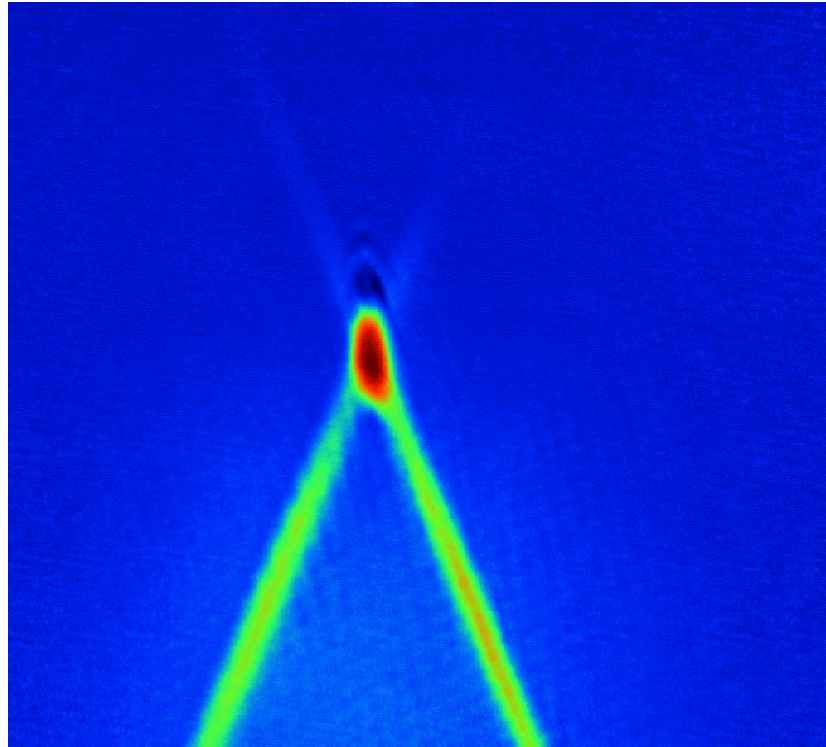


# Horloges à atomes froids et mesure du temps



C. Salomon

Laboratoire Kastler Brossel, Ecole Normale Supérieure, Paris

<http://www.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/welcome>

<http://www.lkb.ens.fr/%7esalomon/>

# Plan

## 1) Qu'est ce qu'une horloge ?

**stabilité de fréquence, exactitude**

## 2) Fontaines atomiques et tests fondamentaux

**Performances**

**Limites**

## 3) Horloges du futur

**La missions spatiale PHARAO/ACES**

**Horloges optiques**

## 4) Perspectives

# La mesure du temps

## Trouver un phénomène périodique:

### 1) Phénomènes naturels:

**observation:** rotation de la terre, de la lune, calendriers,...  
émission des pulsars,..

**réalisation humaine:** sablier égyptien, clepshydre,....

### pendule de Galilée:

phénomène simple décrit par  
un petit nombre de paramètres

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

Plus la période est élevée, meilleure sera  
la résolution temporelle



# La mesure du temps (2)

## 2) champ électromagnétique:

oscillateur à quartz,... vibration d'un cristal couplé à un circuit électrique

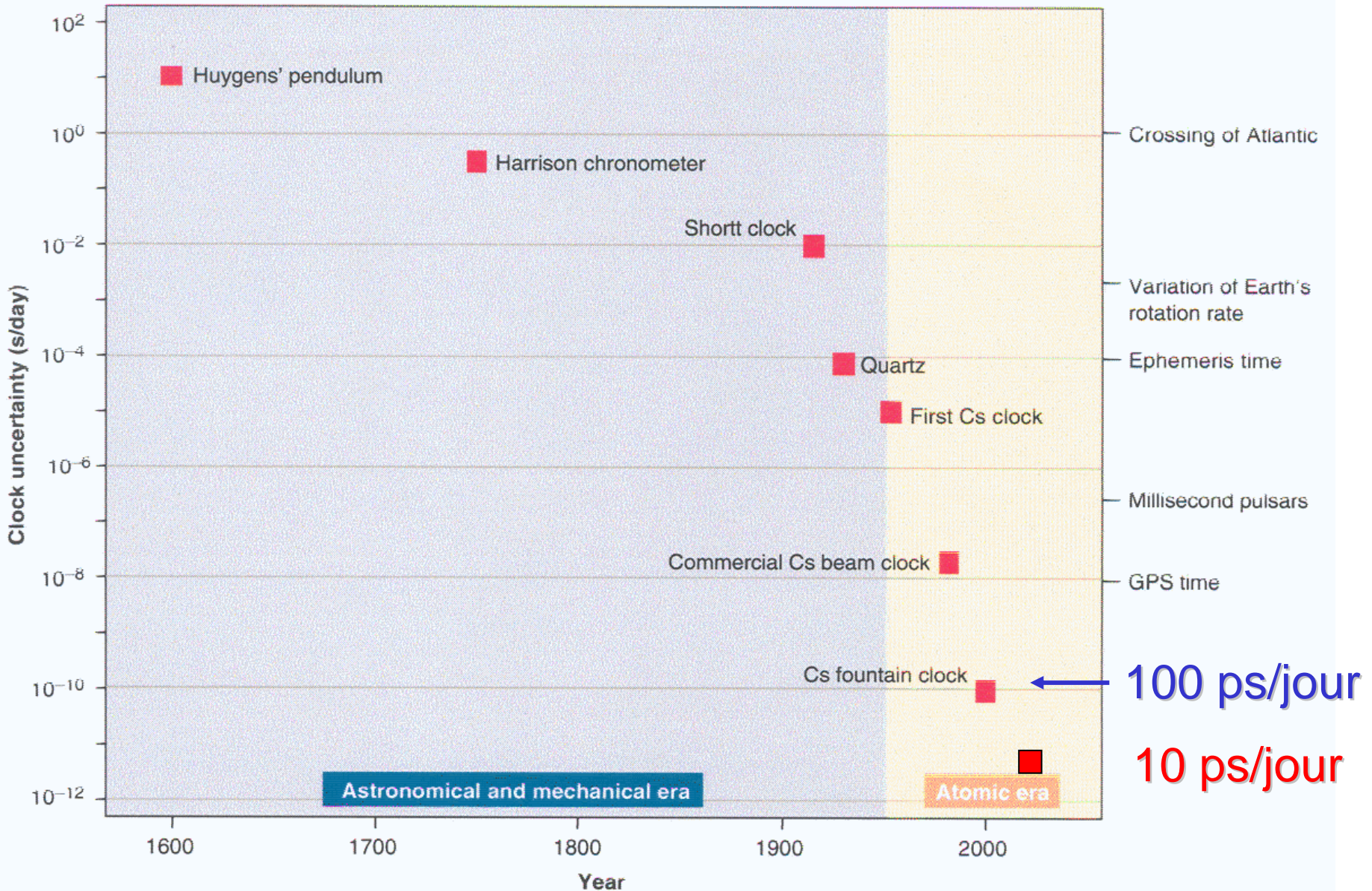
## Horloges atomiques:

Stabilité intrinsèque des niveaux d'énergie d'un atome  
Contrôle du mouvement

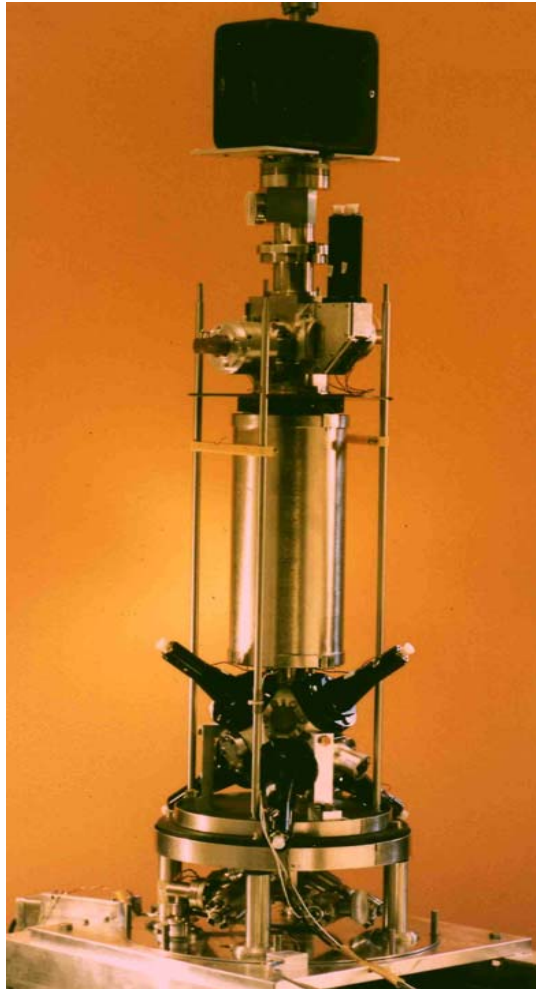
## Refroidissement laser:

faibles vitesses: Long temps de mesure:  
résonances fines

# L'amélioration de la mesure du temps



# Horloge atomique



## Definition de la seconde :

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état électronique fondamental du césium 133

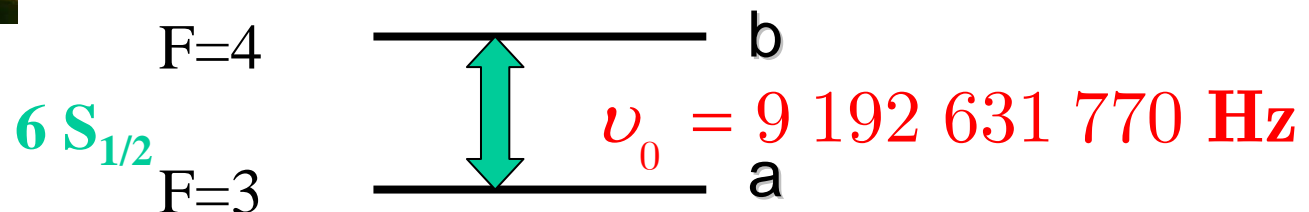
## Stabilité intrinsèque des niveaux d'énergie

Perturbations calculables par la mécanique quantique

## Refroidissement Laser à 1 $\mu\text{K}$

Soit une vitesse rms: 7mm/s

Fontaine  
Microgravité



**1997 Nobel prize in physics**  
**S. Chu, C. Cohen Tannoudji, W. Phillips**  
**Laser manipulation of atoms**



**2001 Nobel prize in physics**  
**E. Cornell, W. Ketterle, C. Wieman**  
**Bose-Einstein Condensation**  
**In atomic gases**



**2005 Nobel prize in physics**  
**J. Hall, T. Haensch, R. Glauber**  
**Laser precision spectroscopy and**  
**optical frequency comb**



