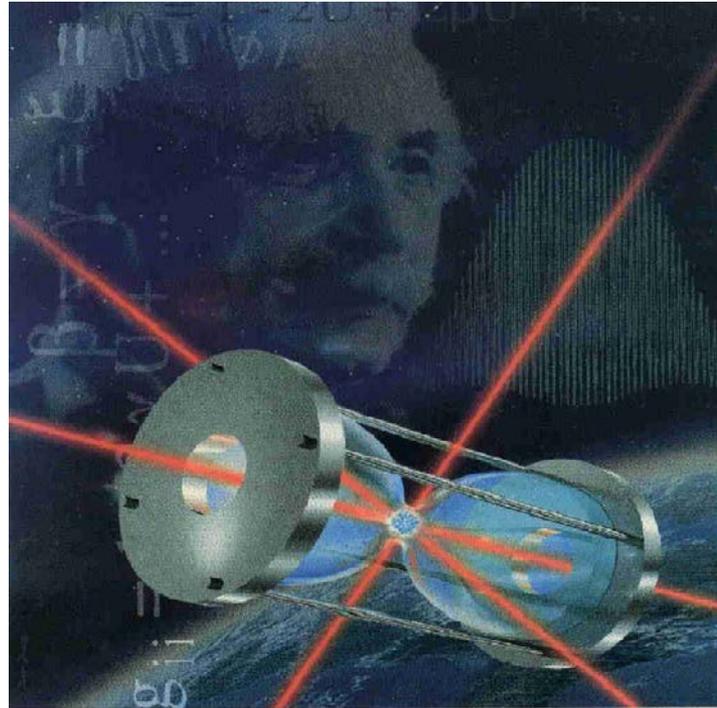


Le Temps des atomes froids



C. Salomon



Ecole Normale Supérieure, Paris, France
Colloque « les problèmes du temps »
Le 3 Septembre 2016, Neuchatel

Le concept d'horloge

Trouver ou réaliser un phénomène périodique

1) Nature:

observation: rotation de la terre, de la lune, des pulsars,..

2) Réalisation humaine: le sablier égyptien, le pendule de Galilée

phénomène simple décrit par un petit nombre de paramètres

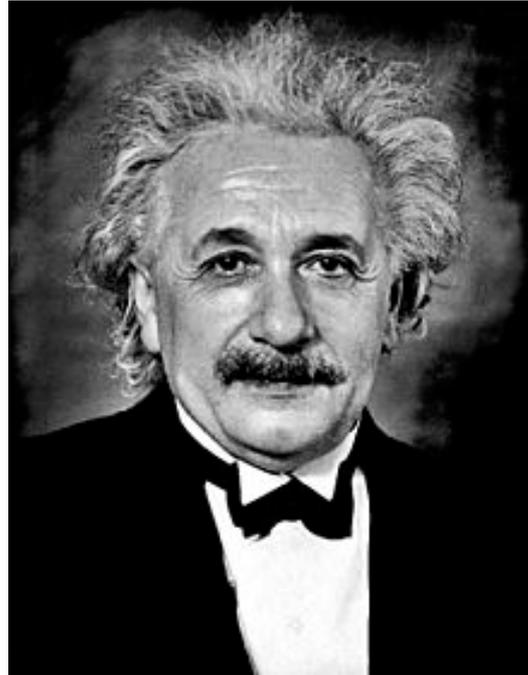
$$T = 2\pi\sqrt{l/g}$$

Plus courte est la période, meilleure est la précision de la mesure d'un intervalle de temps

3) Les horloges modernes utilisent des signaux électromagnétiques verrouillés sur des transitions atomiques



Le temps existe-t-il ?



A la suite des travaux de Minkovski, Poincaré, Lorentz
la réponse d'Einstein est: Non !

L'espace et le temps forment un bloc indissociable
avec quatre dimensions, 3 d'espace et une de temps

Cet Espace-Temps est déformé continûment par la matière.
L'ensemble Espace-Temps-Matière-Energie est décrit par les équations
de la relativité générale



Une horloge: une réalisation locale du temps propre

Le temps et son inverse, la fréquence, sont les quantités physiques
qui peuvent être mesurées avec la plus grande précision
Toutes les autres unités du SI peuvent être dérivées de la seconde



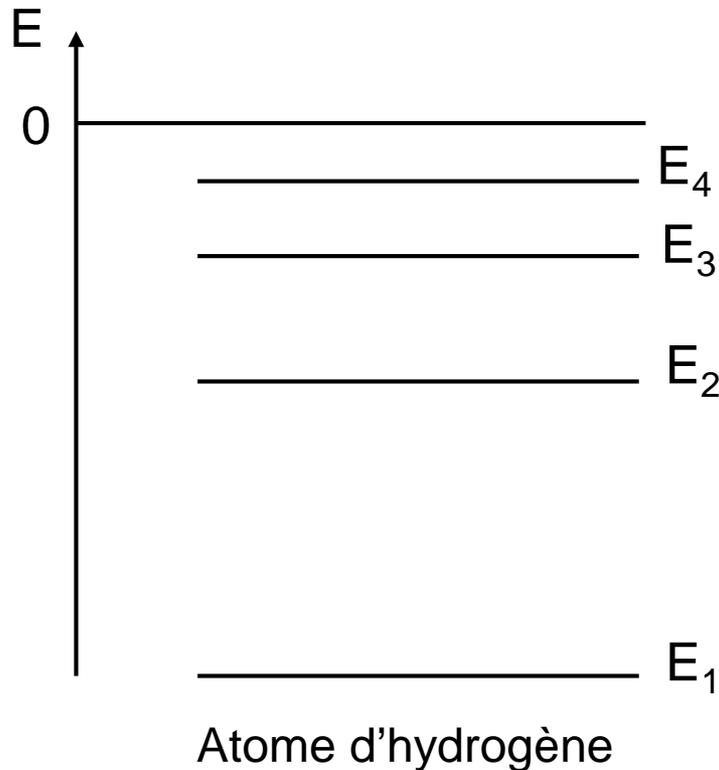
Never measure anything but frequency !

Le conseil d'Arthur Schawlow à ses étudiants à Stanford
Prix Nobel 1981

La structure de l'atome



Niels Bohr: 1913



L'atome possède des niveaux d'énergie discrets

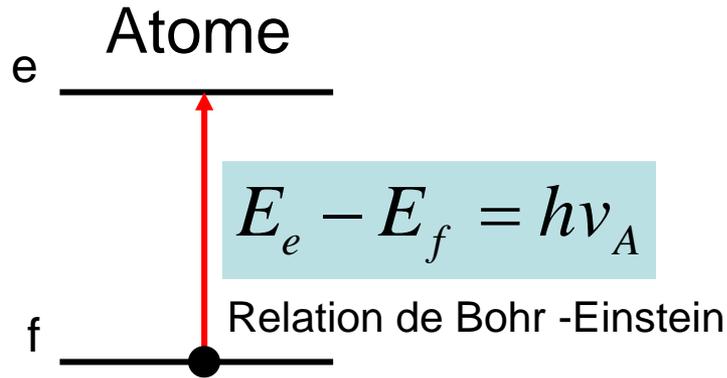
Les variations d'énergie entre niveaux sont quantifiées

