

# **HORLOGES ATOMIQUES ET TRANSFERTS DE TEMPS ULTRASTABLES**

**Noël Dimarcq**

**SYRTE – Systèmes de Référence Temps-Espace**



# **HORLOGES ATOMIQUES ET TRANSFERTS DE TEMPS ULTRASTABLES**

- Introduction – Besoins de hautes performances**
- Horloges atomiques**
- Transferts de temps / fréquence**
- Conclusions**

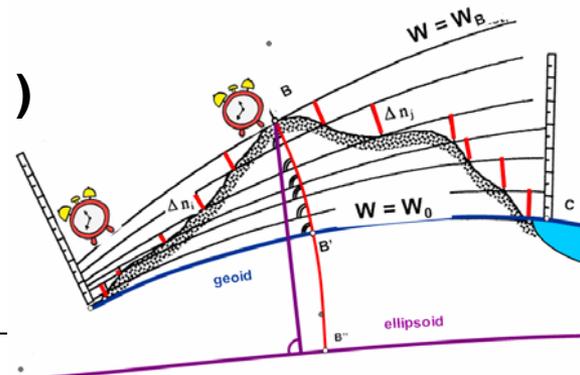
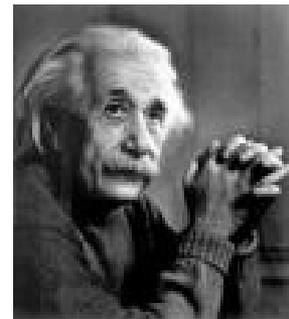
# HORLOGES ATOMIQUES ET TRANSFERTS DE TEMPS ULTRASTABLES

- Introduction – Besoins de hautes performances**
- Horloges atomiques
- Transferts de temps / fréquence
- Conclusions

# Introduction

**Besoin de références de fréquence / temps de très hautes performances ET de moyens de transfert & dissémination**

- ❑ **Métrologie fondamentale : unités SI, TAI, UTC**
- ❑ **Ranging, positionnement, navigation inertielle, GNSS**
- ❑ **Synchronisation de réseaux : DSN, VLBI, ...**
- ❑ **Physique fondamentale : tests de relativité restreinte, dérive des constantes fondamentale ( $\delta\alpha/\alpha < 3 \cdot 10^{-17}/\text{an}$ ), mesure du décalage gravitationnel (70 ppm avec GPA ; 2 ppm avec ACES), ...**
- ❑ **Géodésie relativiste (  $\frac{\Delta f}{f} = 10^{-16} / m$  )**
- ❑ **Astronomie (datation des pulsars)**

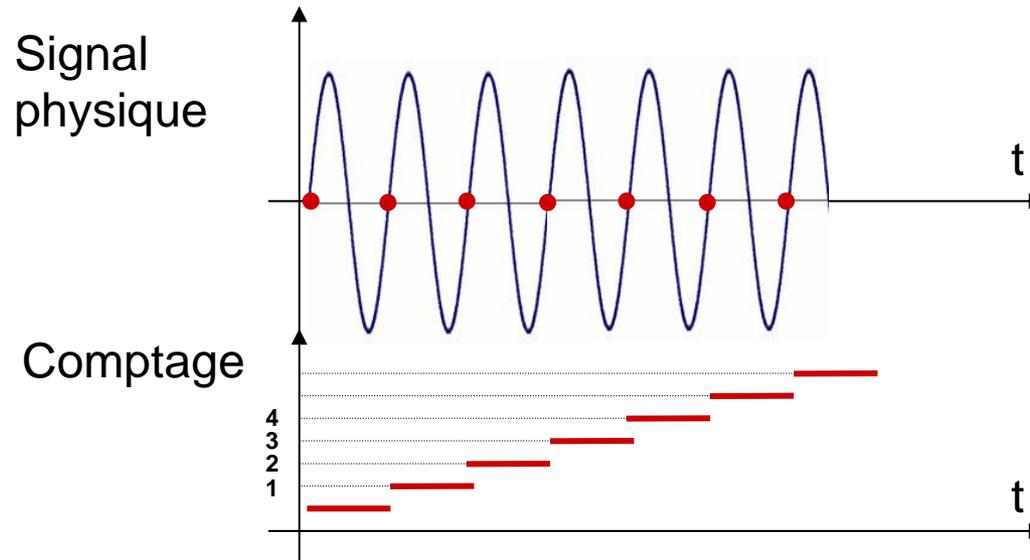


# HORLOGES ATOMIQUES ET TRANSFERTS DE TEMPS ULTRASTABLES

- ❑ Introduction – Besoins de hautes performances
- ❑ **Horloges atomiques**
- ❑ Transferts de temps / fréquence
- ❑ Conclusions

# Mesure du temps avec un phénomène périodique

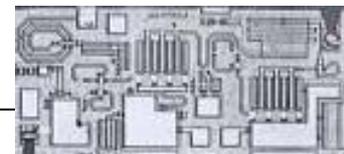
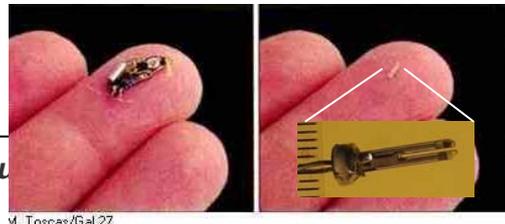
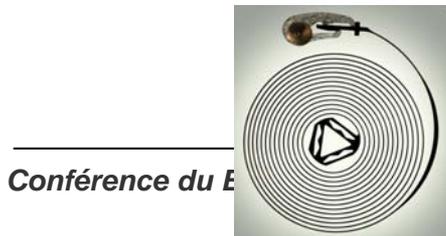
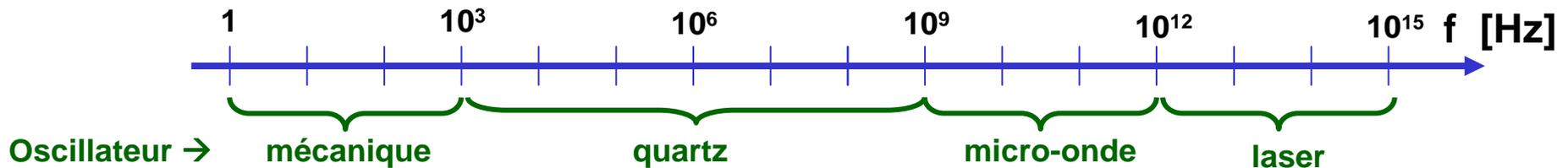
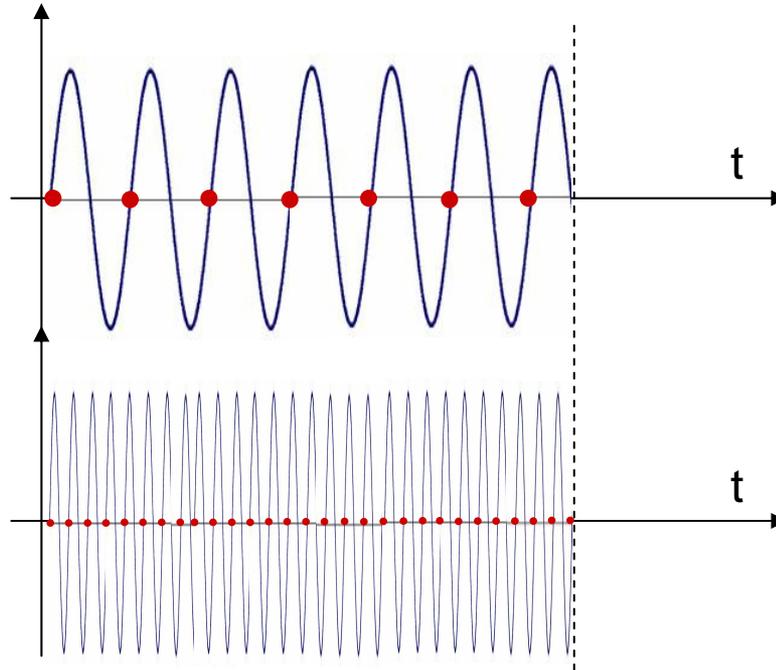
→ On mesure une durée en comptant le nombre d'oscillations