# Horloges atomiques

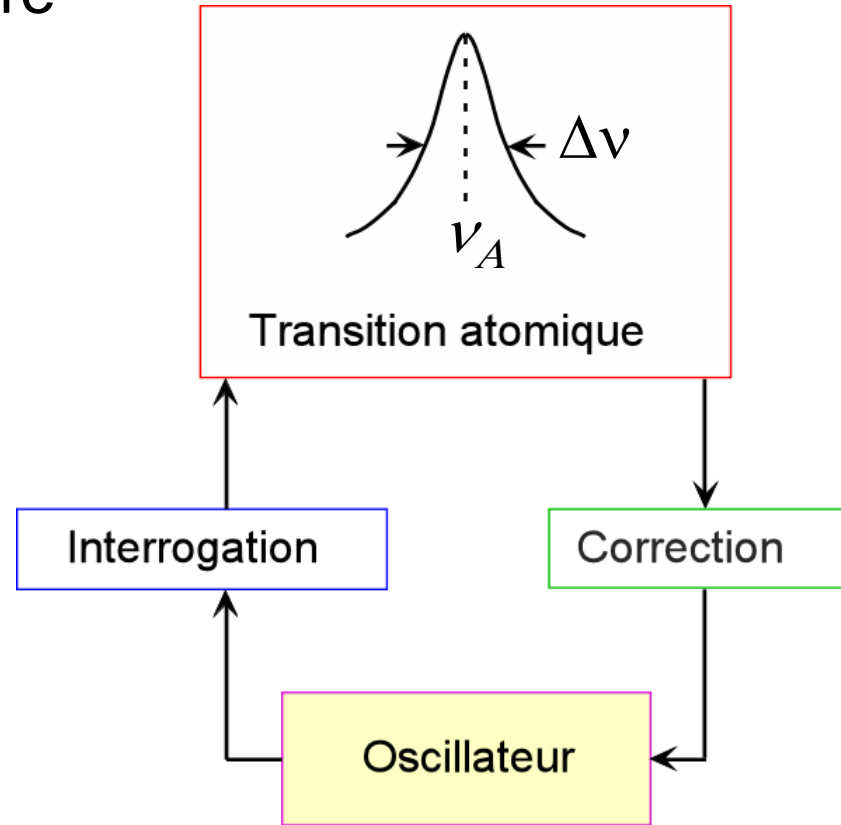
Un oscillateur de fréquence  $\nu$  génère une onde électromagnétique qui excite une transition a - b

La probabilité de transition  $a \rightarrow b$  mesurée en fonction de  $\nu$  a la forme d'une courbe de résonance centrée en  $\nu_A = (E_b - E_a) / h$  et de largeur  $\Delta\nu$

Une boucle d'asservissement assujettit  $\nu$  à rester égale à la fréquence atomique  $\nu_A$

Une horloge atomique est un oscillateur dont la fréquence est verrouillée sur celle d'une transition atomique

Plus  $\Delta\nu$  est petit, plus l'asservissement sera précis



# Applications des horloges atomiques

- **Navigation, Positionnement**

GPS, GALILEO, Sondes spatiales lointaines



- **Geodésie**

- **Datation des pulsars millisecondes**

- **Interferometrie a tres grande ligne de base (VLBI)**

- **Synchronisation d'horloges distantes**

TAI



- **Tests de physique fondamentale** Ex : relativité générale

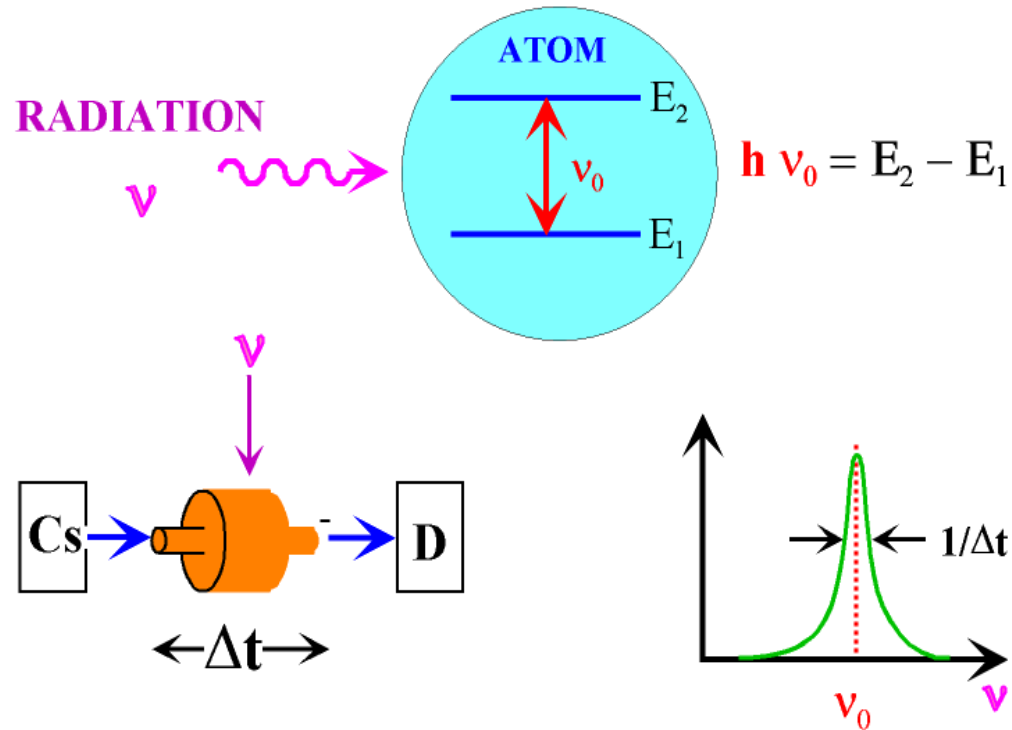
Effet Einstein, red-shift gravitationel :  $10^{-4}$   $\longrightarrow$   $10^{-6}$

Délai Shapiro :  $10^{-3}$   $\longrightarrow$   $10^{-7}$

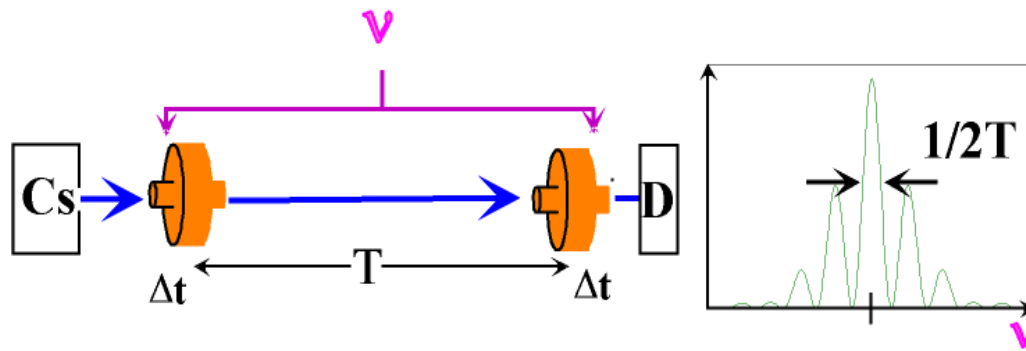
Recherche d'une dérive de la constante de structure fine  $\alpha$

$$\alpha^{-1} d\alpha / dt \text{ at } 10^{-16} / \text{year}$$

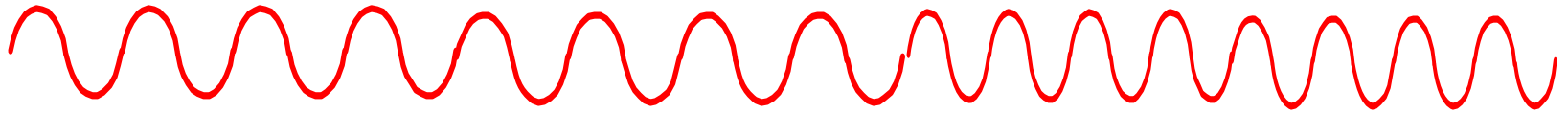
# Principe d'une horloge atomique



## Ramsey method



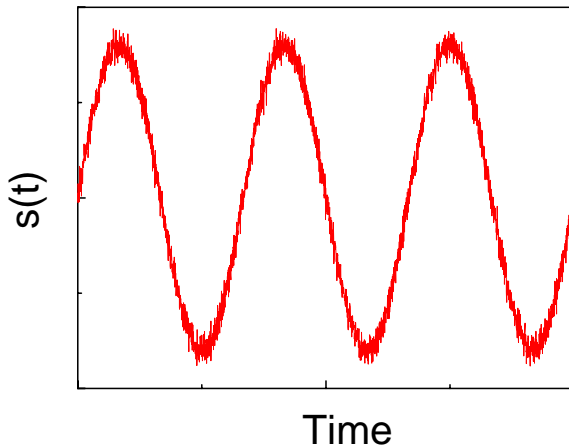
# Stabilité de phase/ fréquence



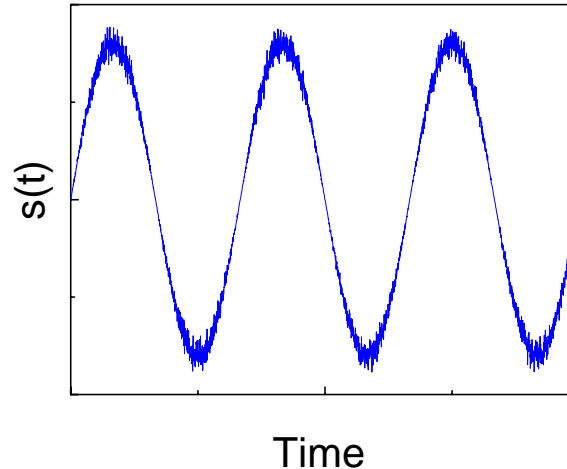
Une fréquence parfaite:  $s(t) = A \sin(\omega_0 t)$

en pratique  $s(t) = A \sin(\omega_0 t) + a(t) = A (1 + \epsilon(t)) \sin(\omega_0 t + \phi(t))$

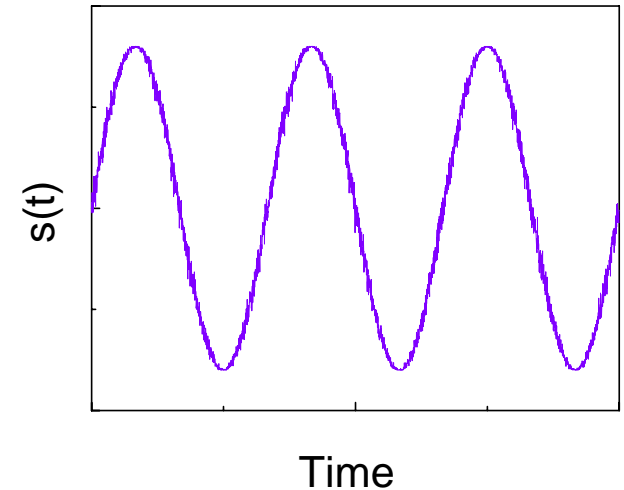
AM+PM



Pure AM



Pure PM



# fluctuations de fréquences

fréquence instantanée  $\omega(t) = \frac{d}{dt}(\omega_0 t + \phi(t)) = \omega_0 + \frac{d\phi}{dt}$

stabilité de fréquence:

« amplitude » des fluctuations relatives de fréquence  $y(t) = \frac{\omega(t) - \omega_0}{\omega_0}$