$$E_n - E_p = h \nu = h c / \lambda$$

Le moment cinétique des électrons est quantifié

$$E_n = -\frac{1}{n^2} E_1$$

Horloge atomique



Oscillateur

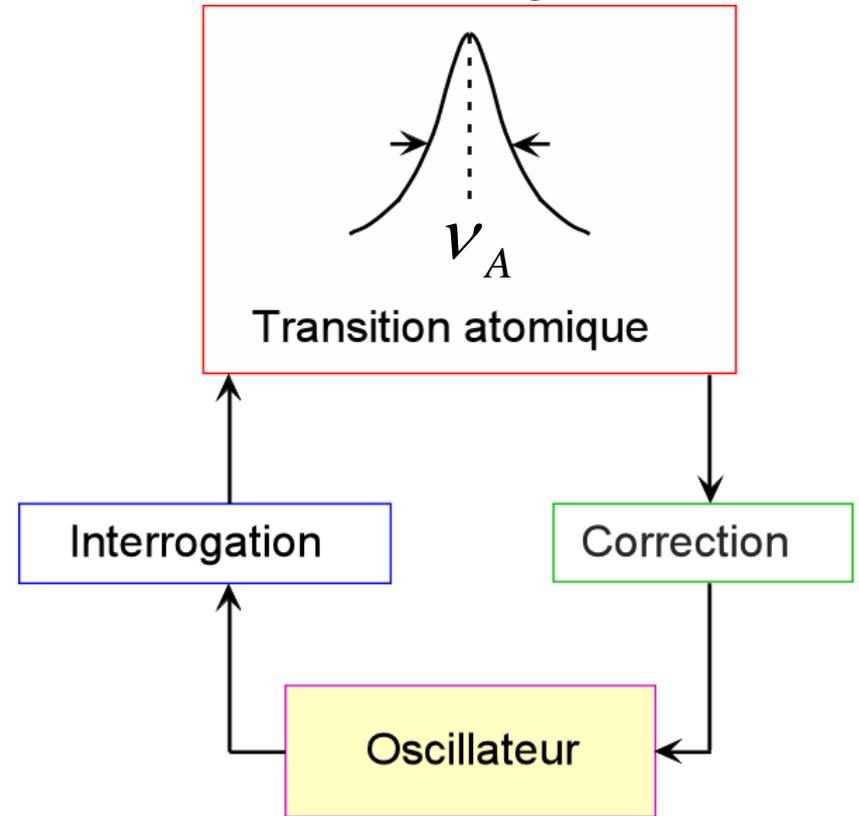


Quartz



Laser

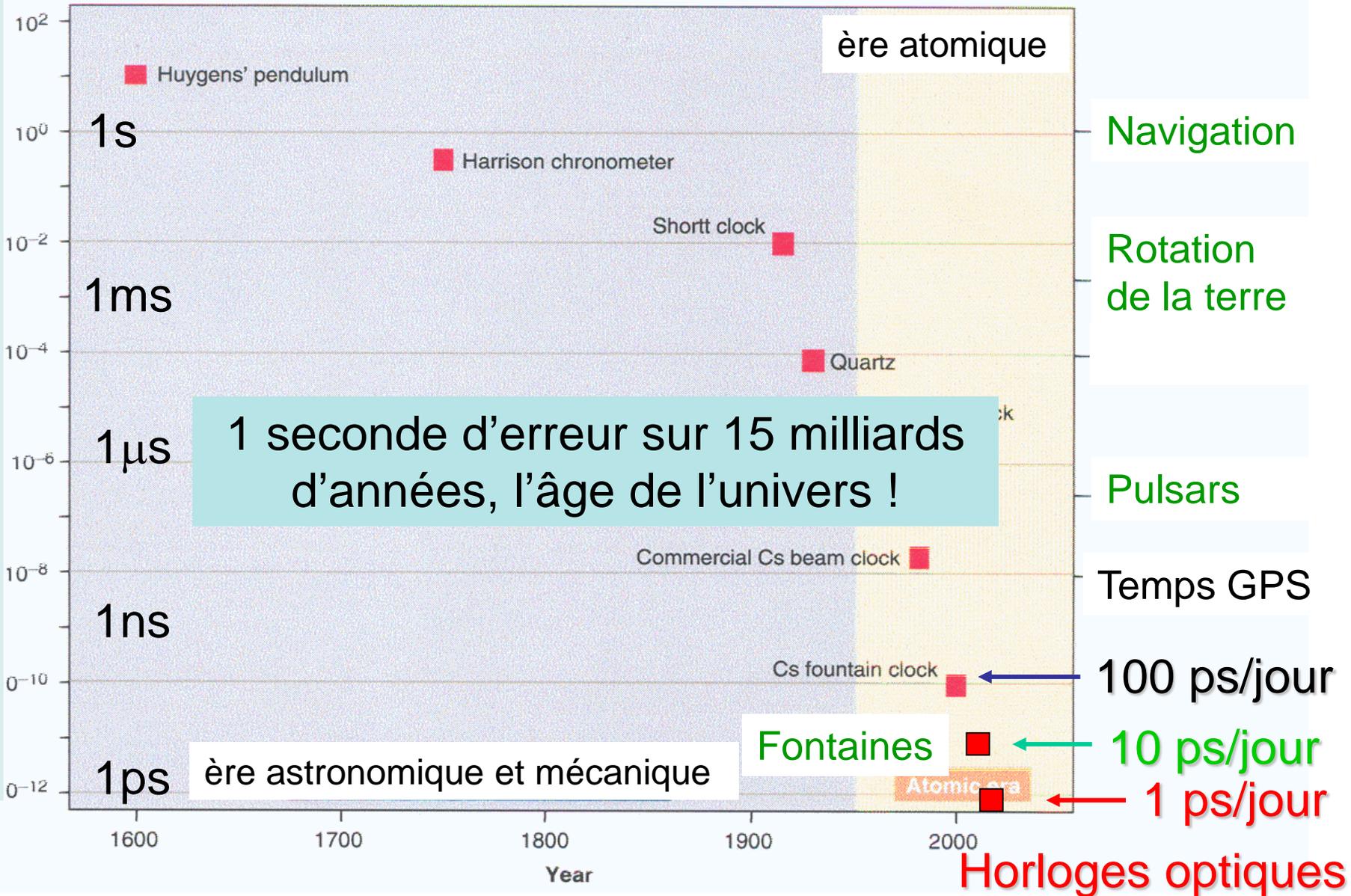
Horloge



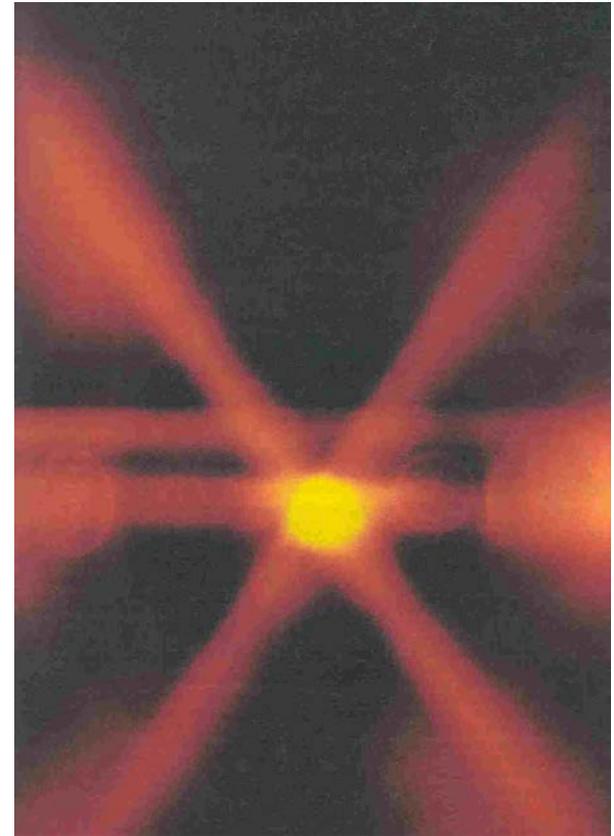
Un oscillateur de fréquence ν est asservi sur la fréquence ν_A d'une transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome

La précision du temps

Incertitude de l'horloge (seconde/jour)