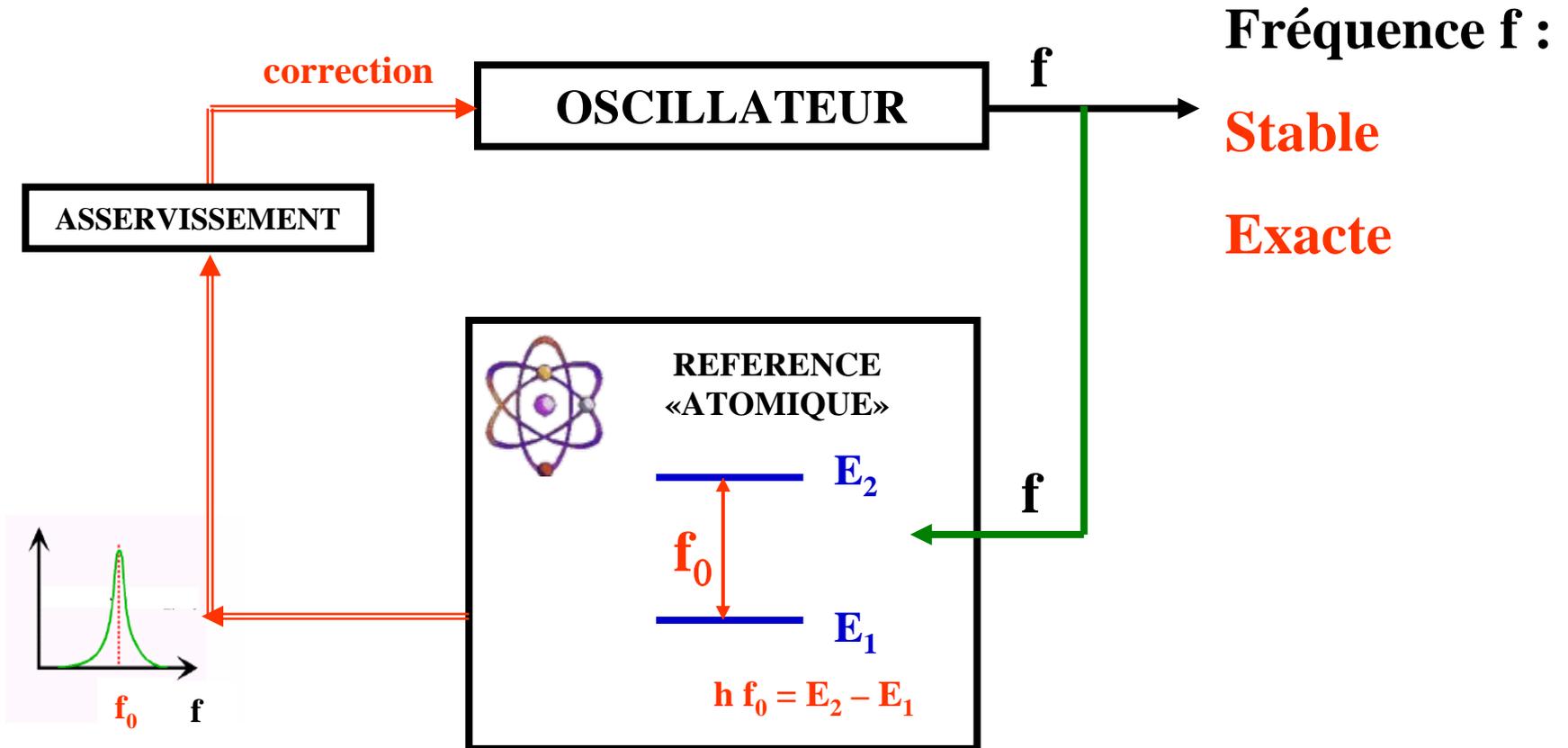
**Qualité de la mesure d'un intervalle de temps  
=  
qualité de la fréquence de l'oscillateur  
&  
nombre de périodes mesurées**

# Importance de la fréquence d'oscillation

→ Intérêt d'avoir  
une grande fréquence



# Principe de fonctionnement d'une horloge atomique



## Fréquence délivrée par l'horloge

$$f = f_0 [1 + \varepsilon + y(t)]$$

Fréquence  
délivrée par  
l'horloge

Fréquence  
de résonance  
idéale

Biais de  
fréquence

Bruit de  
fréquence

→ (in)stabilité :

Amplitude des fluctuations  $y(t)$  (caractérisée par l'écart-type  $\sigma_y(\tau)$ )

→ (in)exactitude :

Incertitude sur la valeur de  $\varepsilon$

# Stabilité de fréquence d'une horloge atomique

$$\sigma_{y-CLOCK}^2(\tau) = \sigma_{y-QUANT}^2(\tau) + \sigma_{y-"DICK"}^2(\tau) + \sigma_{y-Instrumental}^2(\tau)$$

**Limite  
quantique**

**Bruit dû à  
l'oscillateur**

**Bruits  
instrumentaux**



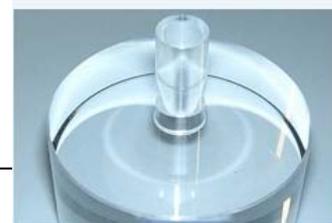
**Phénomène de repliement de spectre du bruit de fréquence de l'oscillateur (effet d'échantillonnage)**

**→ Dégradation de la stabilité de fréquence**



**Besoin de développer des oscillateurs ultrastables :**

- Oscillateurs à quartz
- Oscillateurs saphir cryogéniques
- Lasers stabilisés sur des cavités de très haute finesse



# Stabilité de fréquence - Bruit blanc de fréquence

$$\sigma_{y-QUANT}(\tau) \propto \frac{\Delta f}{f_0} \frac{1}{S/N} \sqrt{\frac{1}{N_{mesures}}}$$

**Largeur de la raie de résonance :**

$$\Delta f \propto \frac{1}{T_{observation}}$$

- Atomes froids
- Piégeage

**Fréquence de résonance :**

- Augmenter la fréquence (horloges optiques)