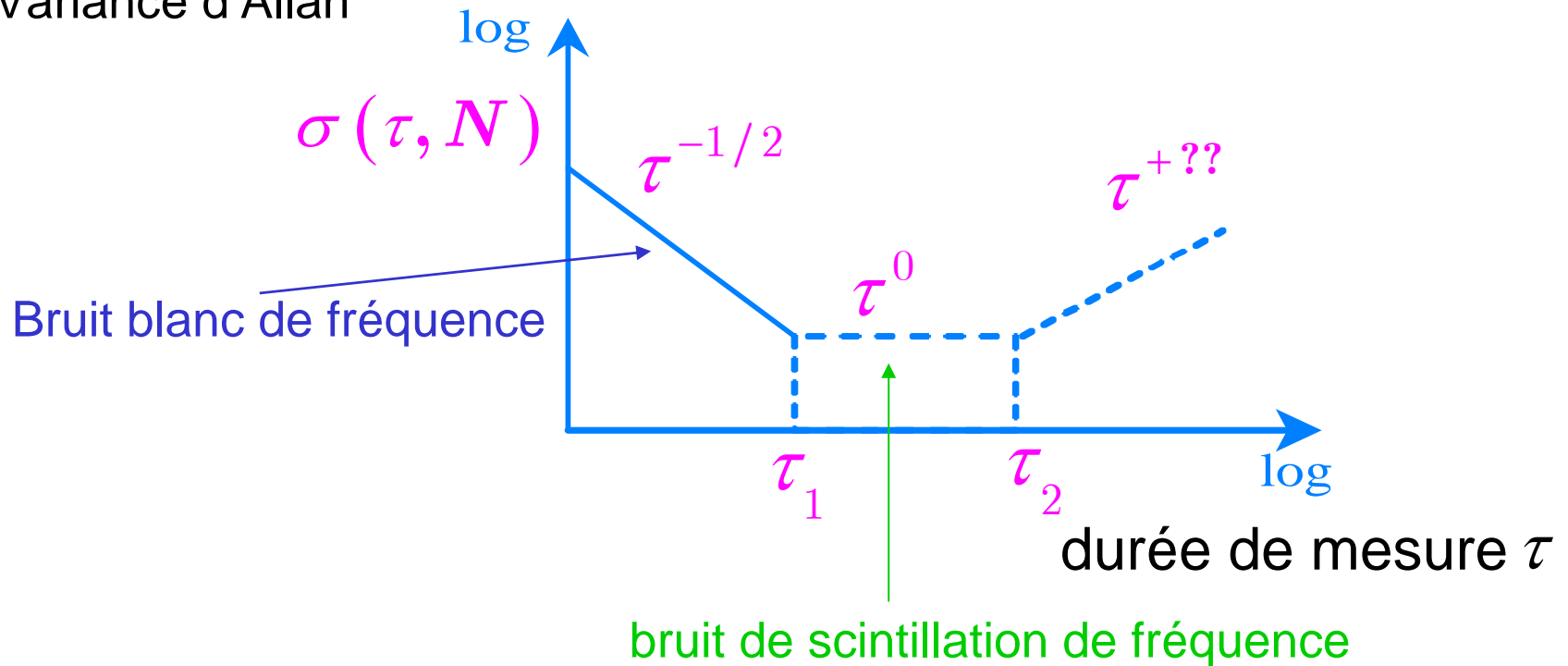
La stabilité de fréquence est caractérisée par la variance d'Allan

$$y_k(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_{k+1}} y(t) dt \quad t_k + \tau = t_{k+1}$$

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (y_{k+1}(\tau) - y_k(\tau))^2 \rangle$$

$\sigma_y(\tau)$  : fluctuations de fréquences typiques moyennées sur une durée  $\tau$   
converge pour la plupart des bruits de fréquence  
rencontrés expérimentalement

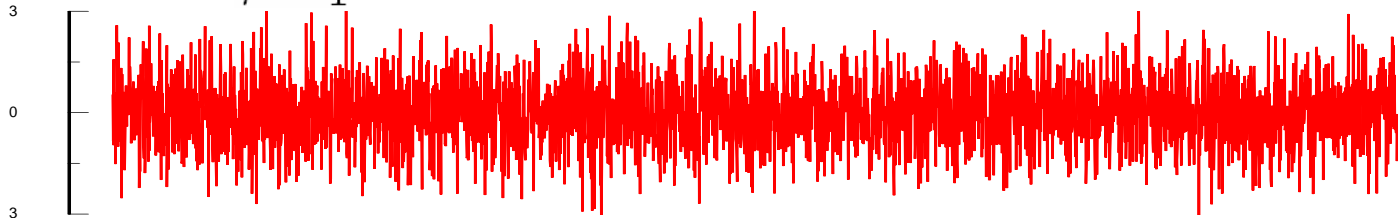
Variance d'Allan



$$\sigma^2(\tau, N) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{k=N-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2$$

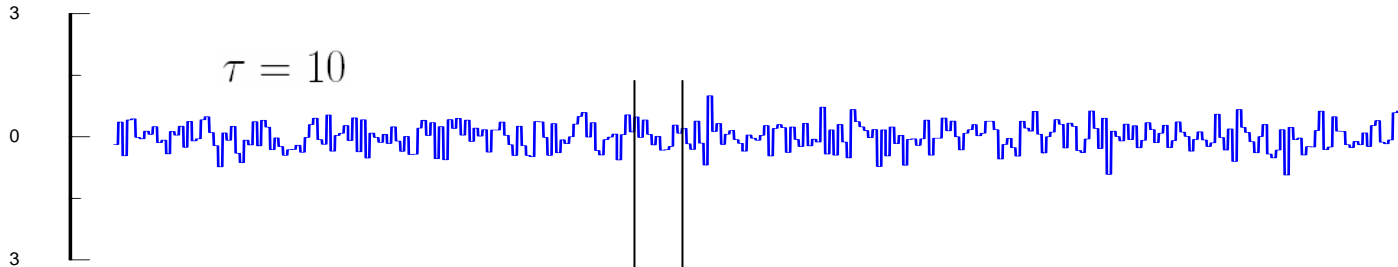
# Bruit blanc de fréquence

$\tau = 1$



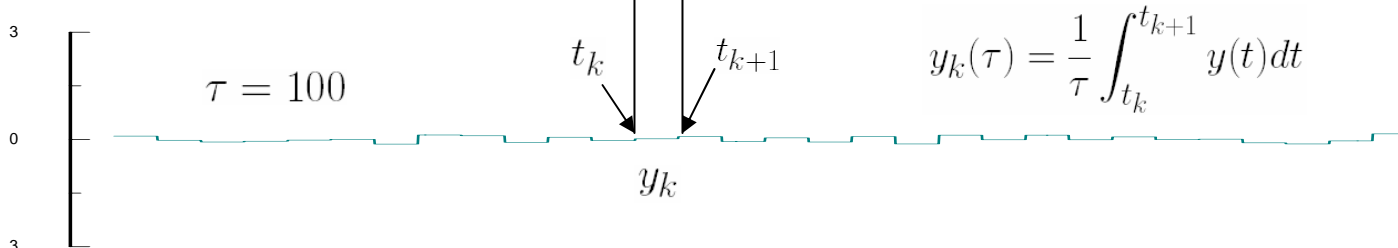
$$\sigma_y(1) = 1$$

$\tau = 10$



$$\sigma_y(10) = 1/\sqrt{10}$$

$\tau = 100$



$$y_k(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_{k+1}} y(t) dt$$

$$\sigma_y(100) = 1/10$$

$\tau = 1000$



$$\sigma_y(1000) = 1/\sqrt{1000}$$

# Exactitude

Dans quelle mesure l'horloge réalise-t-elle la définition de la seconde ?

$$\nu_{\text{horloge}} = \nu_{\text{cesium}} + \varepsilon$$

ou  $\nu_{\text{cesium}}$  est la fréquence d'un atome de césium au repos l'absence de perturbation

En pratique :

Les atomes bougent : effet Doppler, effets relativistes

Les atomes interagissent entre eux ou avec le monde extérieur: champ magnétique, électrique, rayonnement du corps noir, asservissement...

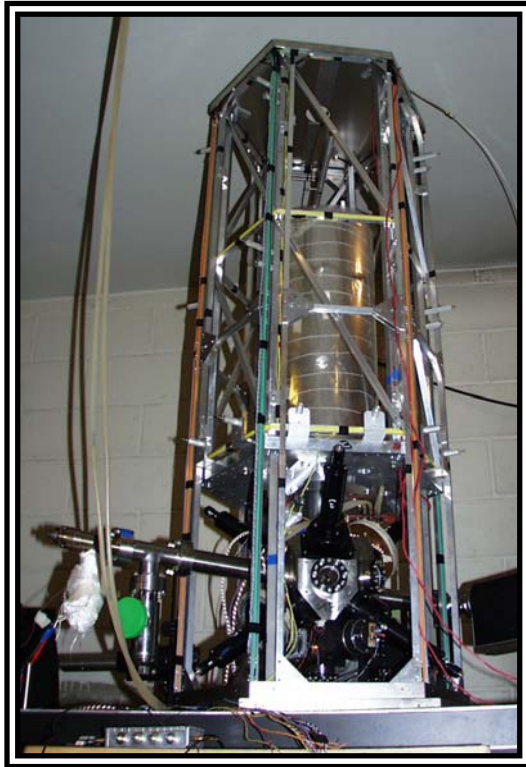
Méthode :

mesurer et/ou calculer tous ces effets et en déduire  $\varepsilon$  avec la meilleure précision possible.

L'exactitude de l'horloge est la meilleure estimation de  $\varepsilon$

# Fontaines Atomiques

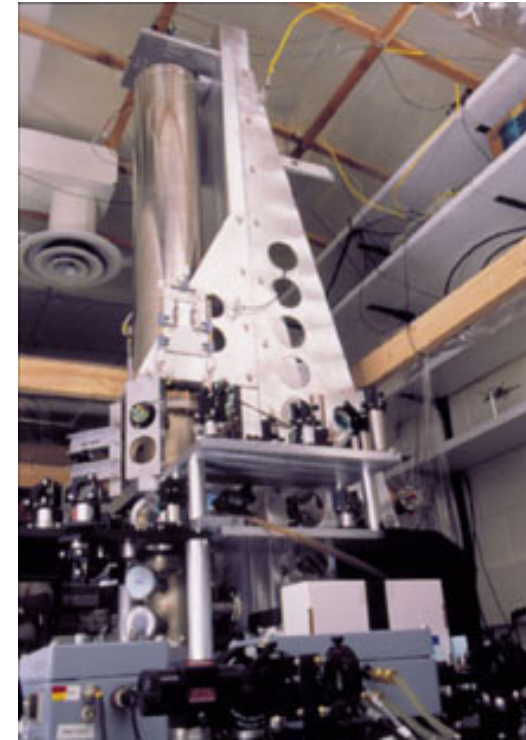
8 fontaines en operation: SYRTE, PTB, NIST, USNO, Penn St, IEN. 5 avec une exactitude de  $1 \cdot 10^{-15}$  . 12 en construction.