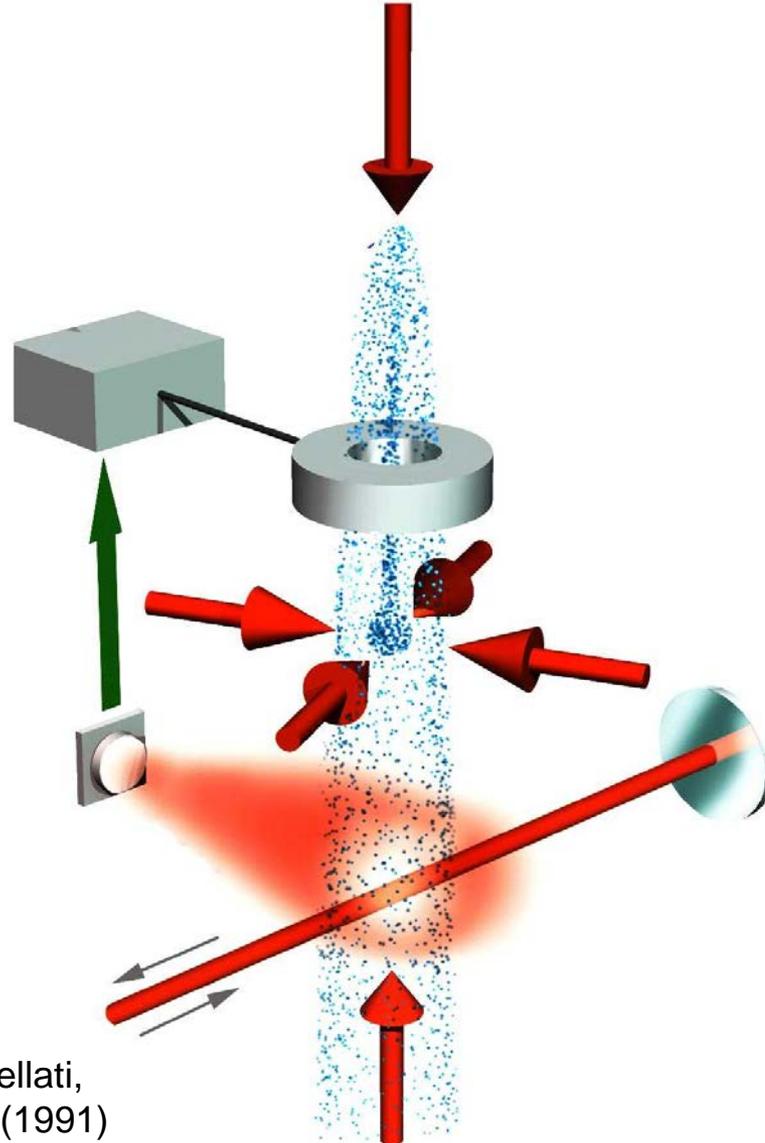
Atomes refroidis par laser



Prix Nobel 1997

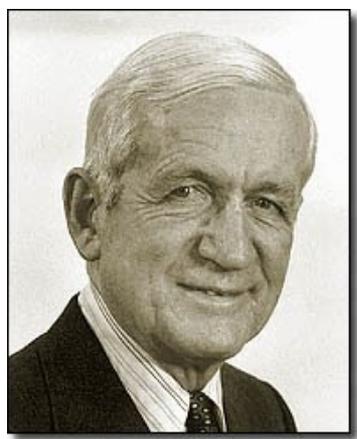
Atomes refroidis à quelques
microdegrés Kelvin
Vitesses de $\sim 1\text{cm/s}$ pour le césium
Long temps d'observation