**Nombres de mesures élémentaires**

**Rapport Signal/Bruit (dans une bande de  $1/T_{cycle}$ ) :**

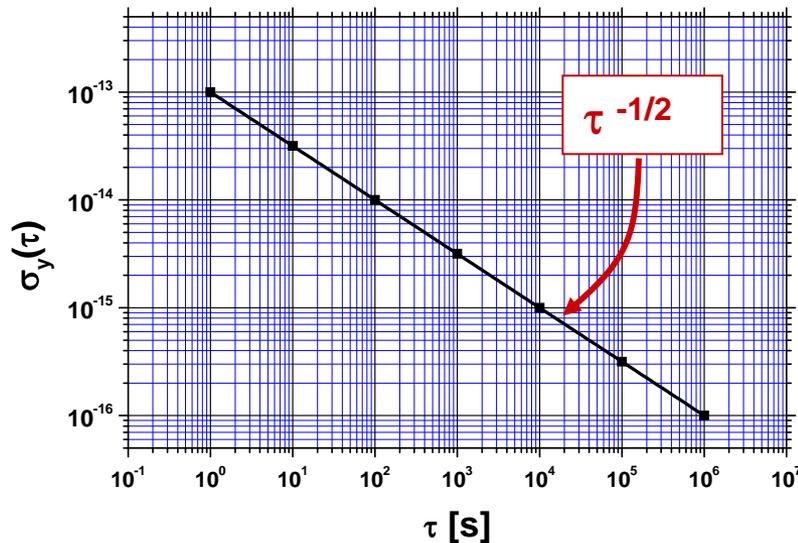
- Chasse au bruit !
- Limite quantique :

$$S/B \propto \sqrt{\text{nbre d'atomes}}$$

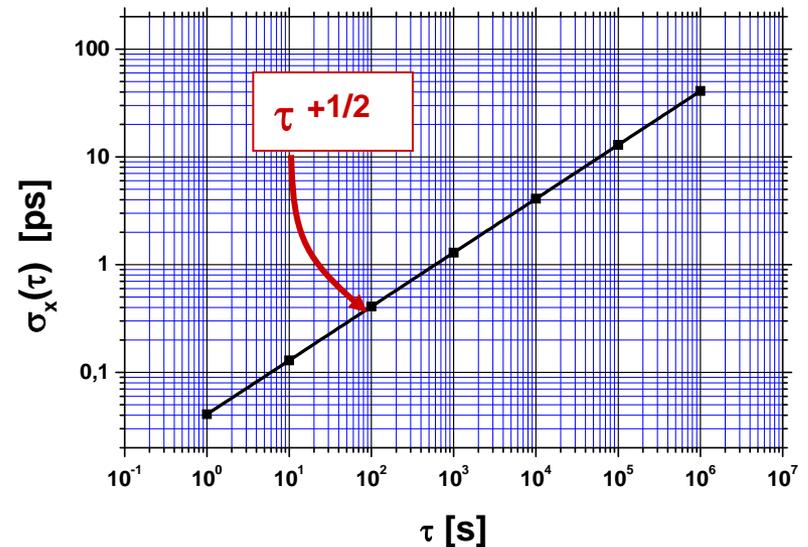
# Stabilité de fréquence et stabilité en temps

$$y = \frac{dx}{dt}$$

Stabilité en fréquence  $\sigma_y(\tau)$



Stabilité en temps  $\sigma_x(\tau)$



→ L'exactitude et la stabilité long-terme sont limitées par les effets systématiques

# Effets systématiques



**Les effets systématiques influencent la stabilité à long terme (contrôle insuffisant) et l'exactitude de l'horloge (connaissance insuffisante)**

## → Déplacements de fréquence intrinsèques à l'horloge :

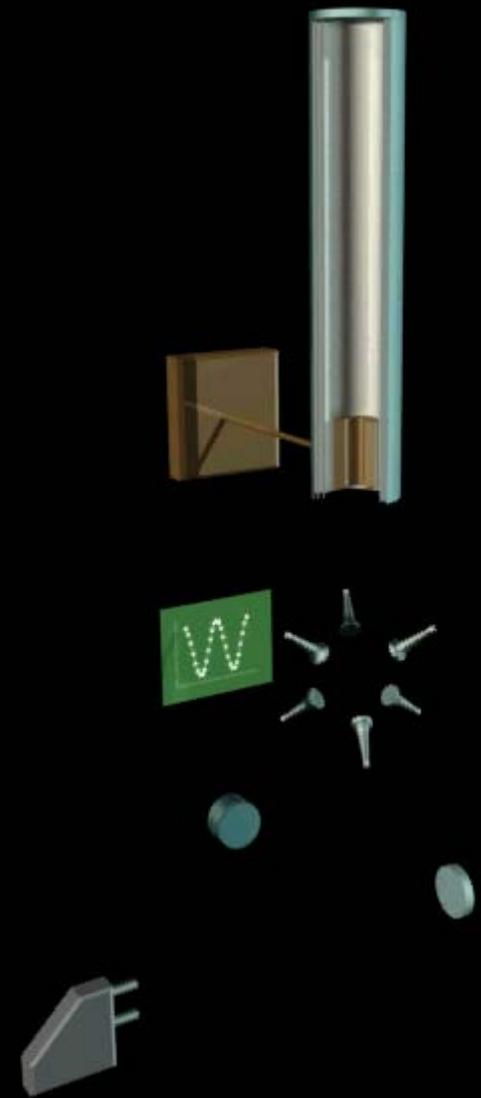
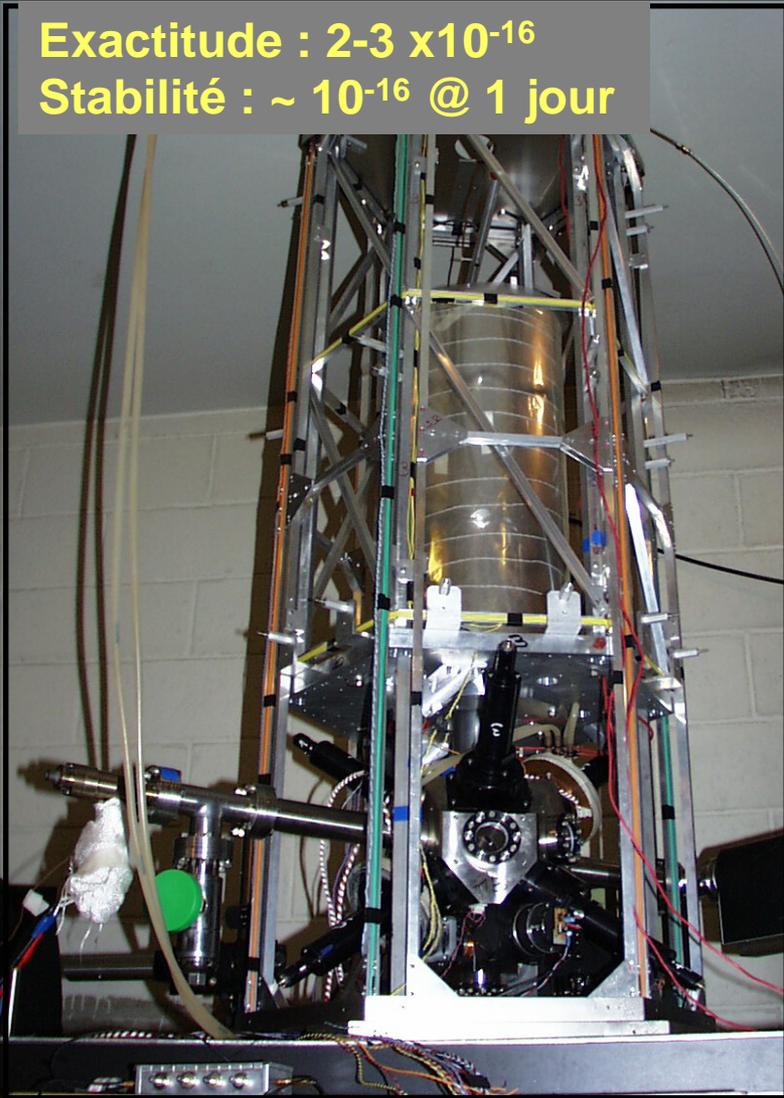
- **Effet Doppler (1er ordre, 2nd ordre, effet de recul)**
- **Champs électromagnétiques externes (environnement, champs de piégeage, rayonnement du corps noir)**
- **Collisions**
- **Effets instrumentaux (électronique, câbles, ...)**

