1.5 \text{ km}$$

# Les tests “PPN”

Les tests sont souvent analysés dans la famille des extensions “PPN” (Paramétrisées Post-Newtoniennes)

$$\begin{aligned} [g_{00}]_{\text{GR}} &= 1 + 2\phi + 2\beta\phi^2 + \dots \\ [g_{rr}]_{\text{GR}} &= -1 + 2\gamma\phi + \dots \end{aligned} \quad \beta = \gamma = 1 \text{ dans la RG}$$

Les comparaisons entre observations et prédictions sont exprimées comme des contraintes sur les déviations

Propagation de la lumière  
(Cassini 2003)

$$\gamma - 1 = (2.1 \pm 2.3) \times 10^{-5}$$

En utilisant aussi les éphémérides  
(INPOP 2010)

$$\beta - 1 = (2.5 \pm 7.5) \times 10^{-5}$$

Les tests préfèrent la RG ... dans la famille PPN

*C.F. Will, Living Reviews in Relativity (2001, mise à jour en ligne)*

# Les tests « dépendant de l'échelle »

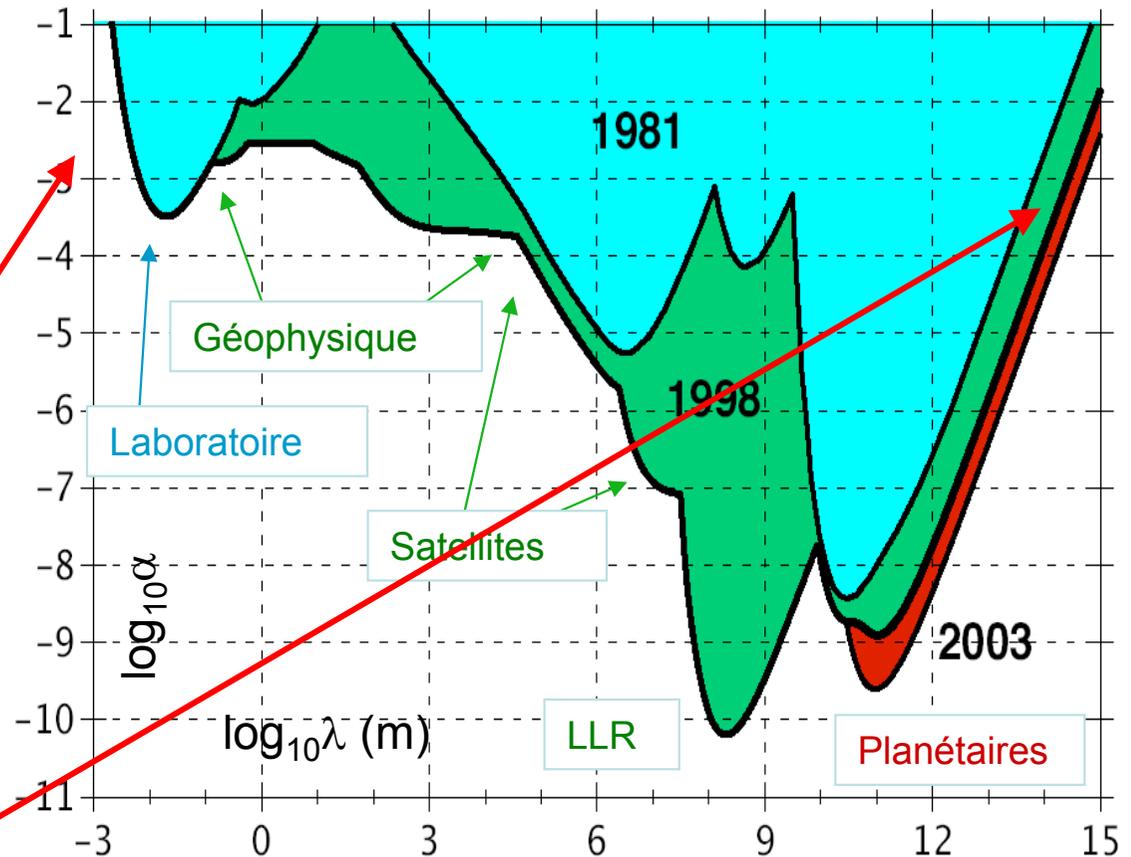
Une étude systématique de la variation du potentiel  $g_{00}$