Définition de la seconde fontaine à atomes de césium



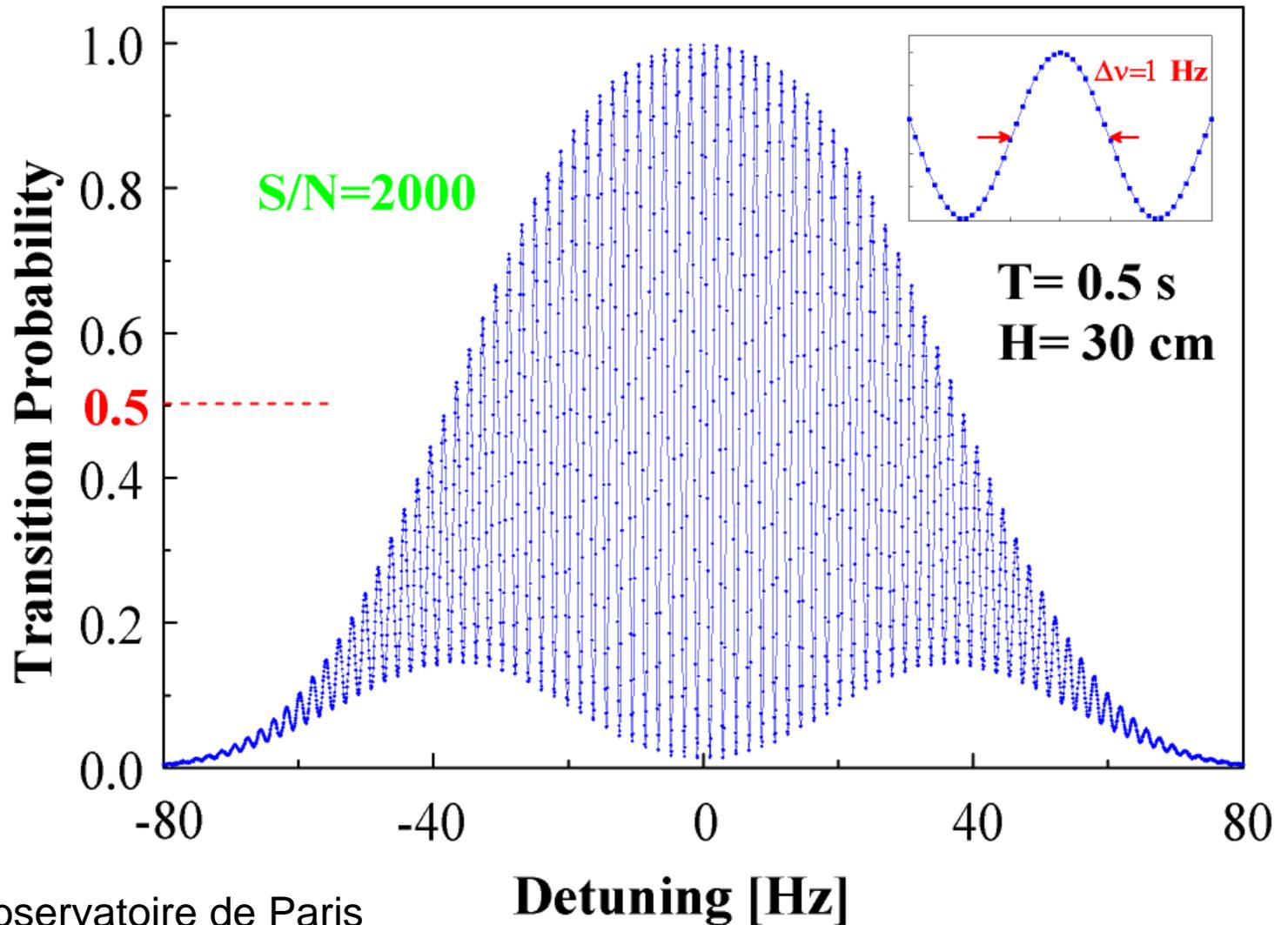
A. Clairon



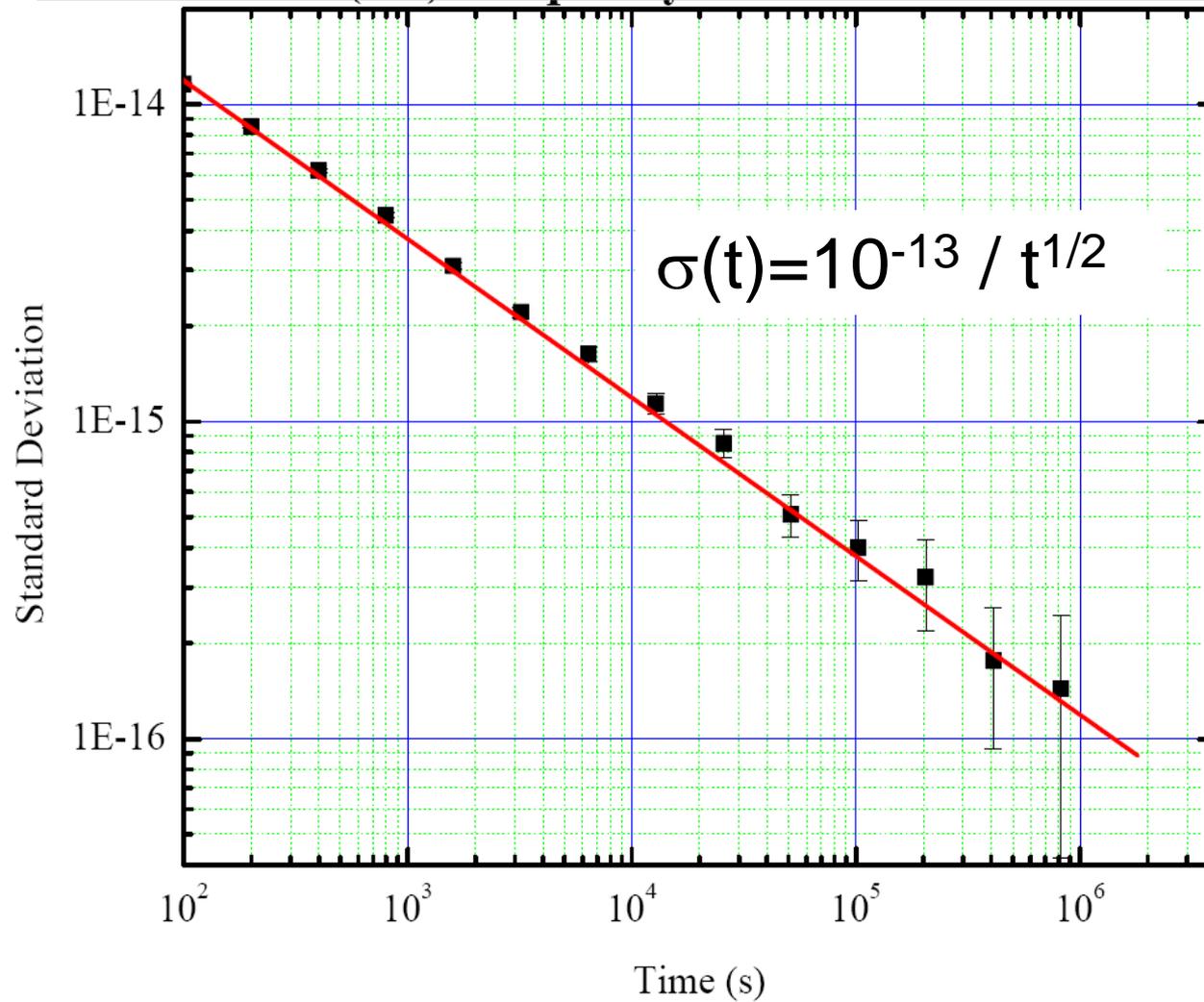


Résonance de Ramsey

Prix
Nobel
1989



Comparaison entre deux fontaines Observatoire de Paris

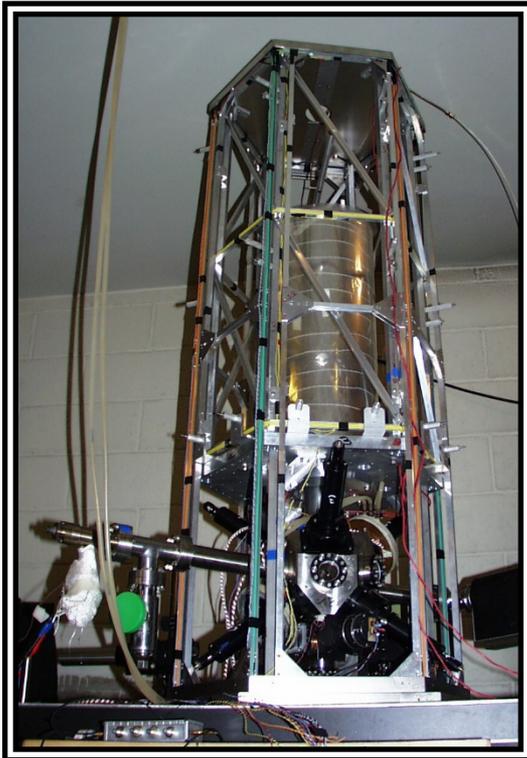


S. Bize
et al.
EFTF'08

Stabilité de fréquence à 10^{-16} après 5 jours de mesures
Exactitude $\sim 2 \cdot 10^{-16}$

Fontaines et Temps Atomique International

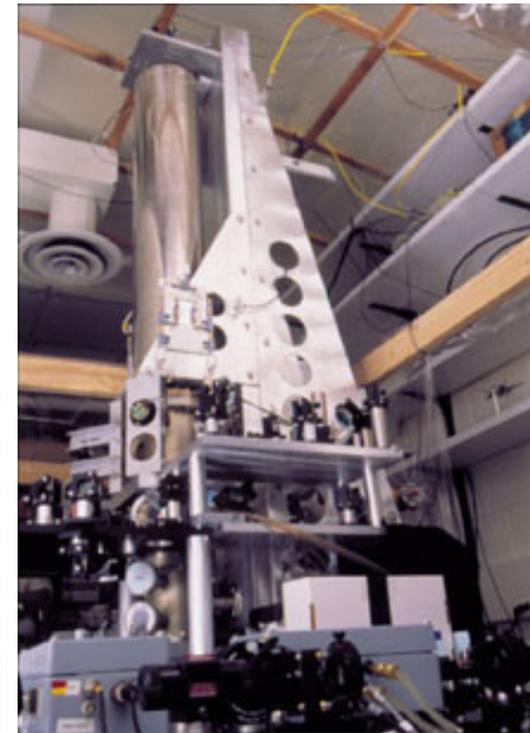
12-15 fontaines en opération dans le monde qui pilotent le TAI
calculé par le BIPM avec une exactitude de qqs 10^{-16}
Comparaisons par satellites GPS