## + **Effets relativistes**

**(apparaissant lorsqu'on compare les fréquences de 2 horloges dans des référentiels différents)**

# Les meilleures horloges micro-ondes : les fontaines à atomes froids

Exactitude :  $2-3 \times 10^{-16}$   
Stabilité :  $\sim 10^{-16}$  @ 1 jour



# Bilan d'exactitude

Estimation des biais de fréquence dépendant de paramètre(s) et extrapolation à « effet nul »

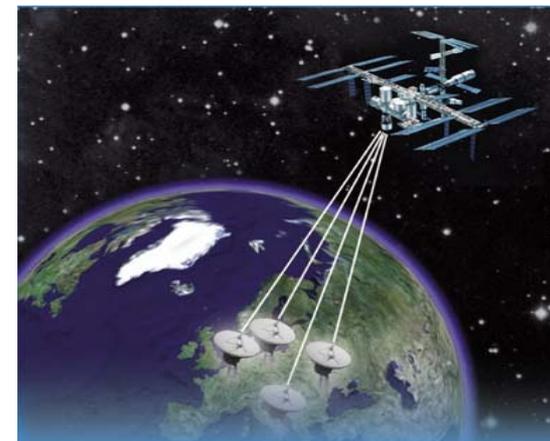
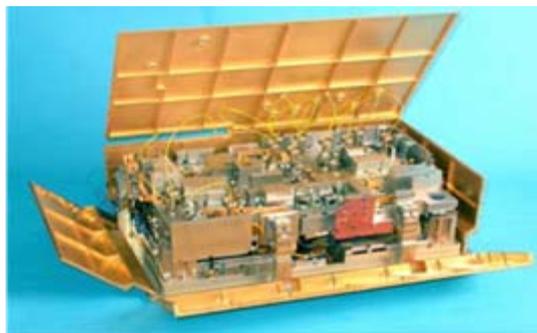
**Incertitude soit sur la mesure du paramètre soit sur la « précision » du modèle / calcul**

| Effets systématiques   | Offset relatif<br>(x 10 <sup>-16</sup> ) | Incertitude<br>relative (x 10 <sup>-16</sup> ) |
|--|--|--|
| Effet Zeeman du 2 <sup>nd</sup> ordre                                | 1920.4                                   | 0.1  |
| Rayonnement Corps Noir   | -168.7                                   | 0.6  |
| Collisions + <u>pulling</u> cavité                                   | -129.3                                   | 1.3  |
| Effet Doppler résiduel   | 0.0                                      | 3.0  |
| Recul  | 0.0                                      | 1.4  |
| <u>Coupl. rés. autres</u><br>transitions                             | 0.0                                      | 0.1  |
| Fuites micro-ondes, pureté<br>spectrale, perturbations<br>synchrones | 0.0                                      | 0.5  |
| Collisions avec le gaz<br>résiduel                                   | 0.0                                      | 0.5  |
| <b>Total</b>   |  | <b>3.8</b>                                     |

# Le futur des horloges micro-ondes

## → Fonctionnement dans l'espace en microgravité :

ACES/PHARAO (2015 sur ISS), STE-QUEST (Cosmic Vision, en 2023 ?)

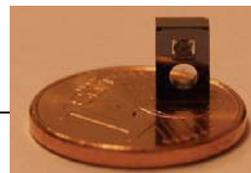
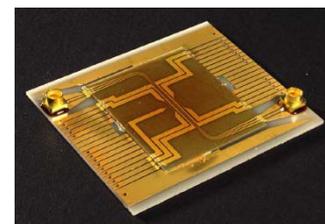


## → Horloges sur puces avec des atomes piégés

Temps de cohérence record

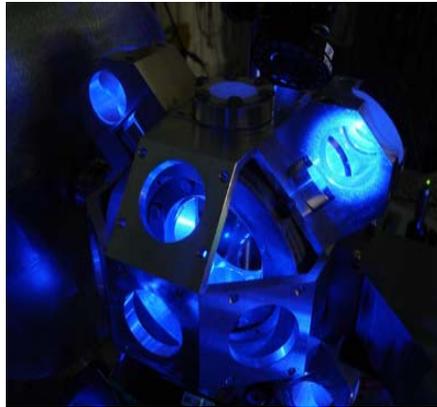
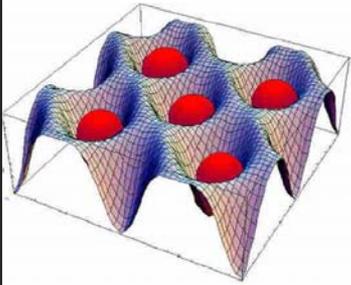
Possibilité d'utiliser des condensats de Bose-Einstein

## → Horloges miniaturisées pour les GNSS (horloges spatiales ou intégrées dans les récepteurs)



# Au-delà des horloges micro-ondes : les horloges optiques

## Horloges à réseaux optiques d'atomes neutres



- ☺ Nbre important d'atomes (S/B)
- ☹ Contrôle du déplacement dû au piégeage optique (→ longueur d'onde magique)