BNM-SYRTE, FR

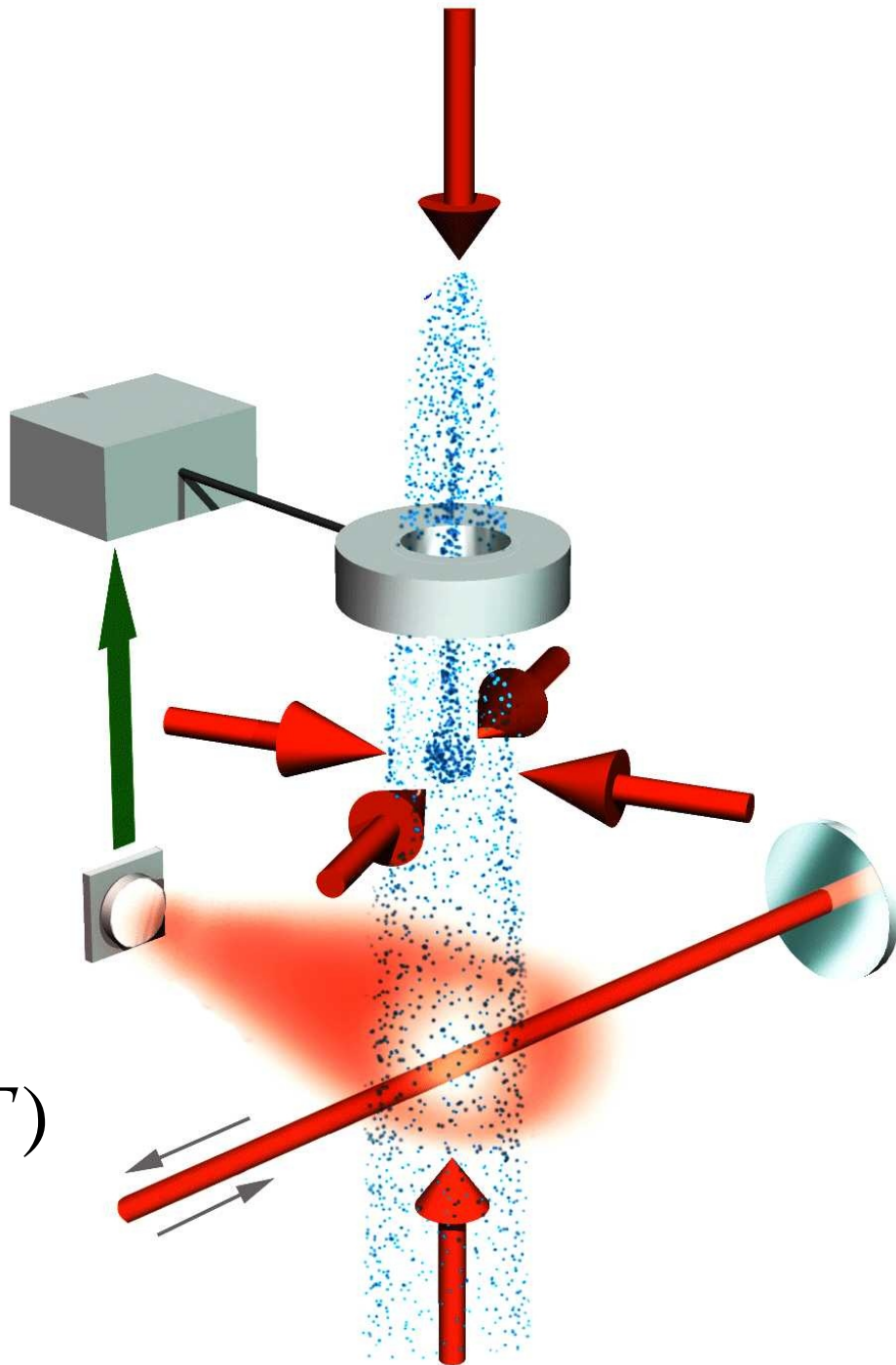


PTB, D

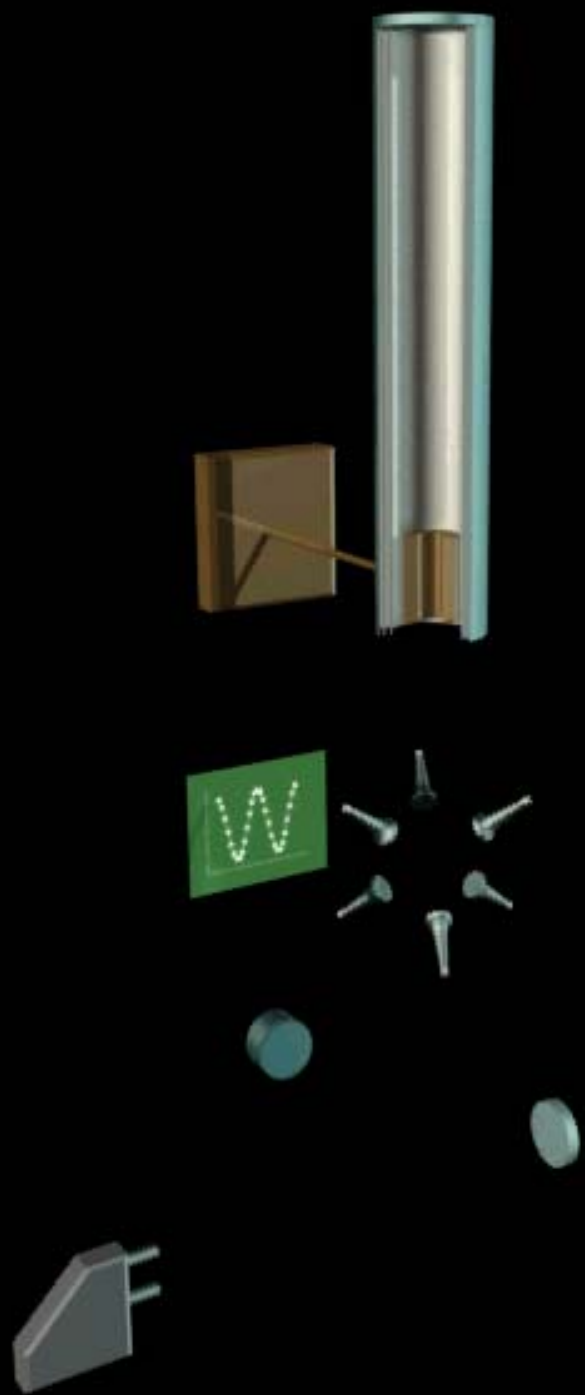


NIST, USA

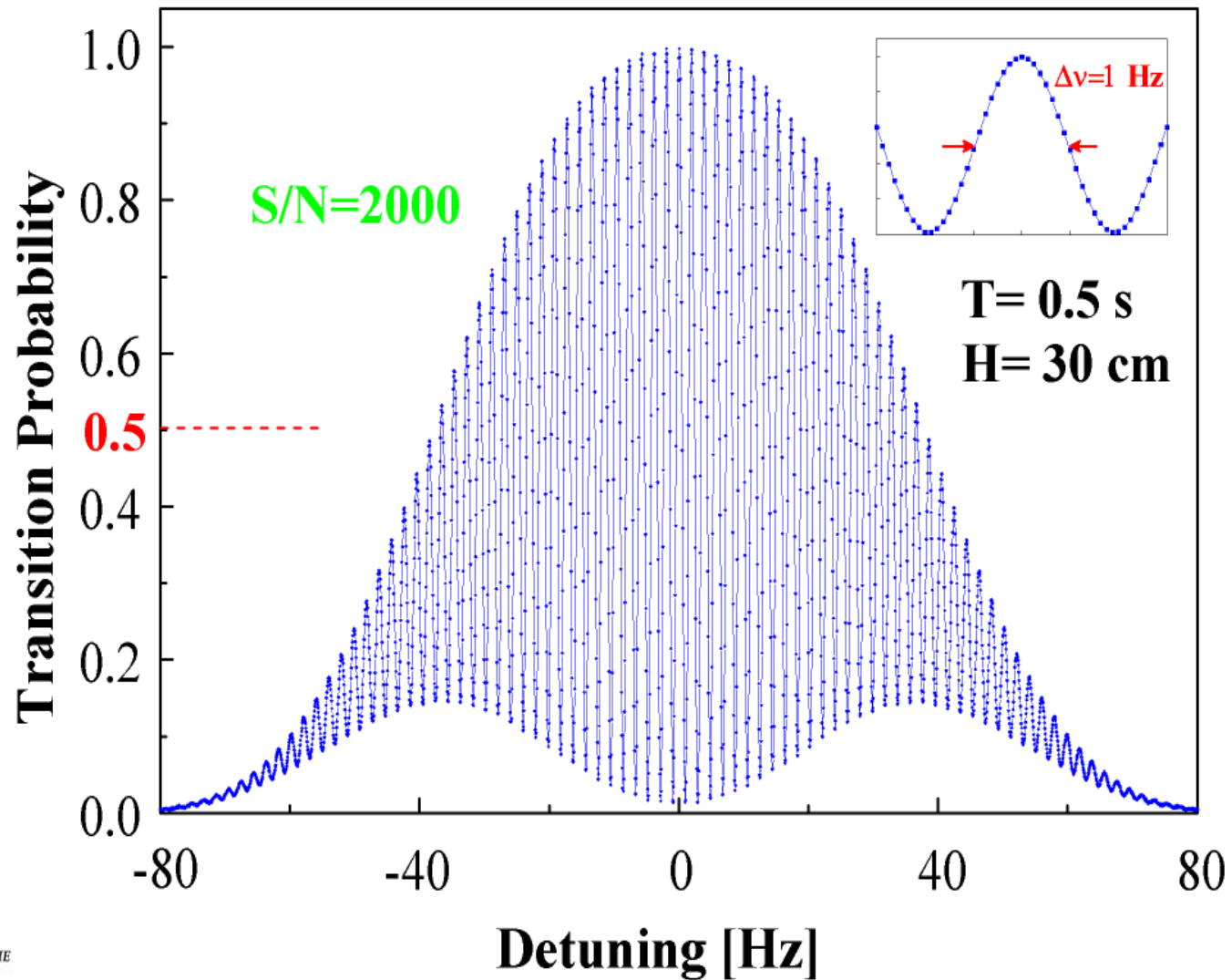
# une fontaine atomique



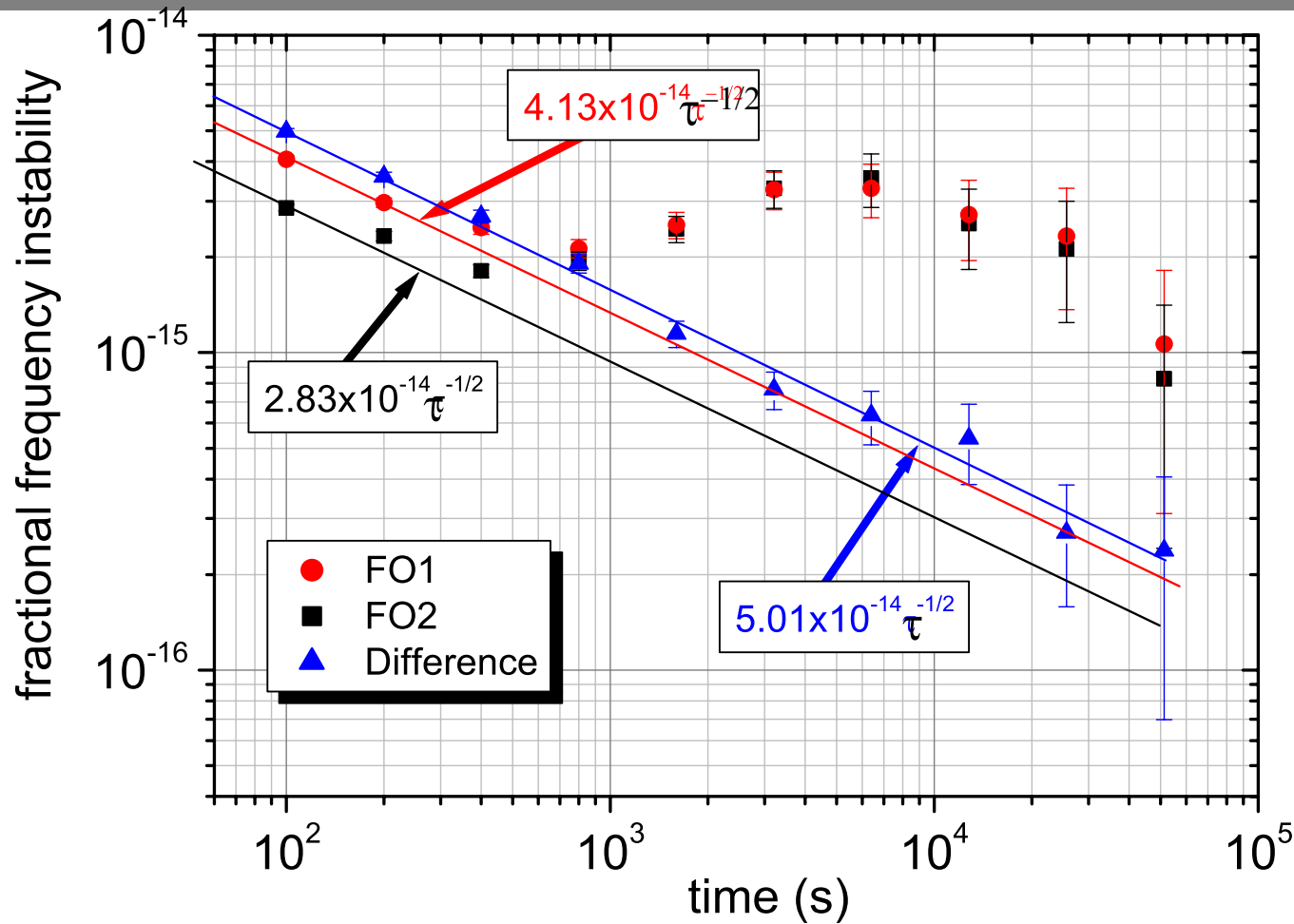
$$P_{a \rightarrow b} = \frac{1}{2} (1 + \cos(\omega - \omega_0)) T$$



# Franges de Ramsey dans une fontaine atomique



# Comparaison entre deux fontaines à césium SYRTE (Paris)



S. Bize  
et al.  
C. Rendus  
Acad. 2004  
SYRTE

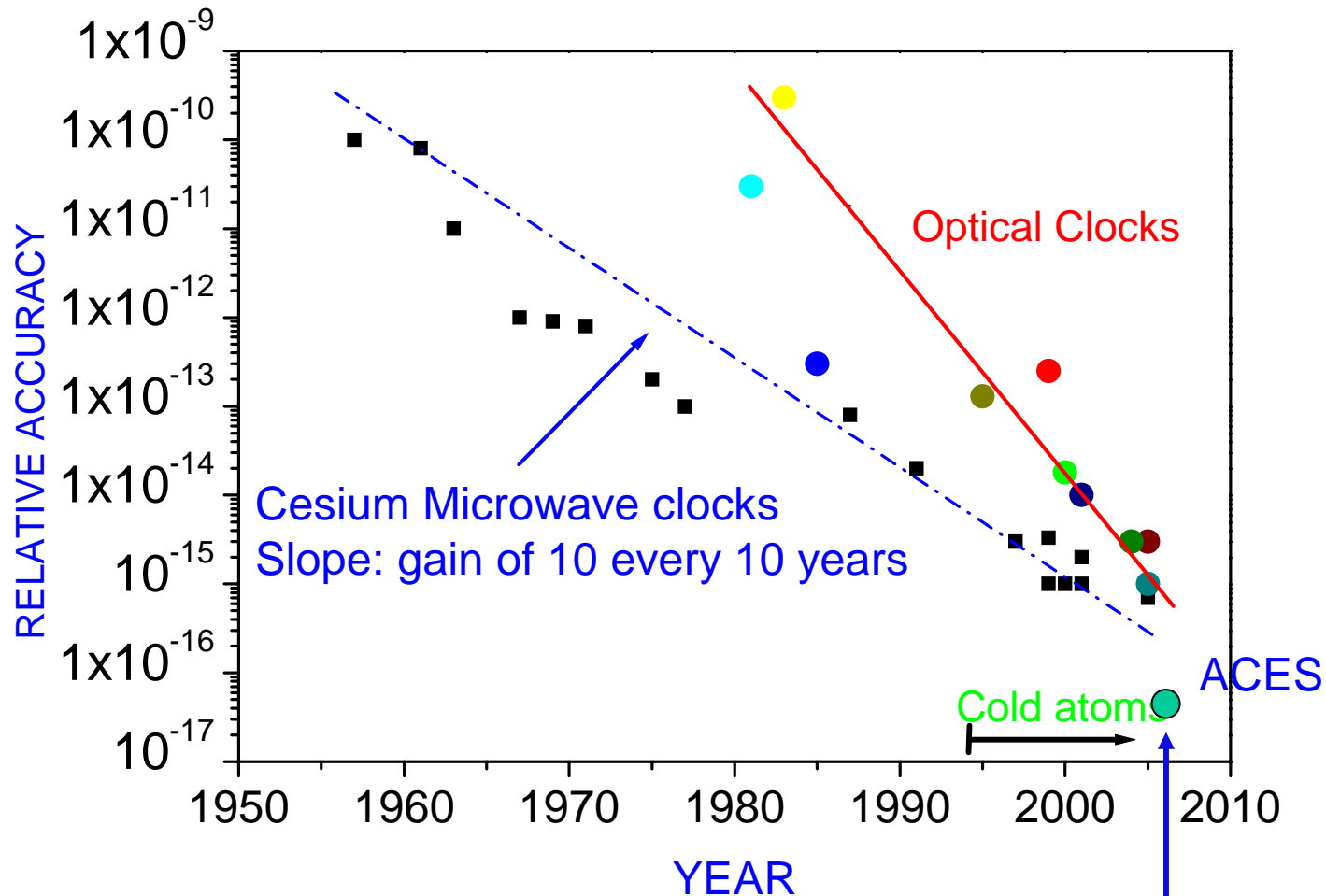
Stabilité mesurée:  $1.4 \cdot 10^{-16}$  at 50 000 s