LNE-SYRTE, FR



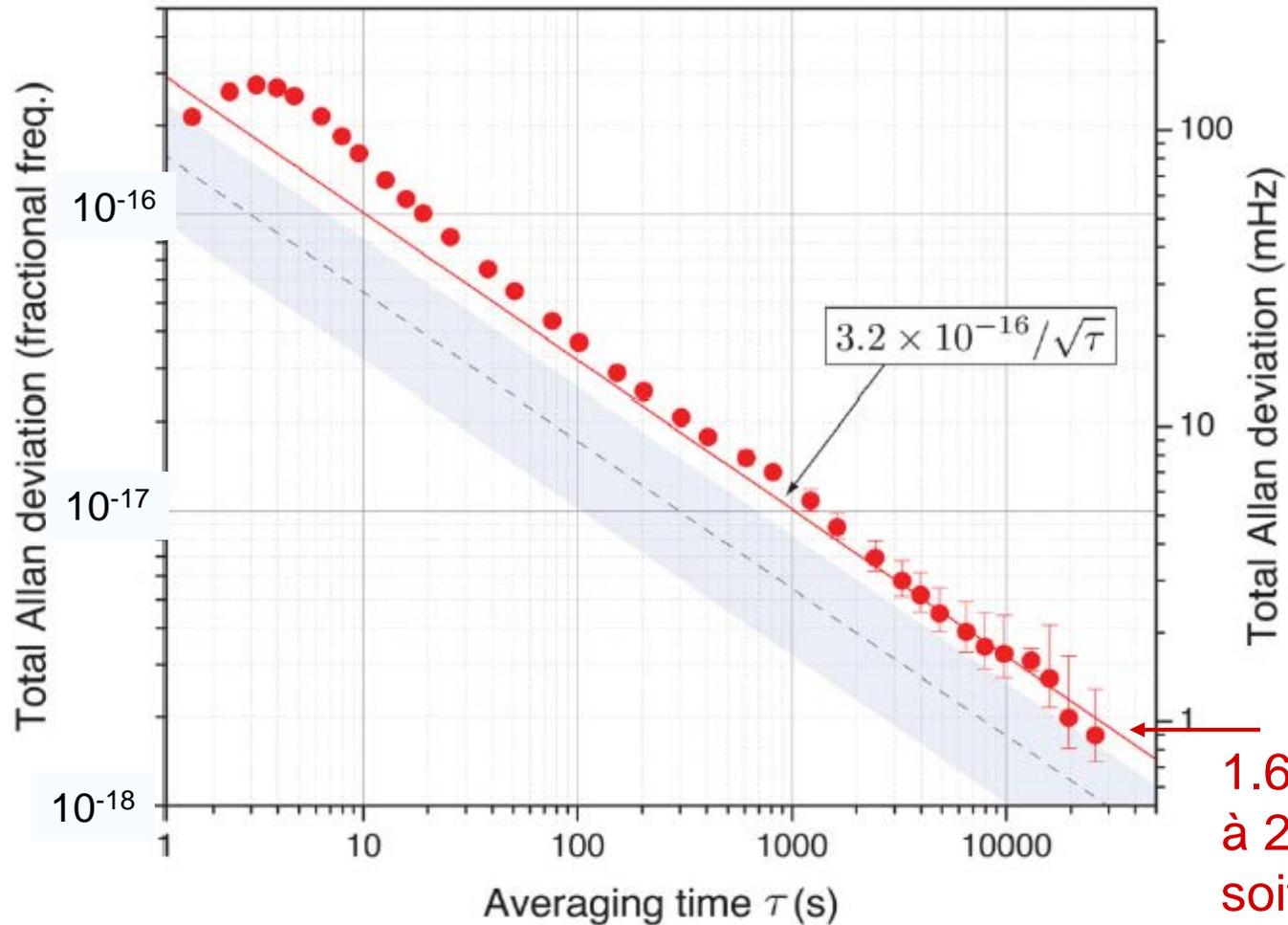
PTB, D



NIST, USA

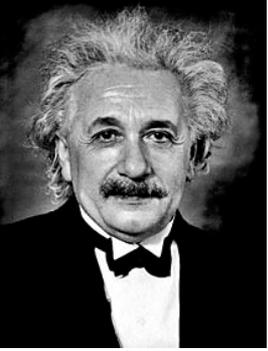
Horloges optiques

^{171}Yb
 ^{87}Sr



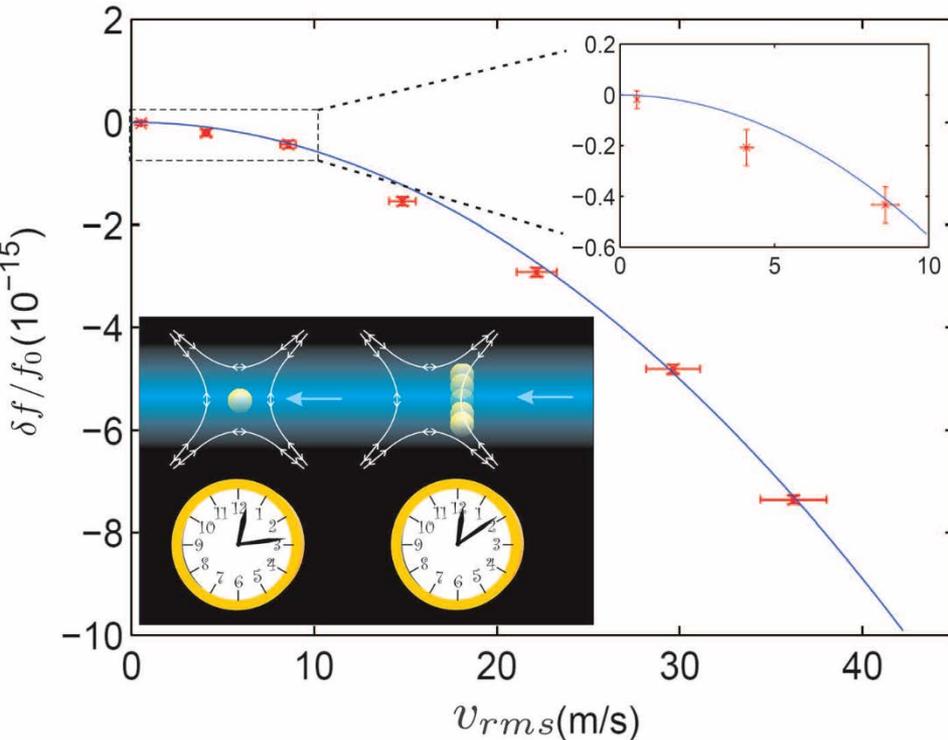
1.6×10^{-18}
à 25 000 s
soit 1.6 cm
de diff. de
potentiel
gravitationnel

NIST: N. Hinkley, et al., Science '13
JILA: B. J. Bloom, et al. Nature **506**, 71 (2014),
Riken: I. Ushijima, (2015), horloge cryogénique

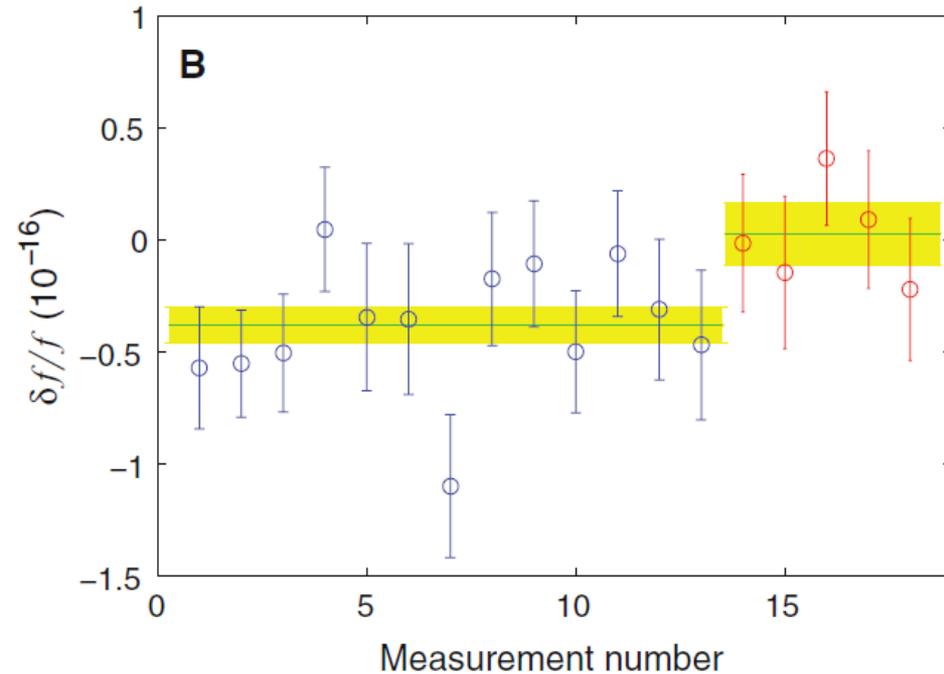


Relativité à l'échelle humaine !