On cherche un potentiel de Yukawa superposé au potentiel de Newton

$$\delta g_{00}(r) = -\frac{2\alpha m}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda}\right)$$

Les tests préfèrent la RG (dans la famille Yukawa)

mais ...  
des fenêtres restent  
ouvertes pour des  
déviations  
à courte distance  
ou à longue distance



Crédit : J. Coy, E. Fischbach, R. Hellings, C. Talmadge, and E. M. Standish (2003); M.T.Jaekel and S.Reynaud IJMPA (2005)

Reste à faire la même étude systématique sur les deux composantes de la métrique

# Le champ de gravité dans le système solaire

La plupart des tests est en bon accord avec la RG

- **MAIS** le test de plus grande échelle jamais réalisé (sondes Pioneer) n'a pas confirmé les lois attendues !

L'existence de l'effet est certaine, son origine reste une énigme

- peut-être un artefact (thermique, force de traînée) ?
- en tout cas une incertitude sur la connaissance du champ de gravité dans le système solaire externe, au niveau du  $\text{nm/s}^2$

➡ **Exploitation des données des sondes pour améliorer la connaissance du champ de gravité dans le système solaire**

- Problème critique : statut scientifique des données de navigation (Pioneer, Cassini, New Horizons ...)

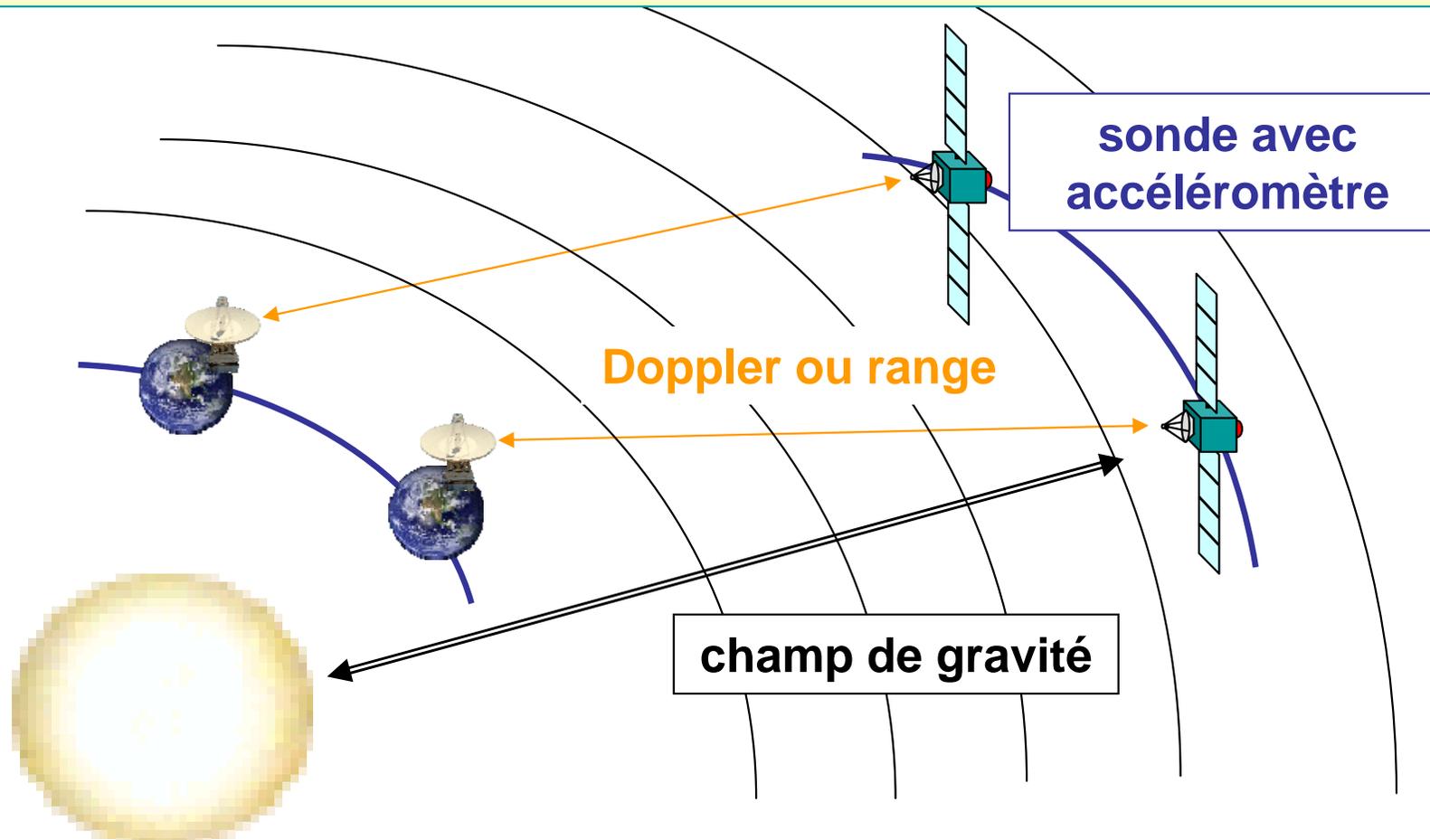
➡ **Exploitation des éphémérides**

- Planètes, lunes, petits corps ...



# Des idées de nouvelles missions ...

Principe : combiner le suivi par navigation radio (ou laser)  
et la mesure des accélérations non gravitationnelles  
pour lever les ambiguïtés sur la mesure de gravité



# Projet SAGAS (PI Peter Wolf)

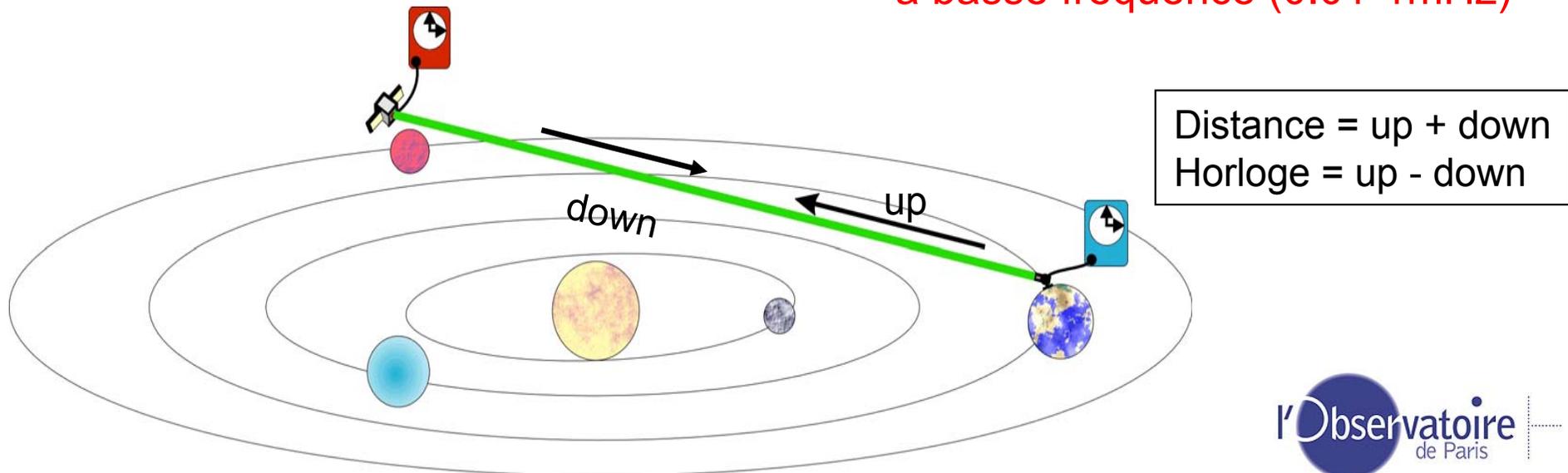
(Search for **A**nomalous **G**ravitation with **A**tomic **S**ensors)

Exploration de la Gravité dans le Système Solaire Externe avec des Senseurs Quantiques:

- horloge optique (atomes froids)
- accéléromètre atomique (atomes froids)
- lien laser

Objectifs supplémentaires :

- Test du « redshift » des horloges
- Masse totale et distribution de masse de la ceinture de Kuiper
- Possibilité de mesure de la masse d'objets individuels (KBO) de la ceinture de Kuiper
- Recherche d'ondes gravitationnelles à basse fréquence (0.01-1mHz)