Meilleure stabilité parmi les horloges à césium: Facteur 5/ Hydrogen Maser

Accord entre les fontaines:  $4 \cdot 10^{-16}$

# Accuracy of the atomic time

## ACCURACY OF THE ATOMIC TIME



Current accuracy:

Microwave:  $6 \times 10^{-16}$  1-2  $10^{-16}$  & PHARAO

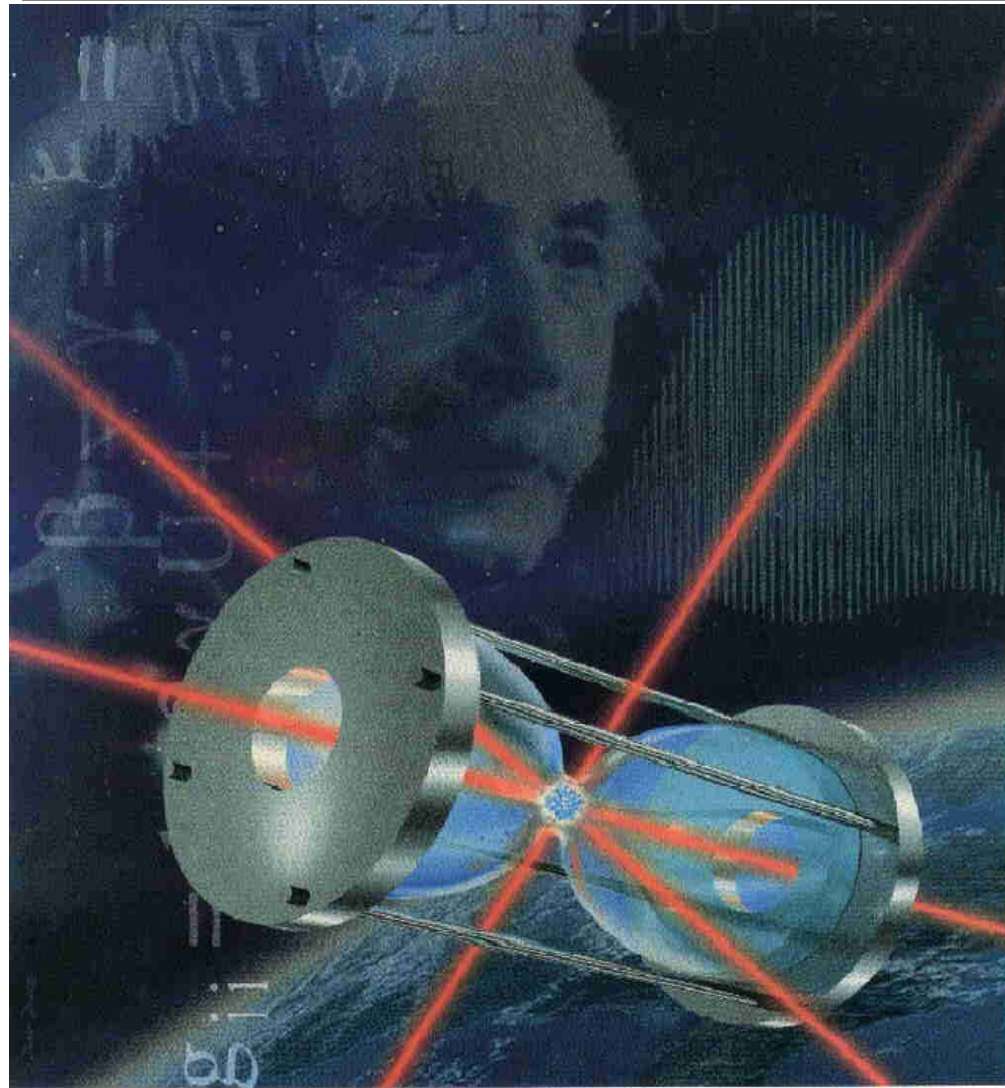
Optical :  $6 \times 10^{-17}$   $10^{-17}$  et mieux



# Au delà des fontaines

- La qualité d'une horloge:  $\nu_0 T$
- Augmenter la fréquence: horloge optique
- Allonger encore le temps de mesure
- En utilisant la microgravité d'un satellite:
  - projet PHARAO
  - CNES, BNM-SYRTE, ENS, ESA
- En piégeant les atomes