C. W. Chou,* D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland, Science 329, 1630, (2010)



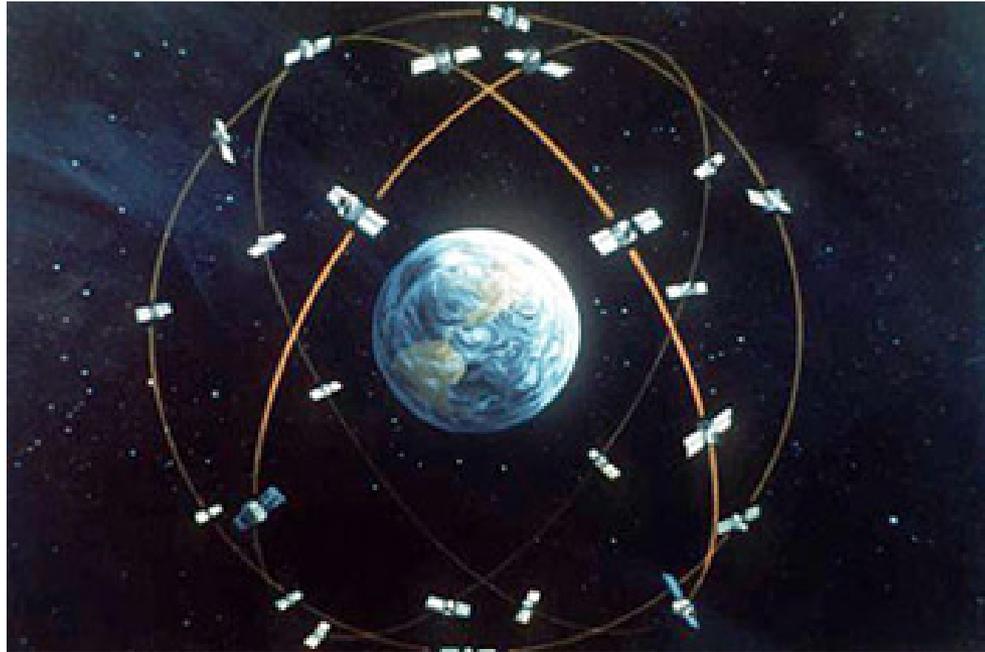
dilatation du temps



Décalage gravitationnel

L'horloge B est soulevée de 33 cm
Sa fréquence augmente par $3.4 \cdot 10^{-17}$

Positionnement par satellite



24 satellites
à 20 000 kms
période 12 heures

Chaque satellite transmet un message avec:

instant d'émission et la position du satellite à l'instant d'émission

Propagation des signaux en provenance de 4 satellites à la vitesse c : \longrightarrow distances.

Le récepteur calcule sa position 3D par l'intersection de 4 sphères (et son décalage de t)

Précision: qqs mètres et même centimètres avec systèmes additionnels

GPS: débuté en 1973 par US army

est devenu un service ouvert global spectaculaire

GLONASS, GALILEO: opérationnel avant 2020; BEIDOU,...

Tests de physique
fondamentale avec des
horloges ultrastables

Variabilité des constantes fondamentales ?

Motivation: théories d'unification,...

Veneziano, Damour, Polyakov, Marciano,....

α_{em} , m_e/m_p ...

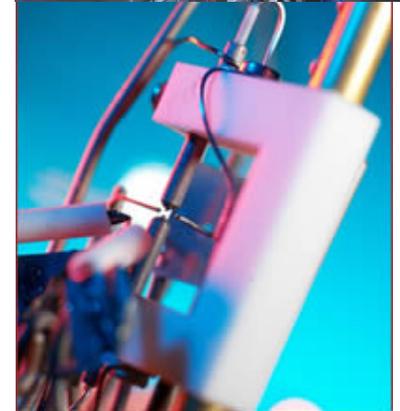
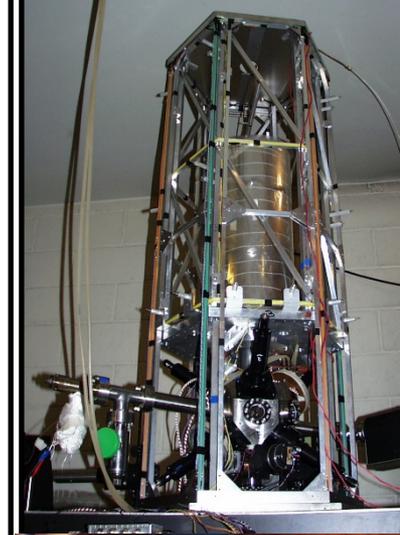
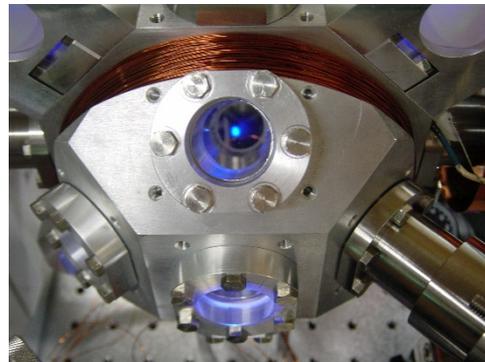
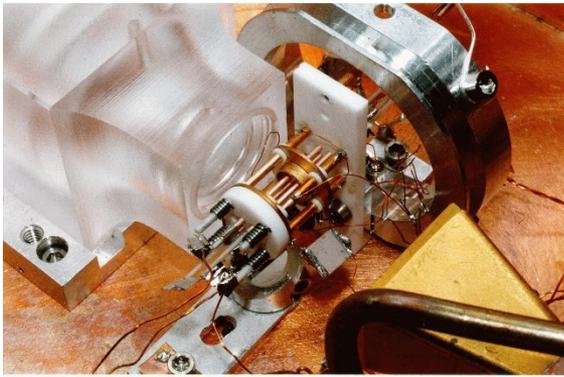
Principe : Comparer deux ou plusieurs horloges de nature différente en fonction du temps

Horloge micro-onde/micro-onde: α , m_e/m_p , $g^{(i)}$

rubidium and cesium

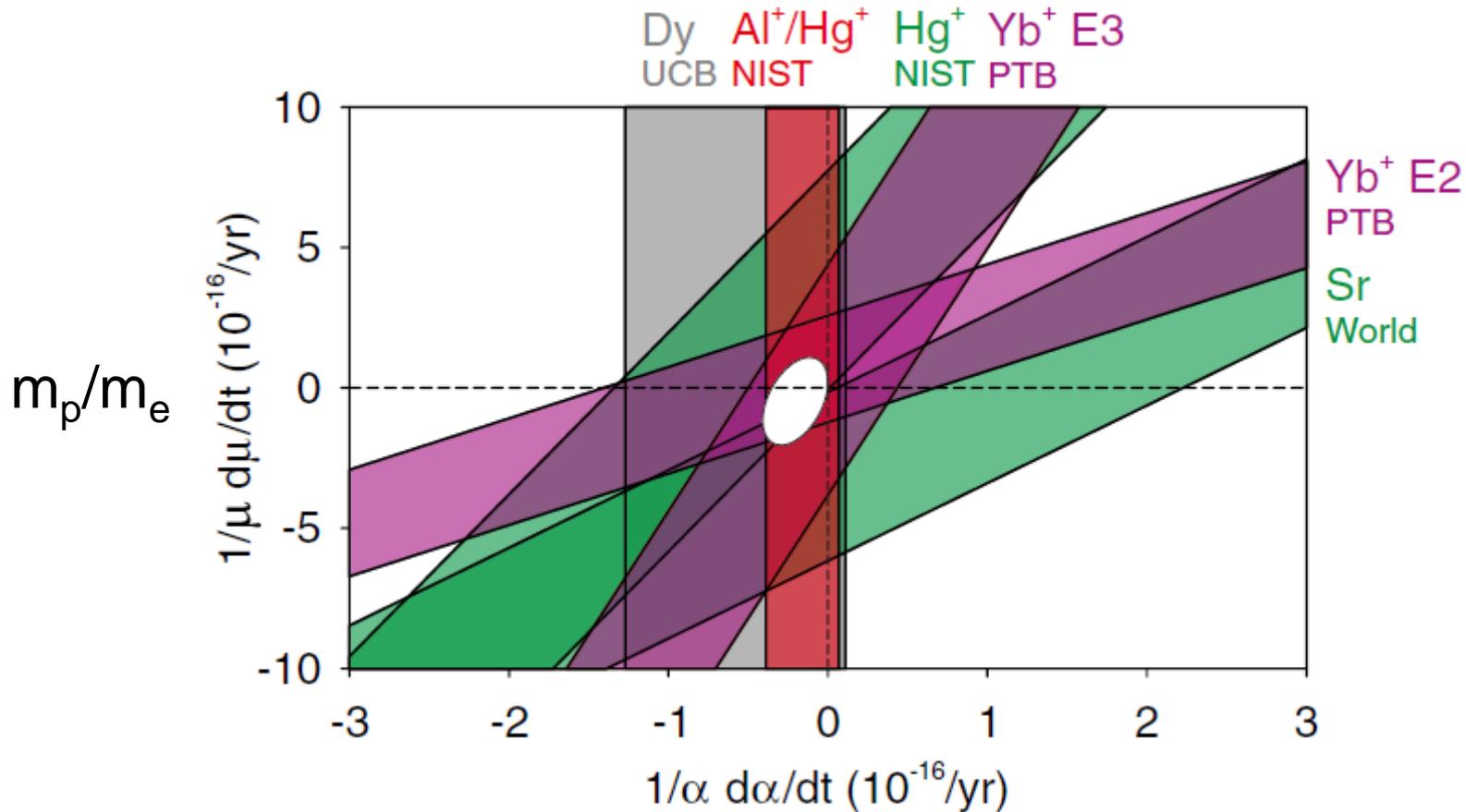
Micro-onde / Optique : α , m_e/m_p , $g^{(i)}$

Optique / Optique: α



The ovens and electrodes of the NPL strontium ion end-cap trap.