## Horloges à ions



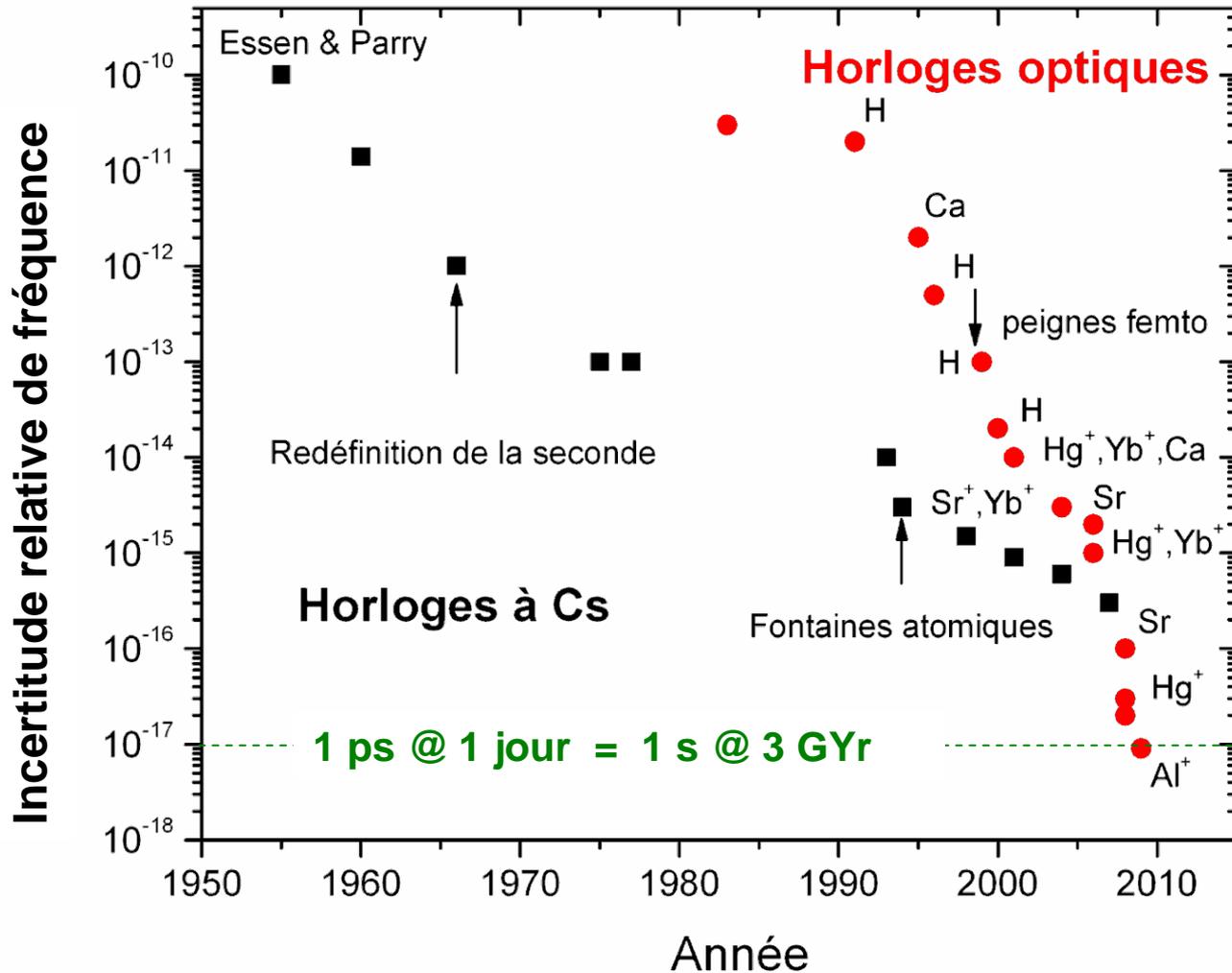
- ☹ Petit nombre d'ion(s) (S/B faible)
- ☺ Bon contrôle des champs piégeants et de l'environnement



+ Mesures très précises des fréquences optiques avec des peignes laser fs



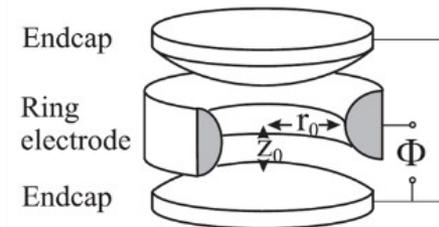
# Evolution des performances



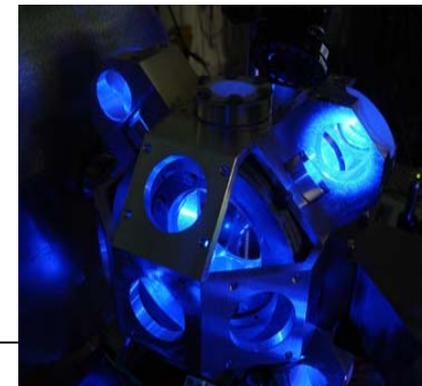
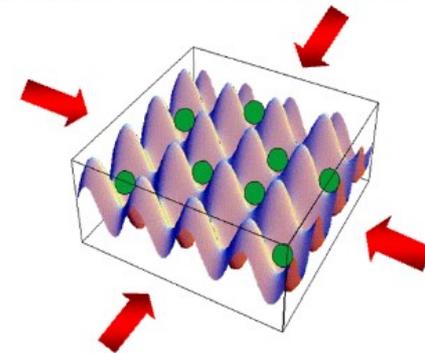
# Les meilleures horloges optiques

| Ion / Atom                       | Clock transition                      | $\lambda$ nm | Estimated sys. Freq. uncert. |
|----------------------------------|---------------------------------------|--------------|------------------------------|
| $^{27}\text{Al}^+$ ion           | $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$         | 267          | $9 \times 10^{-18}$          |
| $^{199}\text{Hg}^+$ ion          | $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ | 282          | $2 \times 10^{-17}$          |
| $^{87}\text{Sr}$ in lattice      | $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$         | 698          | $1.6 \times 10^{-16}$        |
| $^{171}\text{Yb}$ in lattice     | $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$         | 578          | $3.4 \times 10^{-16}$        |
| $^{171}\text{Yb}^+$ ion          | $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ | 436          | $4.5 \times 10^{-16}$        |
| $^{40}\text{Ca}^+$ ion           | $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ | 729          | $2.4 \times 10^{-15}$        |
| $^{88}\text{Sr}^+$ ion           | $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ | 674          | $3.8 \times 10^{-15}$        |
| $^{40}\text{Ca}$ atom            | $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$         | 657          | $7.5 \times 10^{-15}$        |
| $^{171}\text{Yb}^+$ ion          | $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{F}_{7/2}$ | 467          | $1.8 \times 10^{-14}$        |
| $^{115}\text{In}^+$ ion          | $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$         | 237          | $1.8 \times 10^{-13}$        |
| $^{199,201}\text{Hg}$ in lattice | $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$         | 266          |                              |

Single ion clock



Neutral atom lattice clock



# Le futur des horloges optiques

## → Horloges optiques dans l'espace :

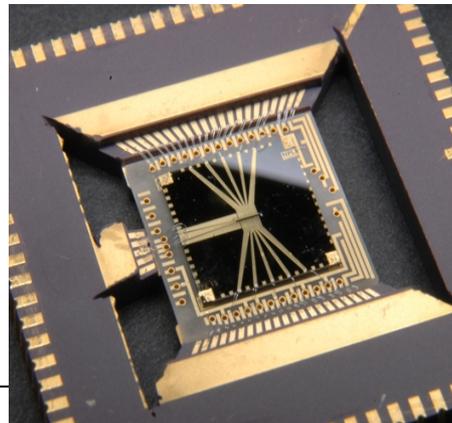
Meilleur contrôle de l'environnement, des vibrations

Connaissance du potentiel de gravitation ( $10^{-18}$  → 1 cm)

## → Transitions nucléaires ( $^{229}\text{Th}$ @ 160 nm):

Meilleure immunité aux champs e-m externes

Intérêt de ces transitions pour les tests de physique fondamentale



# HORLOGES ATOMIQUES ET TRANSFERTS DE TEMPS ULTRASTABLES

- Introduction – Besoins de hautes performances
- Horloges atomiques
- Transferts de temps / fréquence**
- Conclusions

# Transfert de temps et/ou de fréquence

## Deux types de transferts entre horloges distantes :

### ❑ **Transfert de fréquence (syntonisation)**

Comparaisons de fréquence, tests de physique fondamentale, étalonnage en fréquence des échelles de temps atomique, géodésie relativiste, etc...)