# Horloge spatiale: PHARAO



Cooling zone

Selection

Ramsey  
Interrogation

Mass 91 kg  
Power 110 W  
L=1m

detection

Cesium  
reservoir

Microwave cavity

3 Magnetic shields and solenoids

Ion pump

Fountain :

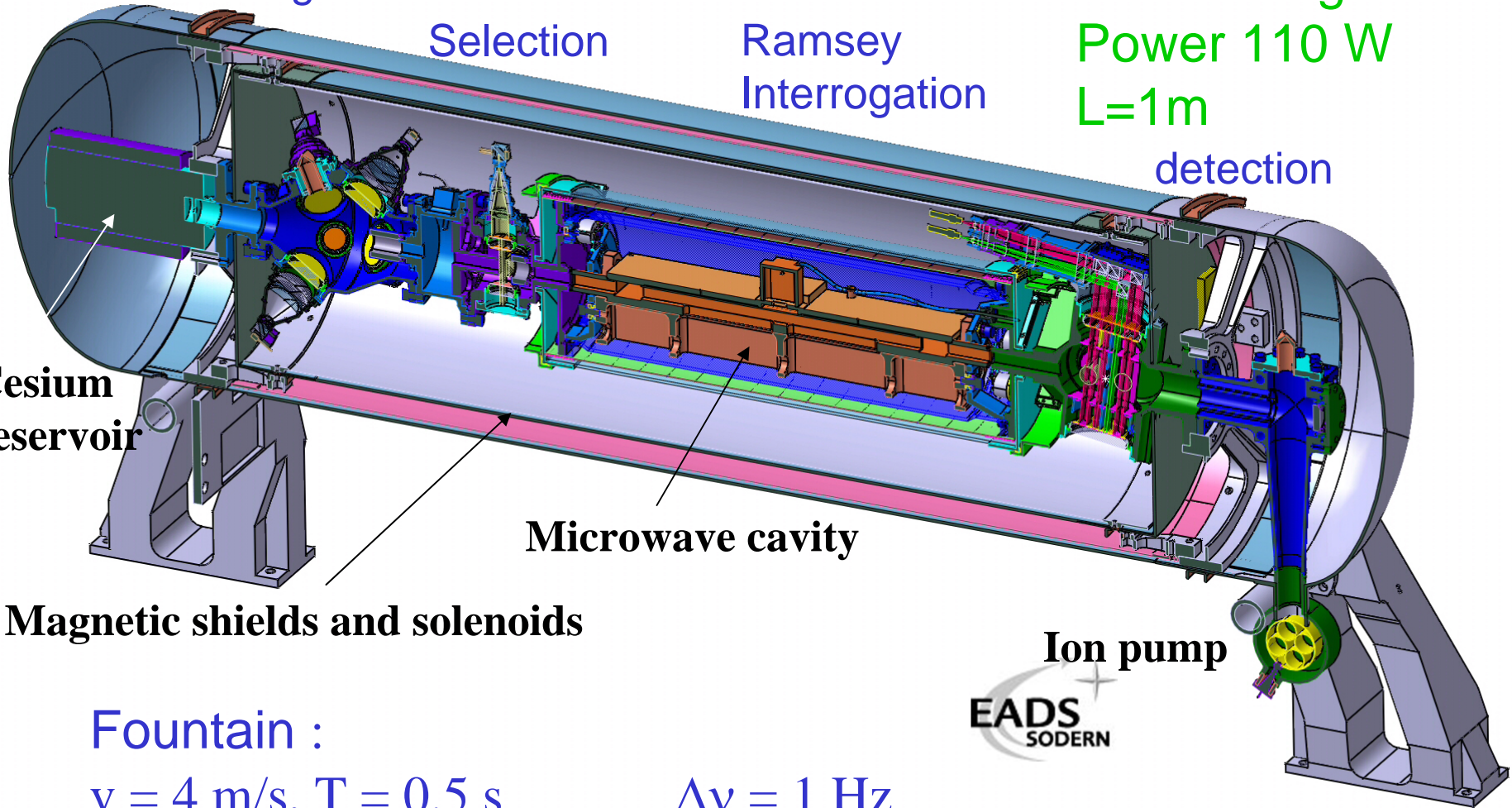
$$v = 4 \text{ m/s}, T = 0.5 \text{ s}$$

$$\Delta v = 1 \text{ Hz}$$

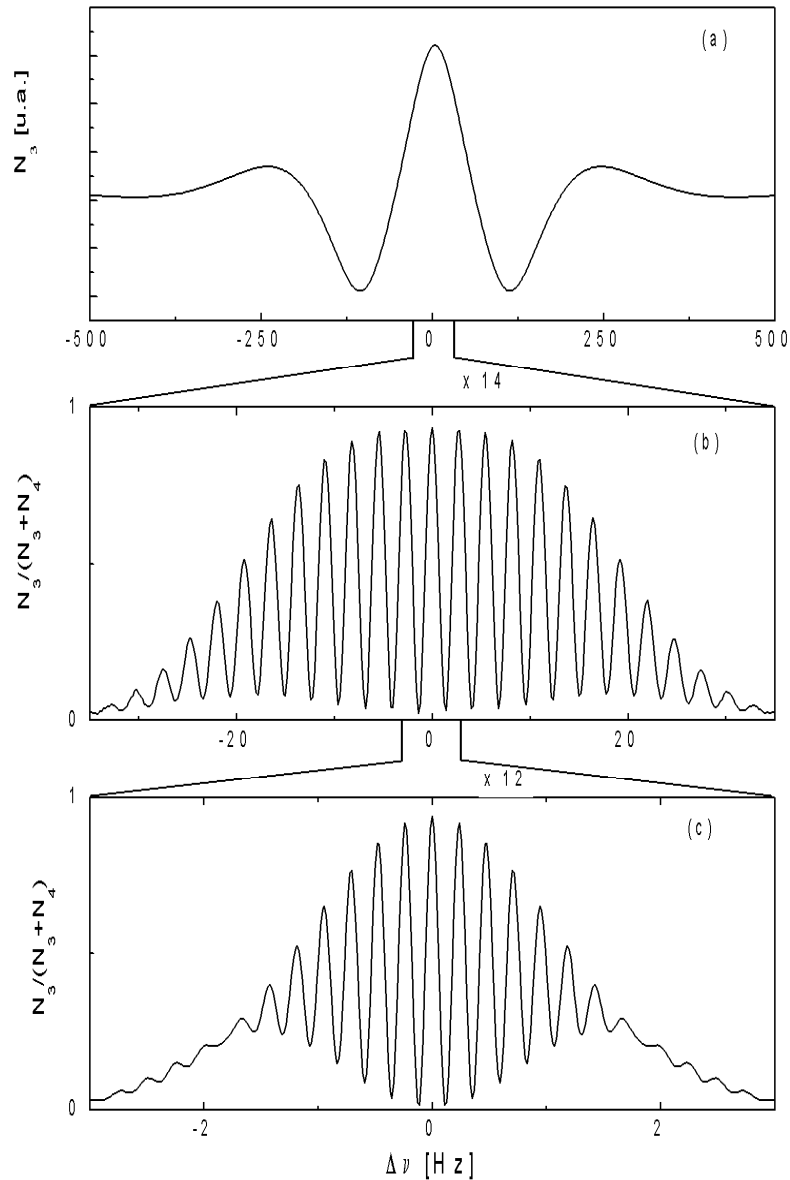
- PHARAO :

$$v = 0.05 \text{ m/s}, T = 5 \text{ s}$$

$$\Delta v = 0.1 \text{ Hz}$$



# Gains en sensibilité

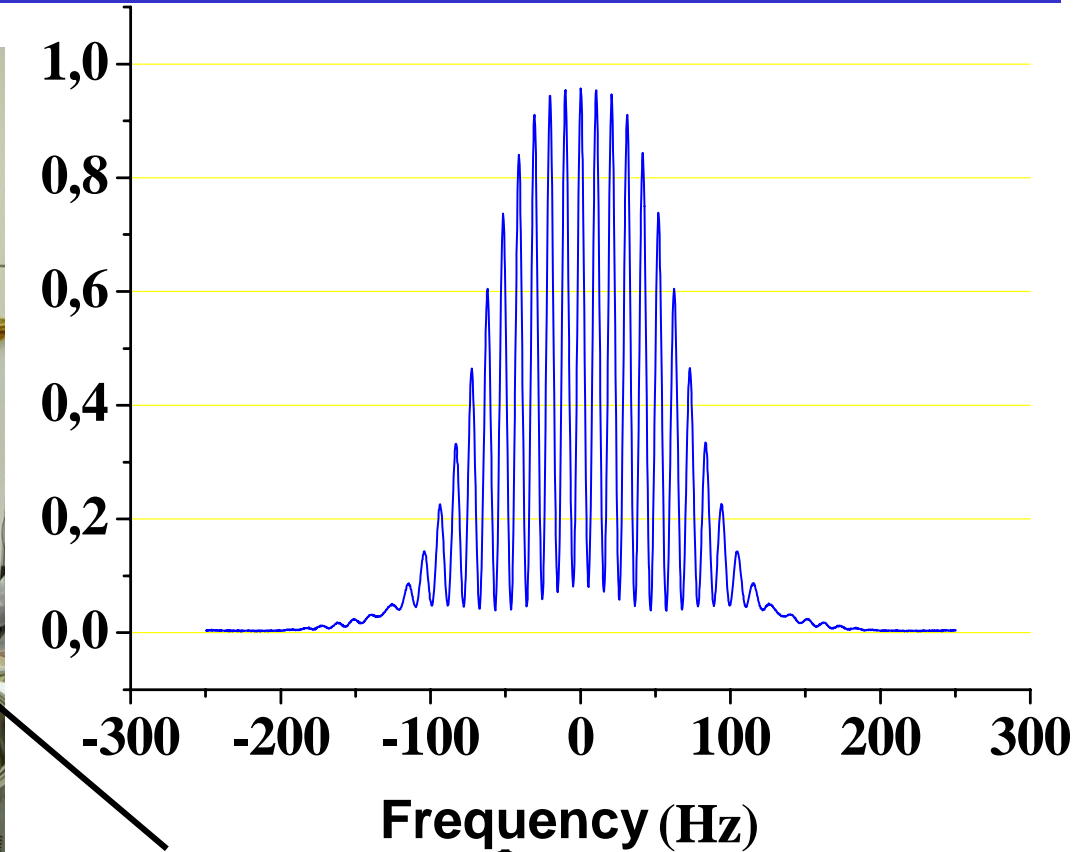
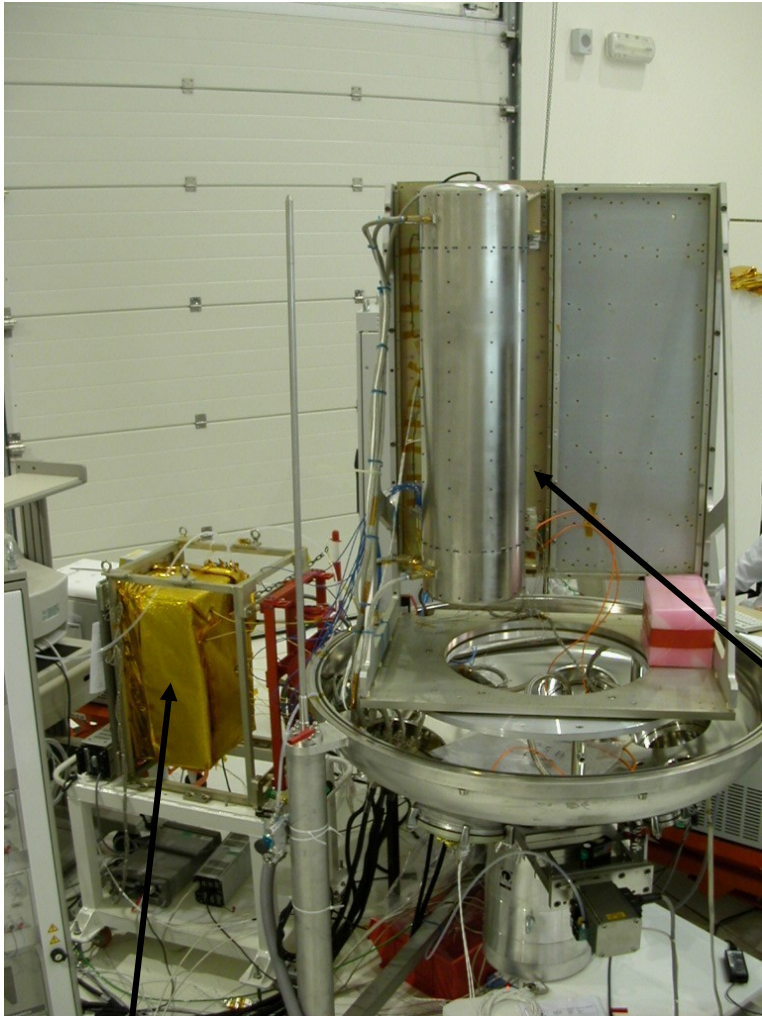