Variabilité des constantes fondamentales: limites actuelles

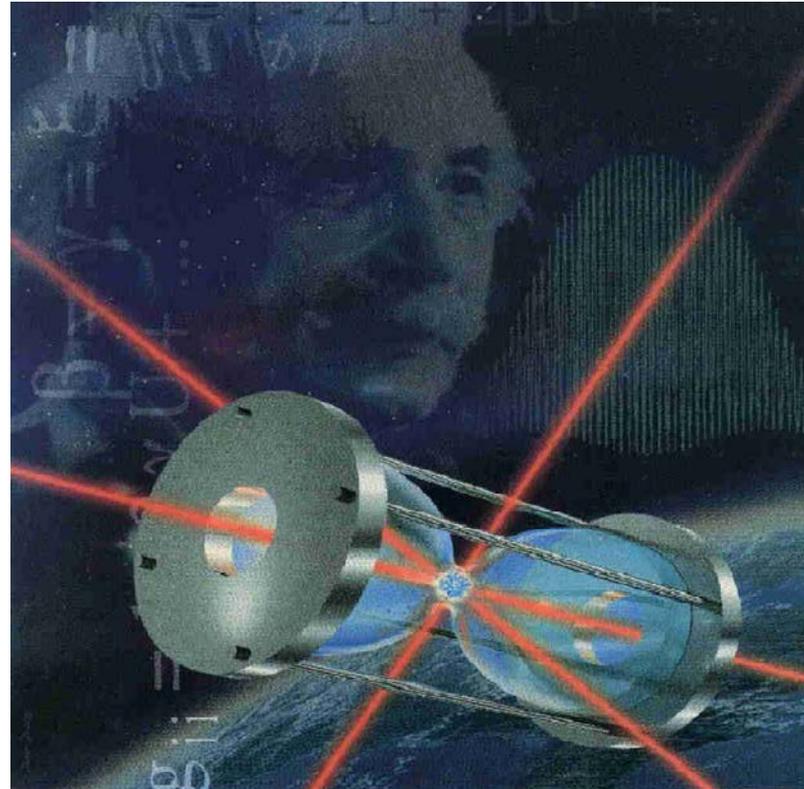


N. Huntemann et al., PRL 113, 210802 (2014)

Futur !

La mission spatiale PHARAO/ACES

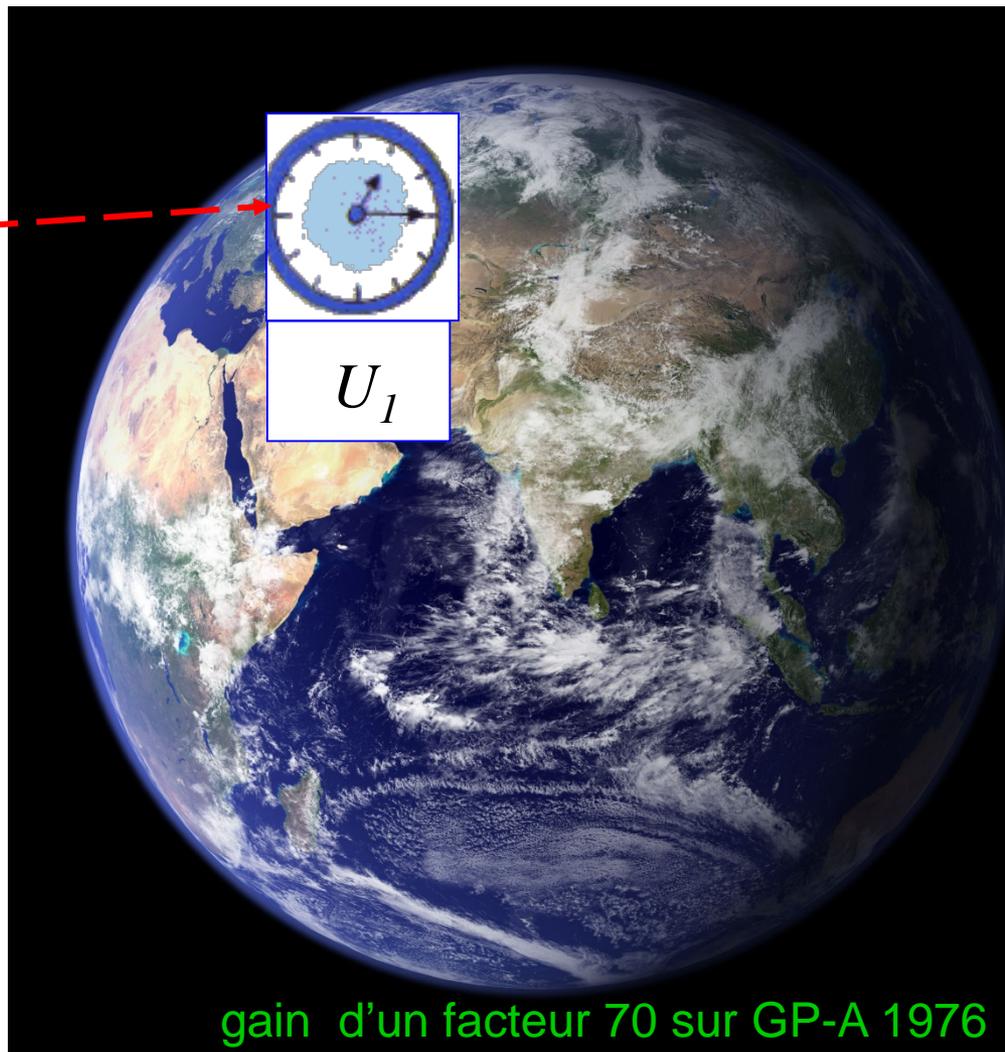
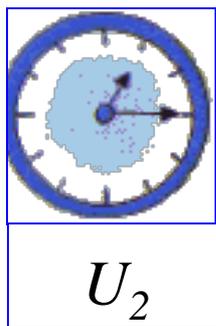
1997



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES



Un test de l'effet Einstein



$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \left(1 + \frac{U_2 - U_1}{c^2} \right)$$

