

# **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**

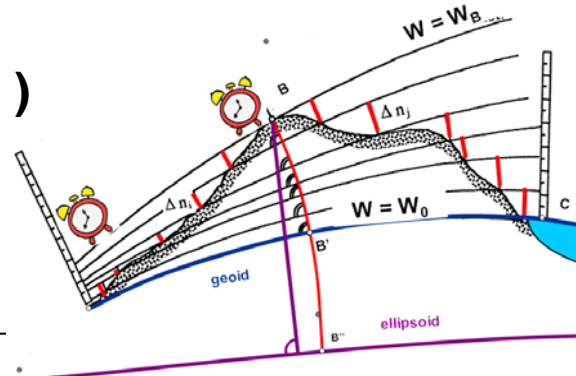
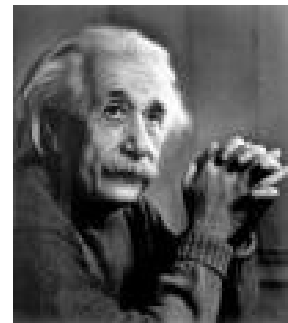
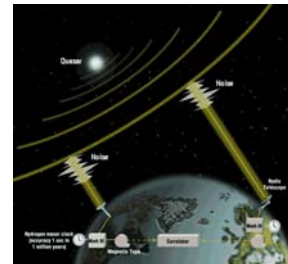
# HORLOGES ATOMIQUES ET TRANSFERTS DE TEMPS ULTRASTABLES

- ☐ **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)**



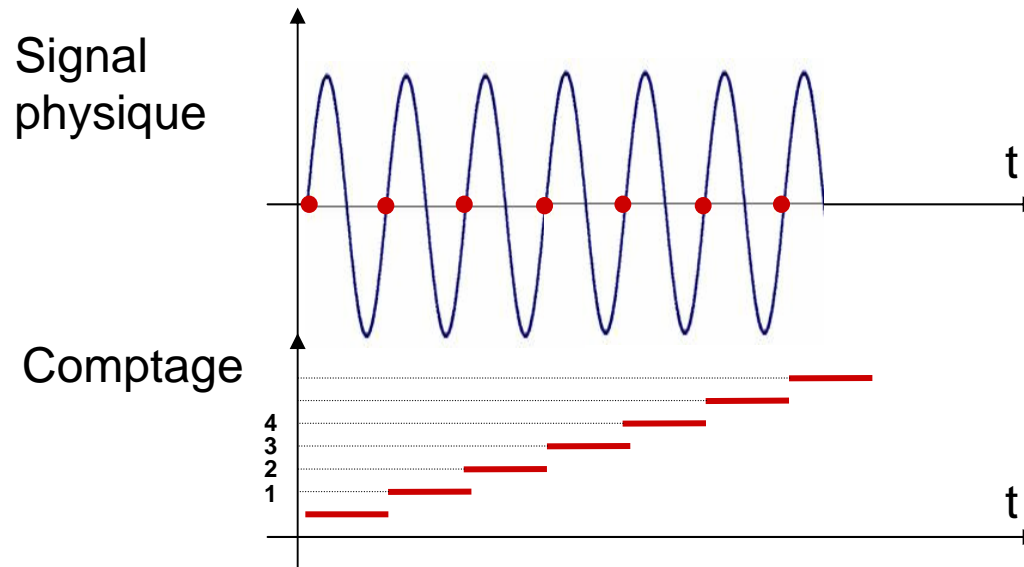


# HORLOGES ATOMIQUES ET TRANSFERTS DE TEMPS ULTRASTABLES

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

# Mesure du temps avec un phénomène périodique

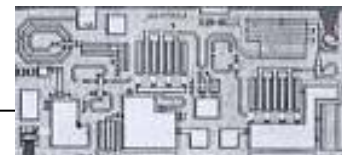
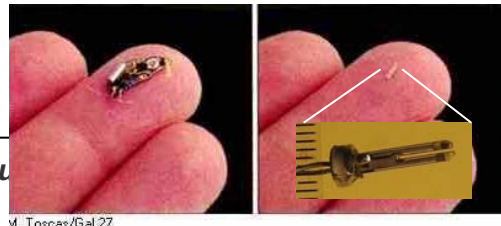
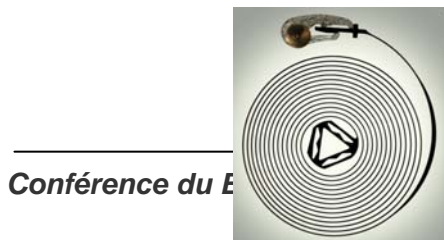
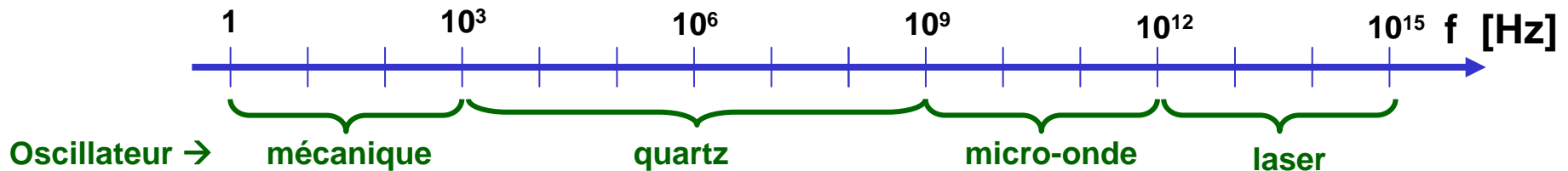
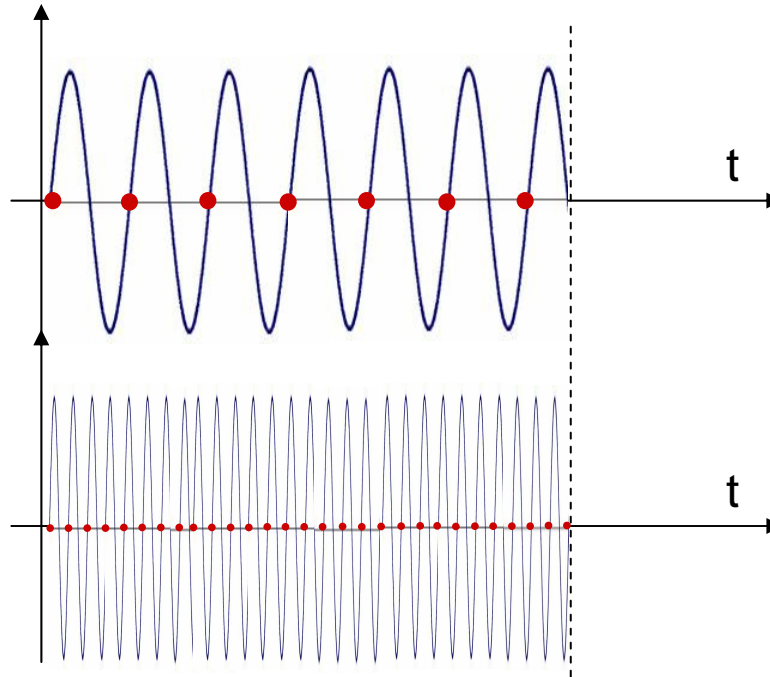
→ On mesure une durée en comptant le nombre d'oscillations