- Jet thermique :  
 $v = 100$  m/s,  $T = 5$  ms  
 $\Delta\nu = 100$  Hz

- Fontaine :  
 $v = 4$  m/s,  $T = 0.5$  s  
 $\Delta\nu = 1$  Hz

- PHARAO :  
 $v = 0.05$  m/s,  $T = 5$  s  
 $\Delta\nu = 0.1$  Hz

# L'horloge spatiale PHARAO



Tube cesium



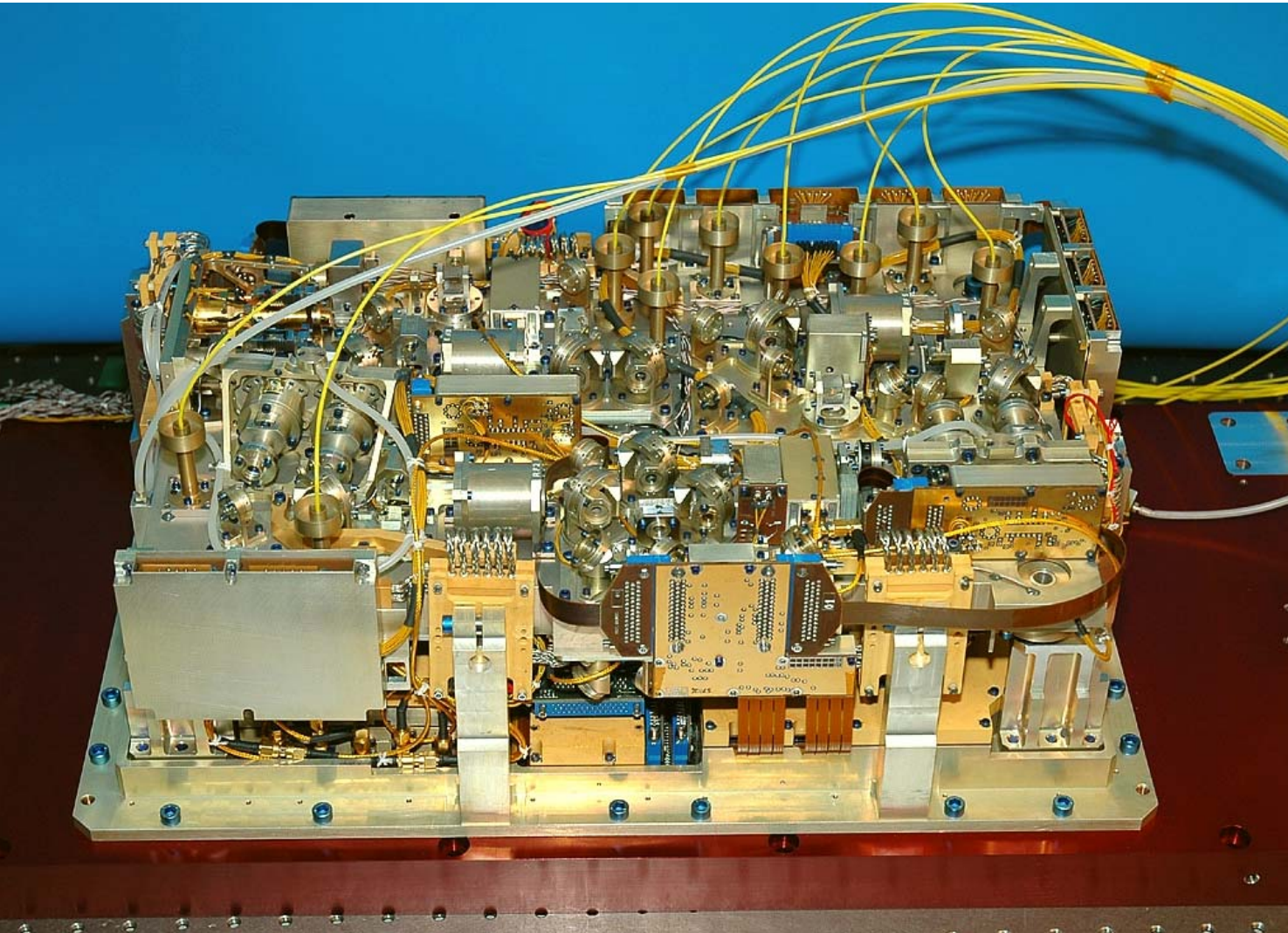
CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

Tests en cours

Source laser

# Source Laser

**20.054 kg, 36W, 30 liters, Vacuum and Air operation, T=10-35 deg.**



**Main active components:**  
4 ECDL  
4 DL  
6 AOM  
30 PZT  
11 motors  
6 photodiodes  
8 peltier coolers

# Cesium Tube

L=900 mm, M= 45 kg, P= 5 W.

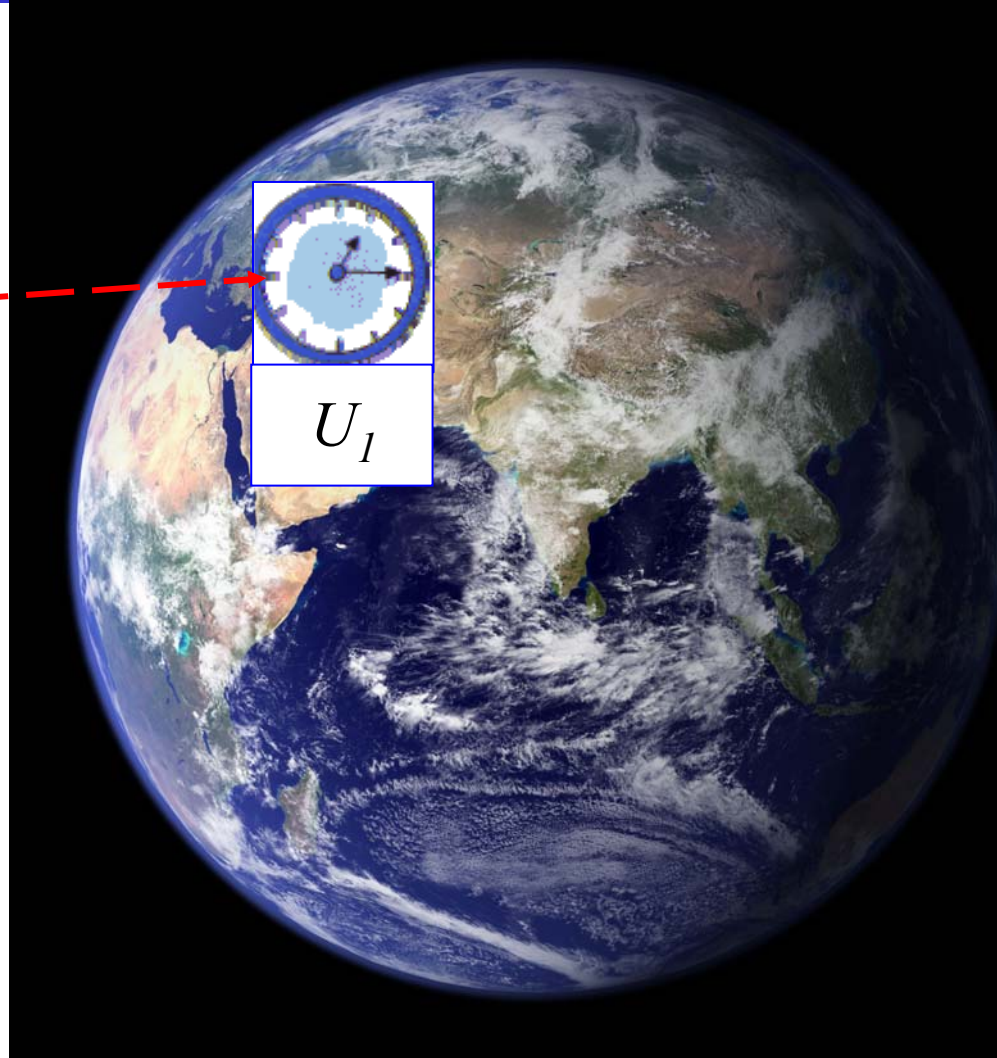
Ramsey cavity  
Tested in fountain

The logo for the ACES mission, featuring the acronym 'ACES' in a bold, blue, sans-serif font. To the right of the text is a stylized graphic of a globe with latitude and longitude lines, rendered in a light blue color.A white rectangular box with a thin black border containing the text 'ACES atomic clocks' in blue, sans-serif font. The box is positioned in the upper center of the image, directly below the satellite. Concentric white arcs radiate from the box, representing the signal being transmitted to the ground stations.

- A cold atom Cesium clock in space
- Fundamental physics tests
- Worldwide access



# Une Prédiction de la relativité générale: décalage gravitationnel



$$\frac{v_2}{v_1} = \left( 1 - \frac{U_2 - U_1}{c^2} \right)$$

Redshift :  $+4.59 \cdot 10^{-11}$   
avec horloges à  $10^{-16}$   
ACES:  $2 \cdot 10^{-6}$

gain d'un facteur 35 sur GP-A 1976

## Déplacement gravitationnel de la fréquence d'une horloge

2 horloges à des altitudes différentes dans le champ gravitationnel de la terre n'ont pas la même fréquence

$$\frac{\omega_A(z + \delta z) - \omega_A(z)}{\omega_A(z)} = \frac{\delta \omega_A}{\omega_A} = \frac{g \delta z}{c^2}$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2 \quad \delta z = 1 \text{ m} \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \rightarrow \quad \delta \omega / \omega = 10^{-16}$$

2 horloges à des altitudes différentes de 1 mètre ont des fréquences différant en valeur relative de  $10^{-16}$ .