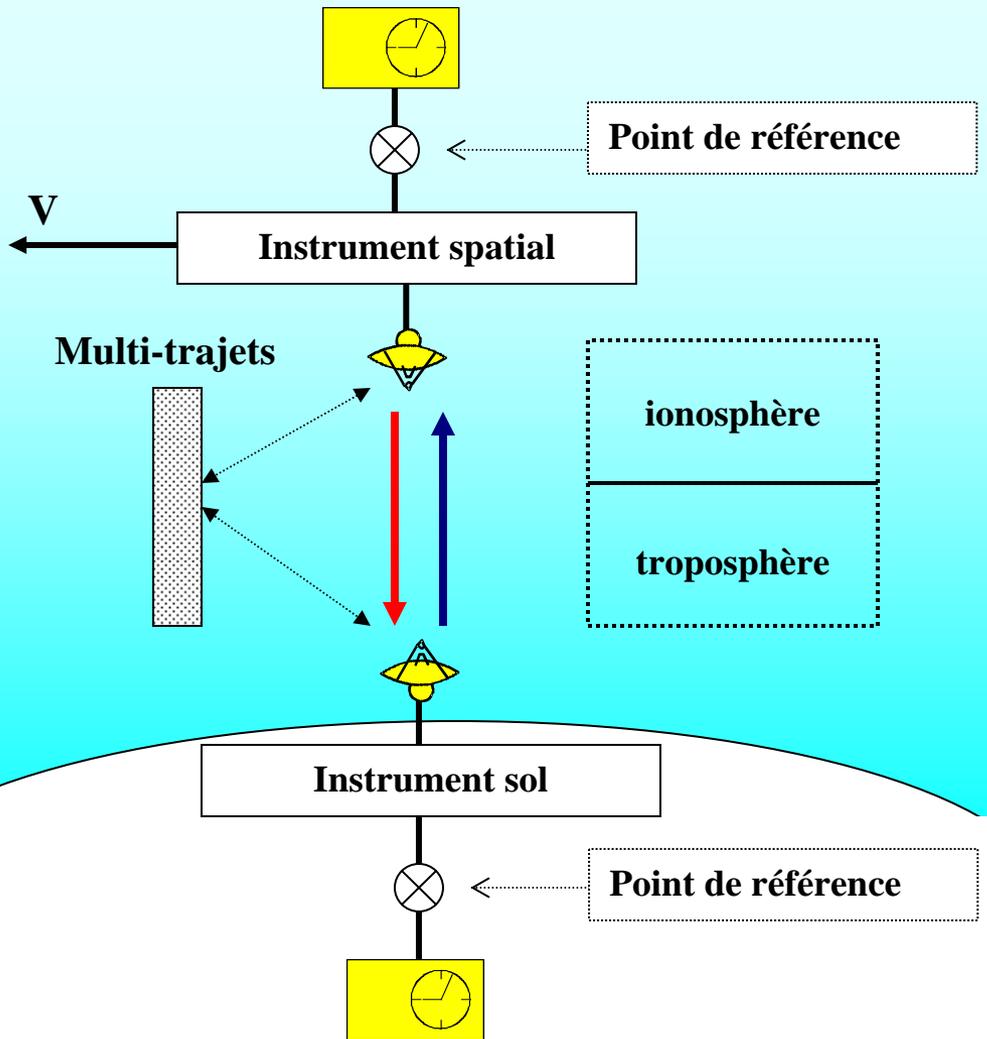
→ repose sur la stabilité en temps du lien

### ❑ **Transfert de temps (synchronisation)**

(construction d'échelles de temps atomique, télémétrie une voie, etc...)

→ repose sur la stabilité en temps du lien et sur la calibration absolue des délais (« exactitude en temps »)

# Effets affectant le transfert de T / F



**Retard troposphérique** (température, humidité)

**Décalage ionosphérique** (contenu électronique total, varie comme  $1/f^2$ )

**Multi-trajets** (distance et réflectivité des réflecteurs parasites)

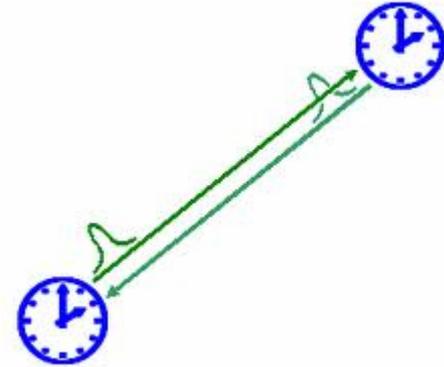
**Effets instrumentaux** (amplitude et fréquence des signaux, effets géométriques d'antennes, ...)

**Effets relativistes : effet Doppler du 1er & 2nd ordre, effet Sagnac, décalage gravitationnel** (positions et vitesses relatives des horloges)

# Types de mesures

## ❑ Signaux pulsés

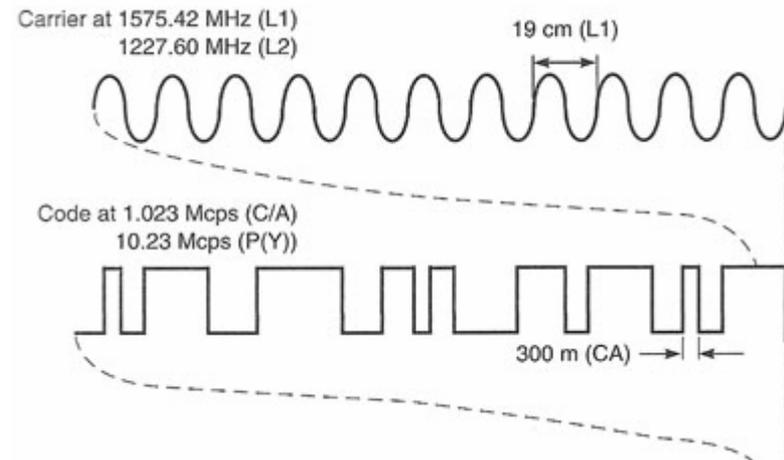
→ Datation des instants d'émission et de réception d'impulsions



## ❑ Signaux continus

→ Mesure du déphasage / différence de fréquence entre la porteuse reçue et le signal de référence local

→ Mesure du déphasage entre le code pseudo aléatoire reçu et le code local



# Comment améliorer les performances d'un transfert de temps

## Stabilité en temps :

- ❑ **Mesure plus précise de la différence de phase :**
  - augmentation de la fréquence de la porteuse
  - augmentation de la fréquence du code pseudo-aléatoire
  
- ❑ **Correction des fluctuations des retards de propagation (distance géométrique, troposphère, ionosphère) :**
  - très bonne connaissance des positions des deux horloges (orbitographie)
  - configuration « 2 voies » (aller-retour)
  - modèle atmosphérique plus précis
  - fonctionnement multi-fréquences pour la détermination du contenu électronique total