# ... à combiner à l'étude du Système Solaire

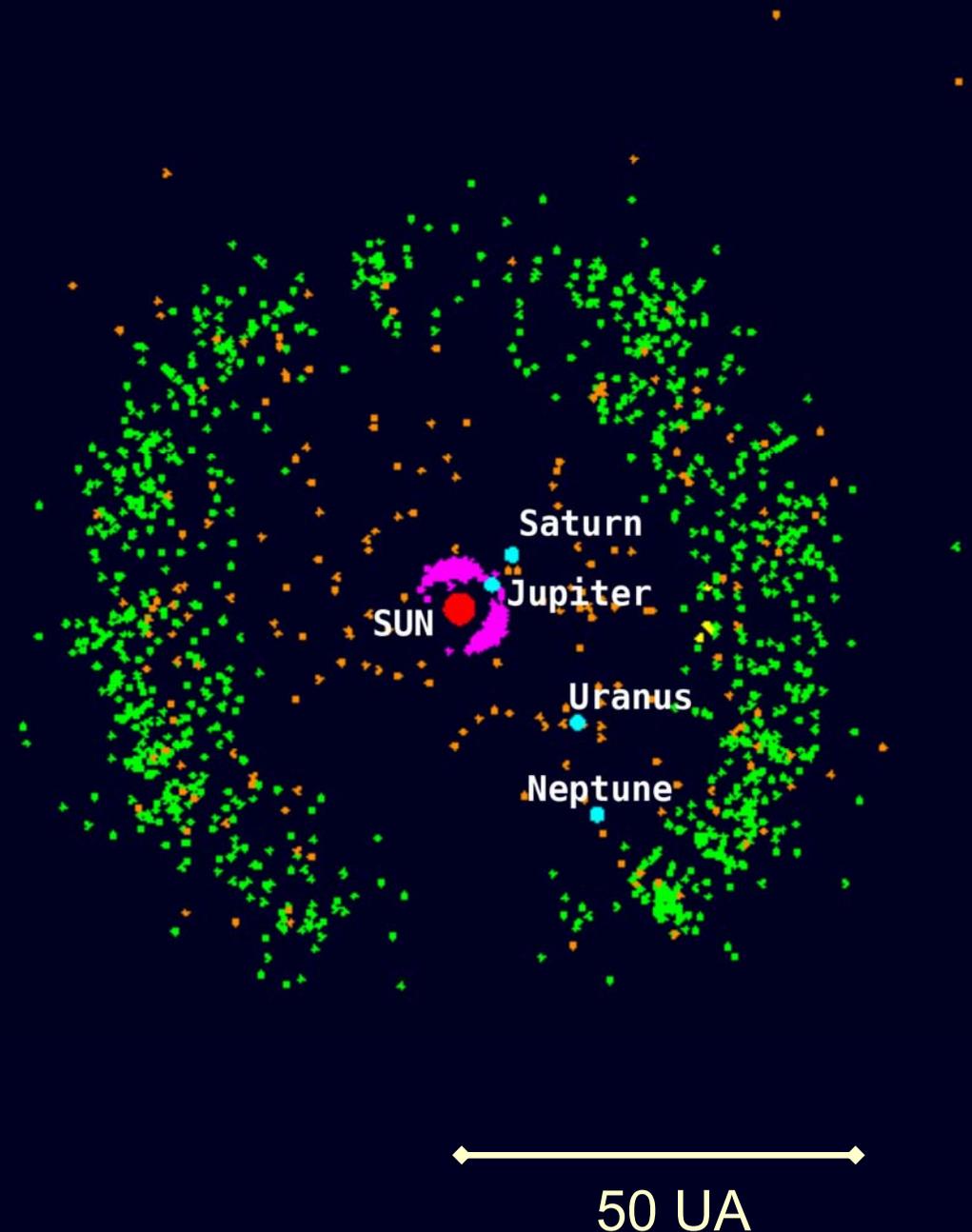
## Nouveaux instruments

▀ mesure plus précise du champ de gravité et des environnements des corps visités