Une horloge spatiale à 400 kms d'altitude diffère de l'horloge terrestre de  $4.5 \times 10^{-11}$ .

Autre application possible: Géodésie

détermination du géoïde, lieu des points où le potentiel de gravitation a une valeur donnée

# Horloges optiques

Onde lumineuse à  $10^{15}$  Hz au lieu de  $10^{10}$  Hz

Source laser ultrastable

Comment mesurer une fréquence optique ?

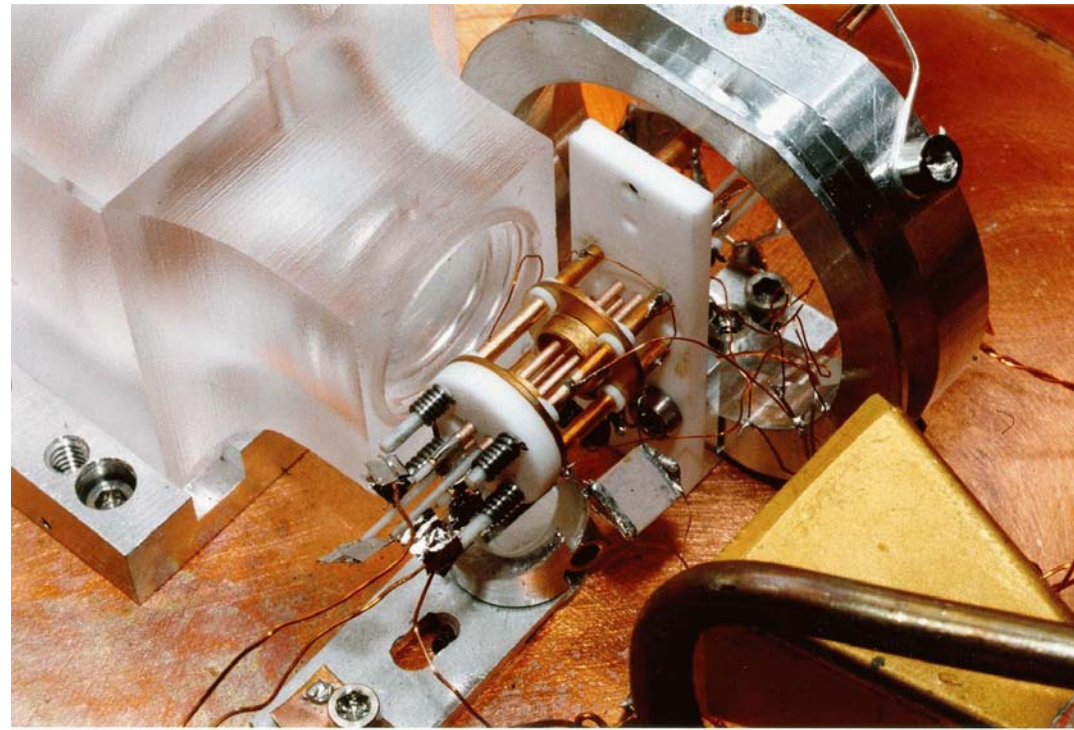
# Horloges optiques: Ions piégés et atomes neutres

- $Q = \nu / \Delta\nu = 2 \nu T$
- ions piégés :
- T très long mais un ion seulement ou un très petit nombre dans le même piège à cause de l'interaction Coulombienne
- Refroidissement laser
- Laser ultra-stable

- $\text{Hg}^+$ : stability:  $5 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$
  - accuracy  $6 \times 10^{-17}$
- NIST (USA)

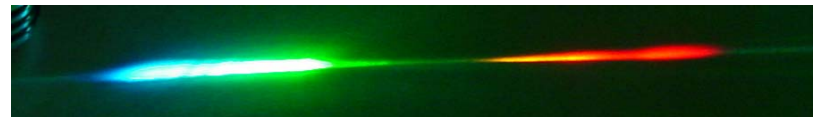
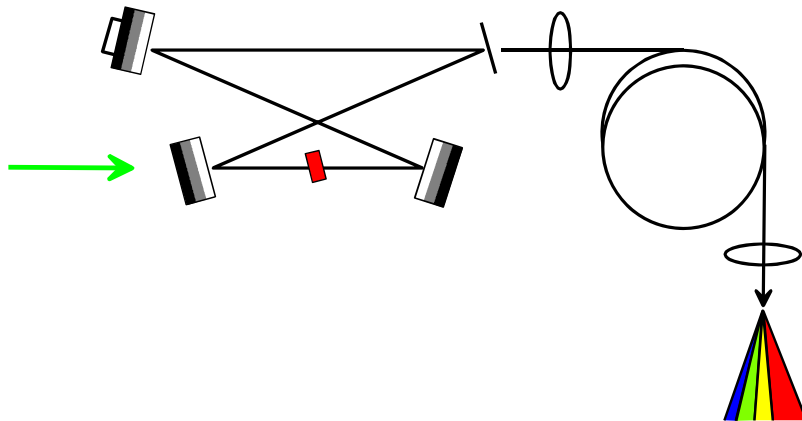
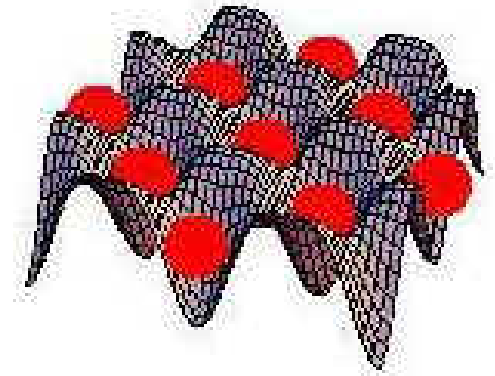
Transitions optiques:

$\text{Yb}^+$ ,  $\text{Ba}^+$ ,  $\text{In}^+$ ,  $\text{Cd}^+$ ,  $\text{Sr}^+$  ..  
NRC, NPL, PTB...



# Atomes neutres

- Beaucoup d'atomes à la fois: meilleur S/B
- Domaine optique...Ca, Mg, Sr, Ag,...
- Peigne de fréquence

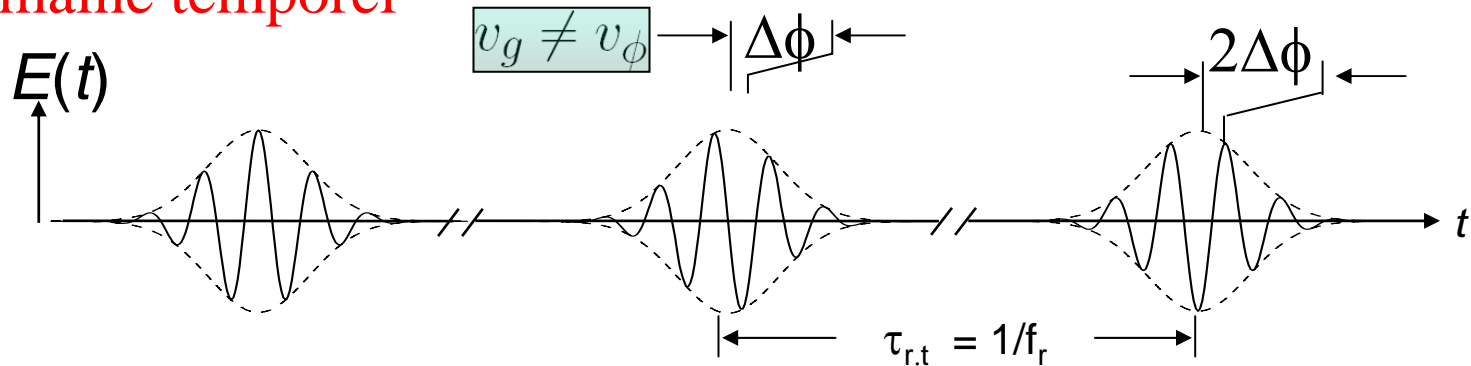


Laser femtoseconde a modes bloqués

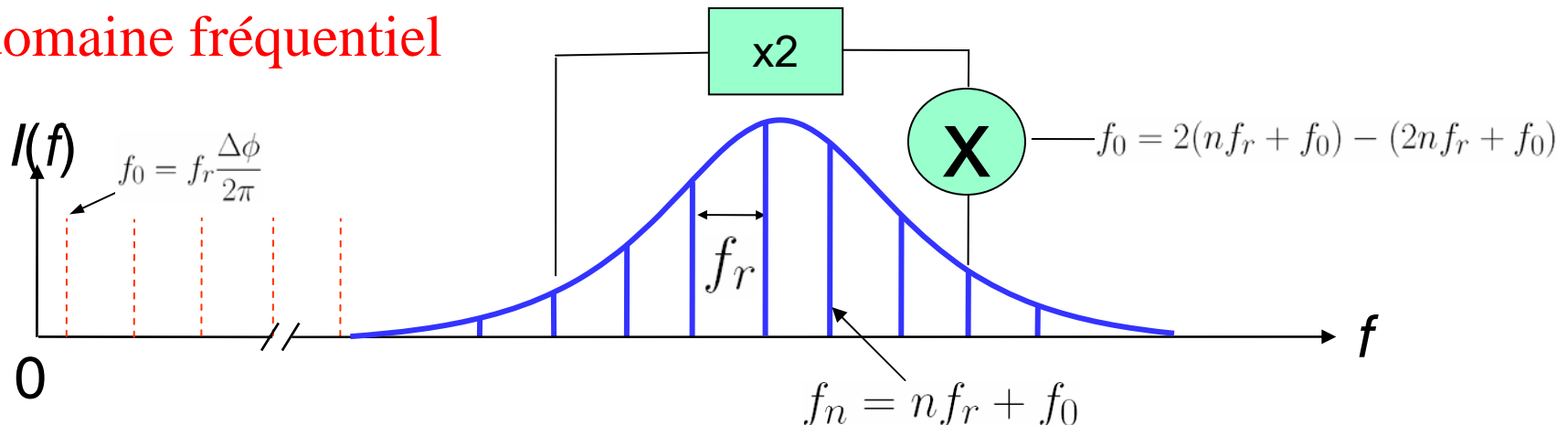
*J. Reichert et al. PRL* **84**, 3232 (2000),  
*S. Diddams et al. PRL* **84**,5102 (2000)

# Peigne de fréquence femtoseconde

- domaine temporel



- domaine fréquentiel



Toutes les fréquences du peigne sont des multiples entiers de la fréquence de repetition  $f_r$

# Perspectives

- Vers des horloges de stabilité  $10^{-16}$  à 1seconde et  $10^{-18}$  par jour
- **Beaucoup d'applications:**
  - une nouvelle géodesie relativiste
  - Positionnement et navigation: GPS/Galileo 2<sup>nd</sup>e generation
  - Tests de physique fondamentale
- Vers un référentiel d'espace temps spatial ultra-precis