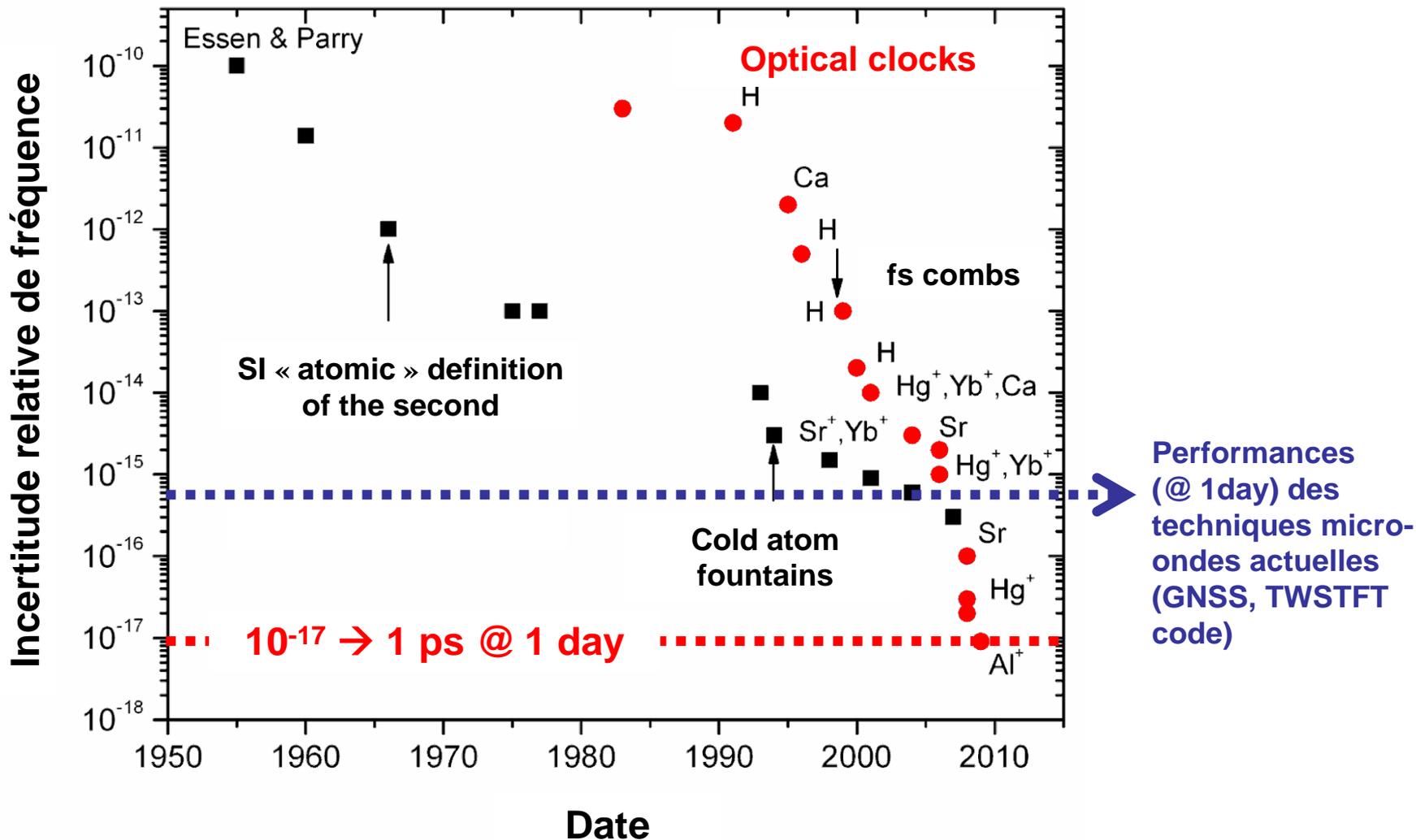
## « Exactitude » en temps :

- ❑ **Meilleure calibration des délais de propagation :**
  - modèle atmosphérique plus précis
  - meilleure calibration instrumentale, stations transportables

# Transferts T/F avec des porteuses micro-ondes

| Technique                                       |  | Performance   | Commentaires   |
|---|--|---|--|
| <b>GNSS</b>                                     | 1 voie<br>Multi-fréq.<br><b>1 GHz</b><br>1 MChip/s   | Bruit en temps < 100 ps<br>Comparaison de fréq. < $10^{-15}$ @ 1 j<br>« Exactitude » en temps : qq ns | Gain avec les combinaisons GPS, GALILEO, etc...                |
| <b>TWSTFT</b><br>« code »<br>(satellite<br>géo) | 2 voies<br>Mono-fréq.<br><b>10 GHz</b><br>10 MChip/s | Time noise < 100 ps<br>Comparaison de fréq. < $10^{-15}$ @ 1 j<br>« Exactitude » en temps : 1 ns      | Uniquement pour les comparaisons d'horloges sol en vue commune |

# Performances des transferts / horloges

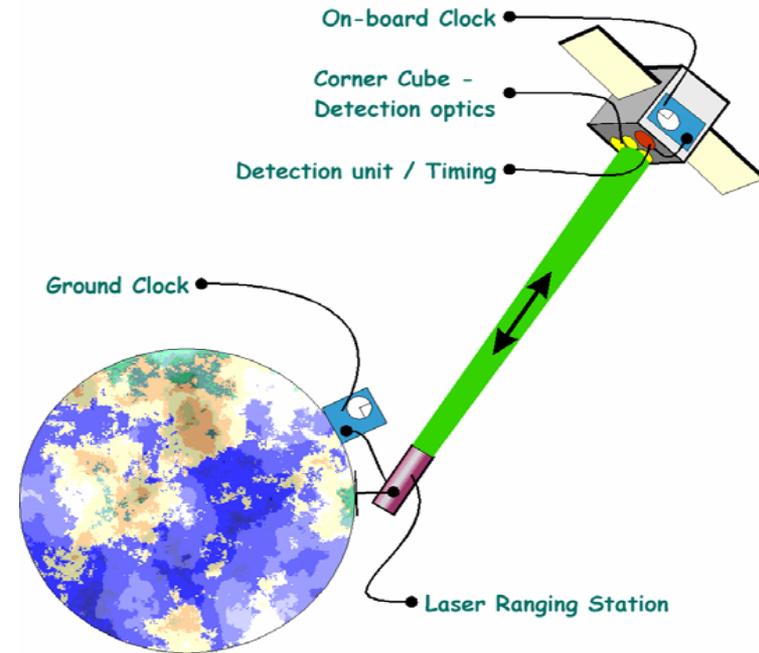


# Transferts T/F avec des porteuses micro-ondes

| Technique  |   | Performance   | Commentaires   |
|--|---|---|--|
| <b>GNSS</b>  | 1 voie<br>Multi-fréq.<br><b>1 GHz</b><br><b>1 MChip/s</b>     | Bruit en temps < 100 ps<br>Comparaison de fréq. < $10^{-15}$ @ 1 j<br>« Exactitude » en temps : qq ns | Gain avec les combinaisons<br>GPS, GALILEO, etc...   |
| <b>TWSTFT</b><br>« code »<br>(satellite<br>géo)                      | 2 voies<br>Mono-fréq.<br><b>10 GHz</b><br><b>10 MChip/s</b>   | Time noise < 100 ps<br>Comparaison de fréq. < $10^{-15}$ @ 1 j<br>« Exactitude » en temps : 1 ns      | Uniquement pour les<br>comparaisons d'horloges sol<br>en vue commune   |
| <b>TWSTFT</b><br>« phase »<br>(satellite<br>géo)                     | 2 voies<br>Mono-fréq.<br><b>10 GHz</b><br><b>10 MChip/s</b>   | Bruit en temps : 1 ps<br>Compar. de fréq ~ qq $10^{-17}$ @ 1 j<br>« Exactitude » en temps < 1 ns      | Uniquement pour les<br>comparaisons d'horloges sol<br>en vues communes   |
| <b>ACES / MWL</b><br>(on ISS)<br>(2 voies ;<br>Multi-<br>fréquences) | 2 voies<br>Multi-fréq.<br><b>10 GHz</b><br><b>100 MChip/s</b> | Bruit en temps < 1 ps<br>Compar. de fréq ~ qq $10^{-17}$ @ 1 j<br>« Exactitude » en temps ~ 100 ps    | Comparaisons d'horloges sol<br>en vues communes et non-<br>communes (vol sur ISS à<br>partir de 2015)<br>Seul lien 2 voie permettant de<br>déterminer le CET |

# Liens optiques pulsés (T2L2 sur Jason 2 et ELT pour ACES sur ISS)

- Lien laser pulsé 2 voies
- Datation des impulsions au sol et dans l'espace
- Stabilité en temps  $\sim 1$  ps
- Exactitude en temps  $< 100$  ps
- Comparaisons de fontaines à atomes froids en vue commune entre l'OP et l'OCA



# Liens optiques cohérents → Propagation libre

- Lien laser continu 2 voies
- Mesure de la phase de la porteuse optique (300 THz) à chaque extrémité
- Stabilité en temps ~ 10 - 100 fs
- Comparaisons de fréq. ~  $10^{-17}$  @ 1000s,  $10^{-18}$  @ 1day
- Exactitude en temps : ???