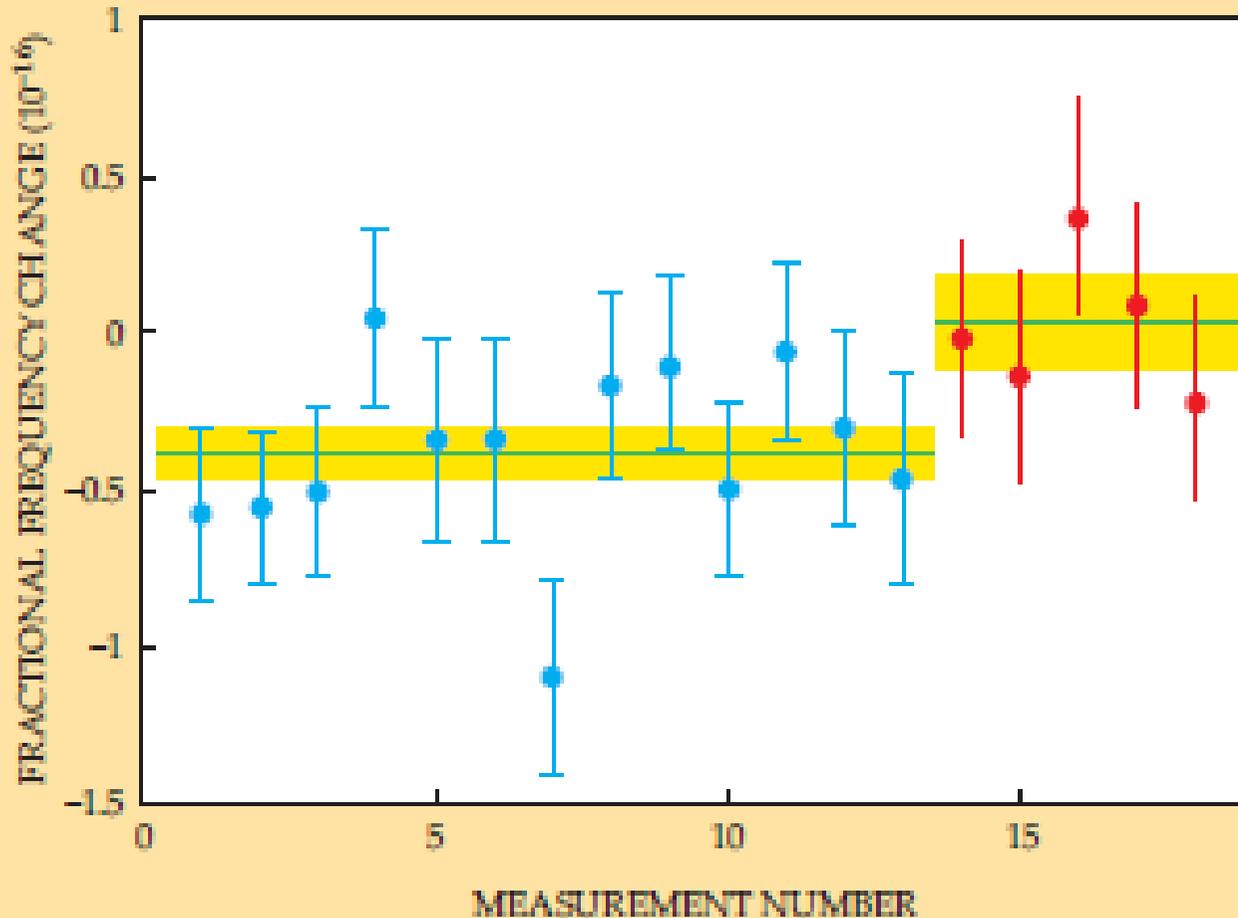
- Jupiter, Europa
- Saturne, Titan
- Uranus
- Neptune, Triton
- Ceinture de Kuiper

Origine et évolution du Système Solaire

*M. Blanc et al, ESLAB (2005)*



# Le « redshift » des horloges sur Terre



**Figure 2. Gravitational redshift** is measured by comparing the frequencies of the clocks at different elevations. After the first 13 measurements (blue data), one clock is raised 33 cm (red). The elevation change produces a measurable shift in the averaged fractional frequency difference (horizontal lines). Yellow shading is the statistical uncertainty. (Adapted from ref. 1.)

Potentiel de gravité  
mesuré via le  
redshift

Différence  
d'altitude 33 cm

*Relativistic effects seen at everyday distances  
and speeds, Physics Today (Nov 2010)*

*Chou, Hume,  
Rosenband,  
Wineland, Science  
(2010)*