Décalage de fréquence

$4.59 \cdot 10^{-11}$

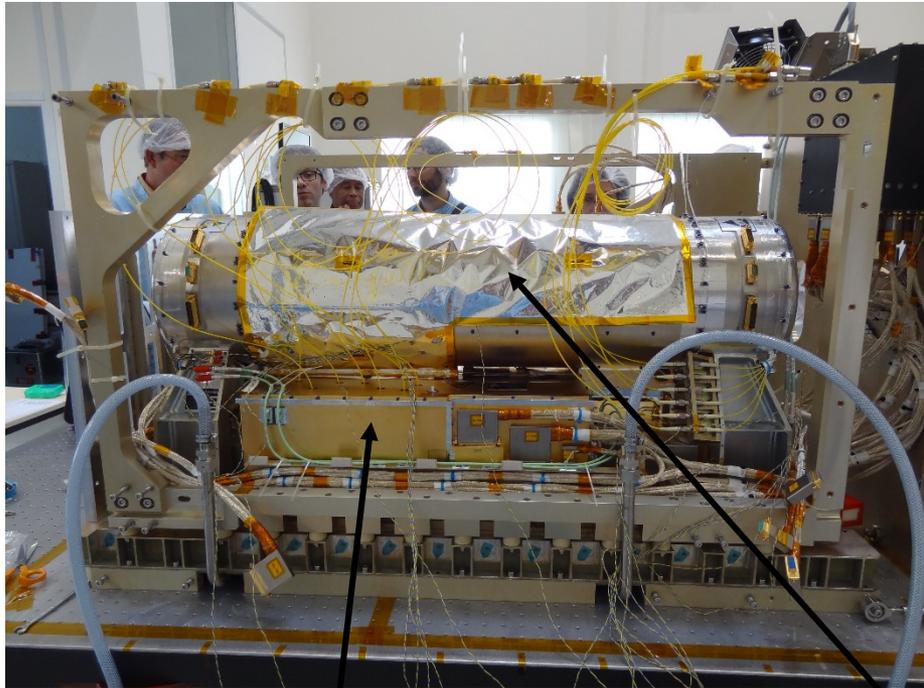
Horloges d'exactitude 10^{-16}

Test à $2 \cdot 10^{-6}$

gain d'un facteur 70 sur GP-A 1976

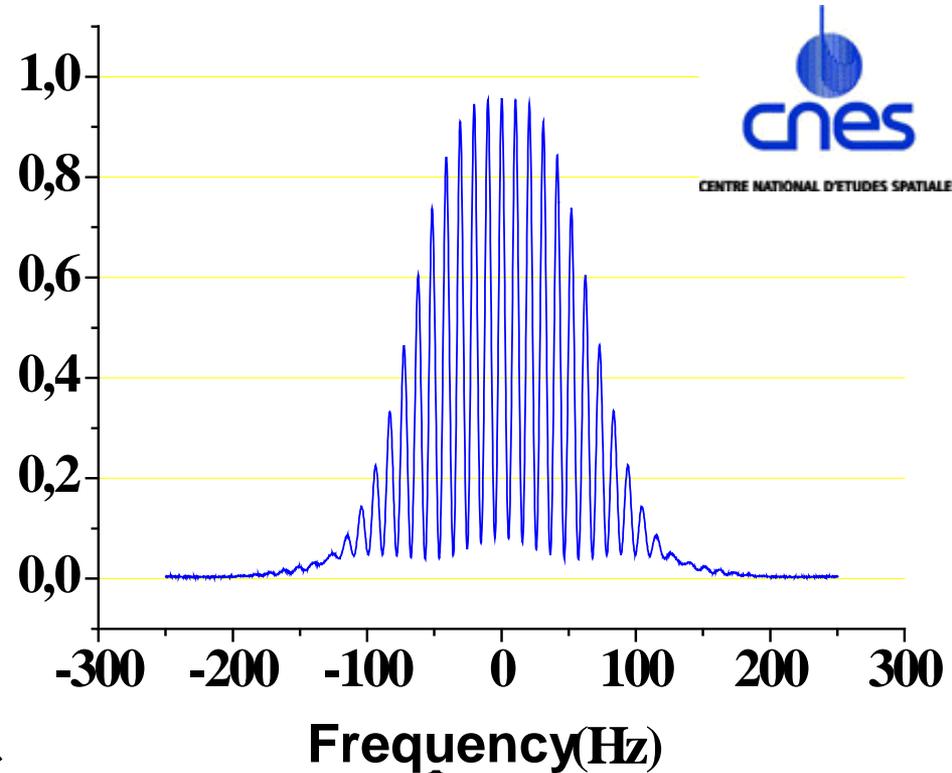


L'horloge spatiale à atomes froids PHARAO



source laser

tube césium



Tests du modèle de vol terminés. Stabilité et exactitude attendues dans l'espace: 10^{-16}
Livré à l'ESA en Juillet 2014

ACES sur la plateforme externe de Columbus

S122E009893

L'ISS



esa



ACES

date de lancement prévue: mi-2018
durée de la mission : 18 à 36 mois



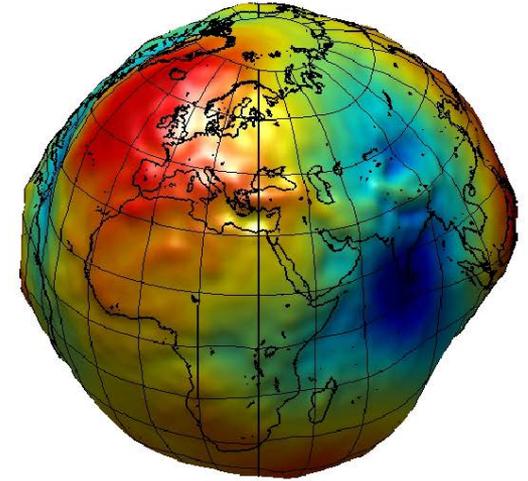
Géodésie relativiste

La fréquence de l'horloge dépend
du potentiel gravitationnel, 10^{-16} par mètre
pour la Terre

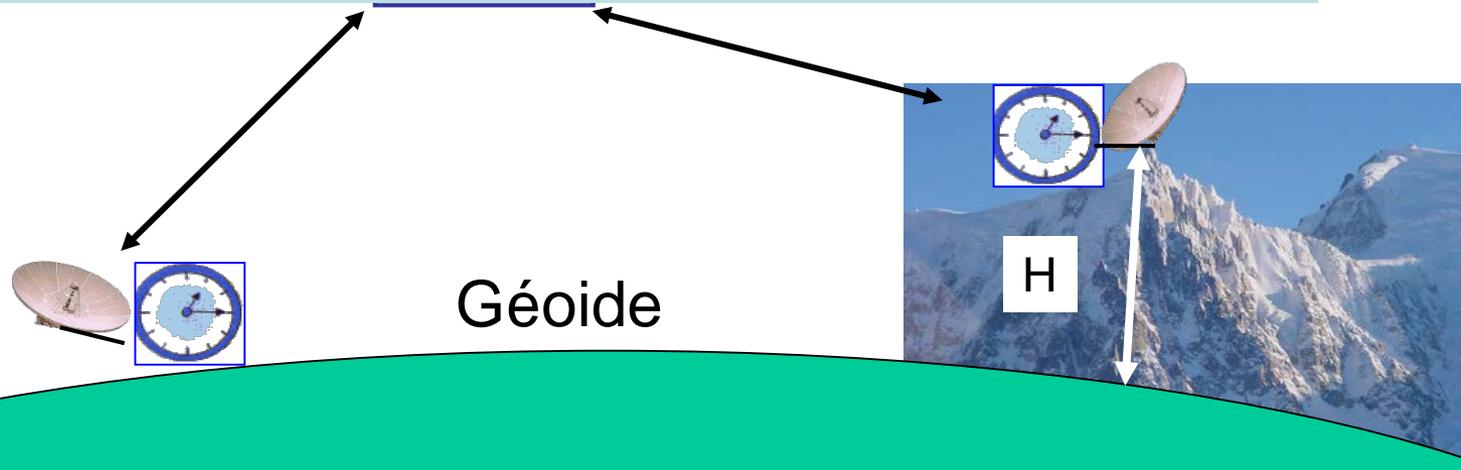
Exactitude des meilleures horloges $2 \cdot 10^{-18}$
soit 2 cm

Avec ACES et liens par fibres optiques

Possibilité de mesurer la **différence de potentiel**
entre deux sites distants à 10^{-18} , équivalent à 1 cm



Complète les mesures par satellite et par nivellement



Perspectives

- 1) Les horloges optiques présentent des fluctuations de temps inférieures à 1 picoseconde par jour. Nouvelle définition de la seconde requise. Progrès rapides.
- 2) Un temps précis délivré par satellites et fibres optiques terrestres avec une stabilité de la nano à la picoseconde.
- 3) Effet Einstein: un test fondamental et géodésie relativiste
- 4) Les fluctuations du potentiel gravitationnel vont limiter la précision du temps au sol à 10^{-18} - 10^{-19} (soit du cm au mm):
Solution: mettre les horloges de références en orbite haute où ces fluctuations sont fortement réduites
- 5) Utiliser l'intrication quantique pour améliorer la précision des mesures