Problèmes des techniques optiques en propagation libre :

- Requièrent des stations laser spécifiques
- Ne fonctionnent pas par tous les temps

# Liens optiques cohérents

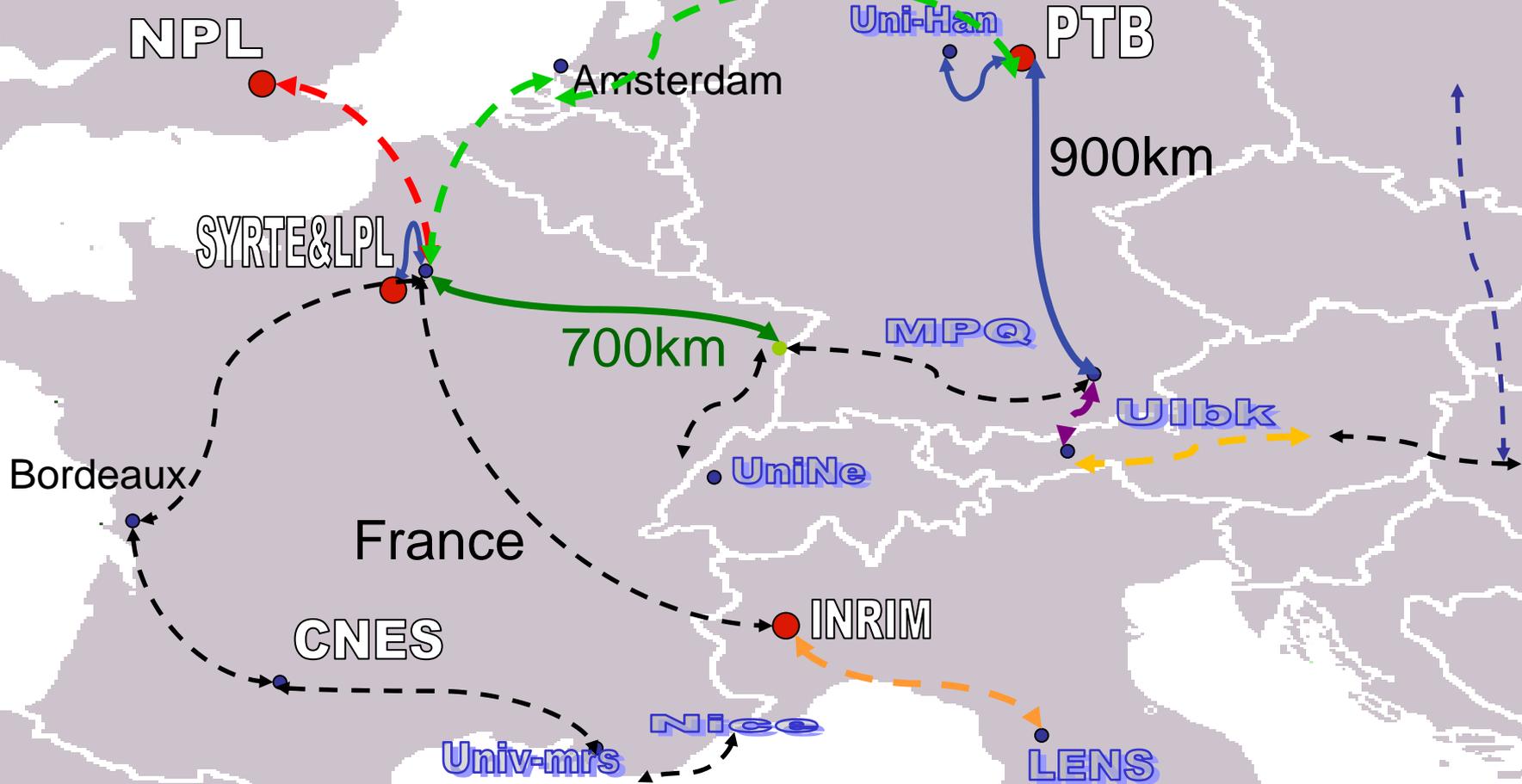
## → Propagation guidée dans une fibre

- Lien laser continu 2 voies
- **Mesure de la phase de la porteuse optique (200 THz) à chaque extrémité**
- **Utilisation d'une fibre dédiée ou d'un canal dédié d'un réseau internet existant comme RENATER → Solution développée en France et déploiement national grâce à l'équipement d'excellence REFIMEVE**
- **Stabilité en temps ~ 10 - 100 fs**
- **Comparaisons de fréq. ~  $10^{-18}$  @  $10^4$  s ;  $10^{-19}$  @ 1day for ~ 500 km**
- **Exactitude en temps : qqs centaines de ps (préliminaire)**

# Développements de liens fibrés

- **JILA-NIST (USA) : optical carrier phase, frequency comb transfer**
- **SYRTE - LPL (Fr) microwave, optical carrier phase**
- **PTB-MPQ-Hanover (Germany) 900 km optical phase**
- **NICT, NMIJ, UT (Japan) optical carrier phase & microwave**
- **NPL (GB) frequency comb, optical carrier phase**
- **NIM, SIOM Shanghai (China) microwave optical link**
- **INRIM (Italy) optical carrier phase**
- **UWA,NMI (Australia) optical carrier phase & microwave**
- **Poland-Germany fibre link**

# Vers un réseau fibré métrologique en Europe ?



# HORLOGES ATOMIQUES ET TRANSFERTS DE TEMPS ULTRASTABLES

- Introduction – Besoins de hautes performances
- Horloges atomiques
- Transferts de temps / fréquence
- Conclusions**

# Conclusions

→ Améliorations très rapides des horloges atomiques : grâce aux méthodes optiques, des incertitudes de fréquences au niveau de  $10^{-18}$  devraient être atteintes au cours de la prochaine décennie

→ Bonne complémentarité et synergie entre les développements pour les applications sol et spatiales

→ Développements en parallèle de nouveaux concepts instrumentaux (sous-systèmes ou instruments dérivés, ...) utilisés pour d'autres applications (détection des ondes de gravitation, capteurs inertiels, géophysique, ...)

→ **Besoin de poursuivre les efforts de développements et déploiement de techniques de transfert de T/F pour atteindre des bruits sub-pico-seconde ( $10^{-18}$  en fréquence) en combinant des méthodes optiques / micro-onde en propagation libre / guidée avec des applications variées : comparaisons d'horloges sol et/ou spatiales, vols en formation, constellations GNSS autonomes.**