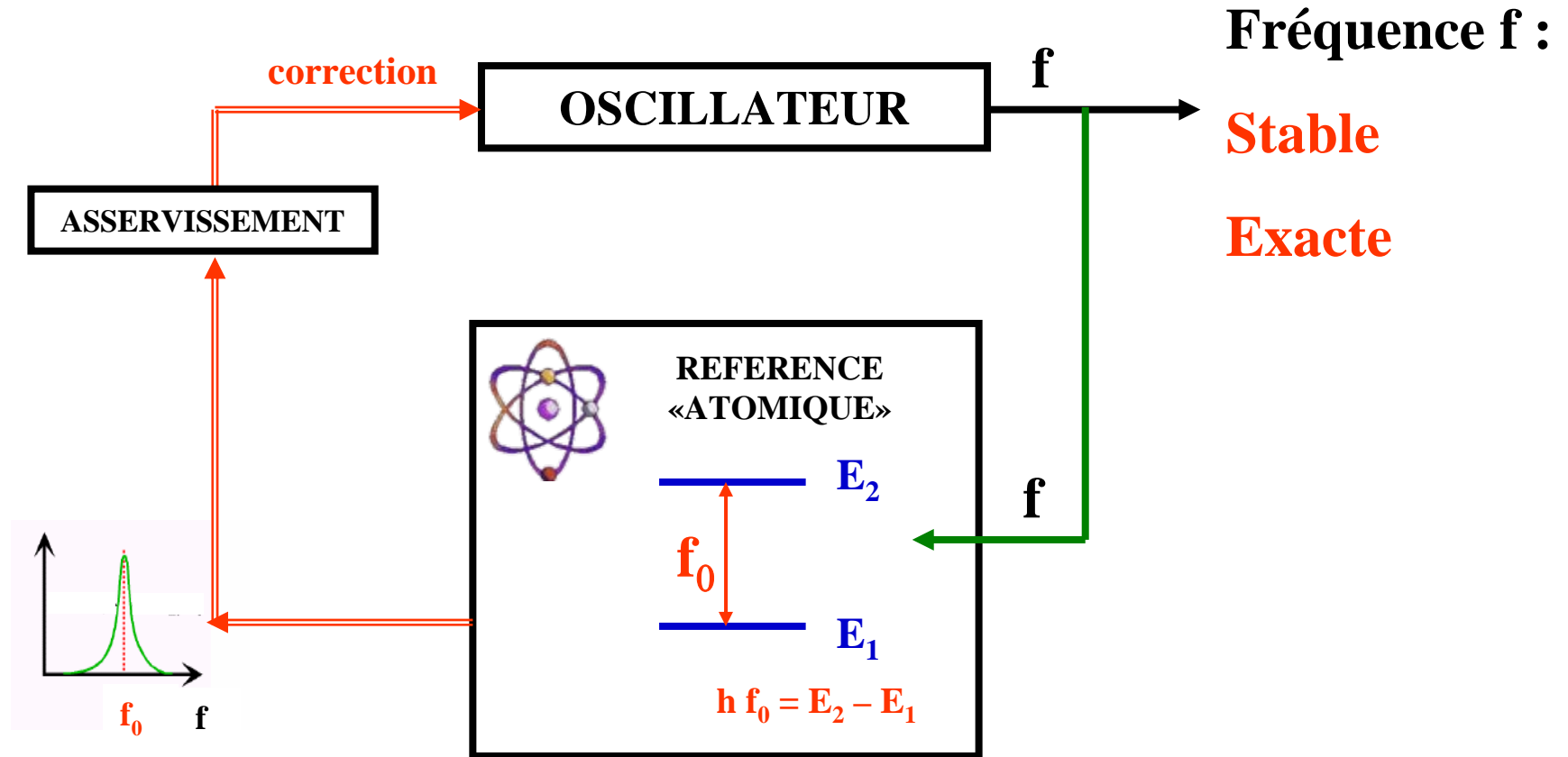
**Qualité de la mesure d'un intervalle de temps  
=  
qualité de la fréquence de l'oscillateur  
&  
nombre de périodes mesurées**

# 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**



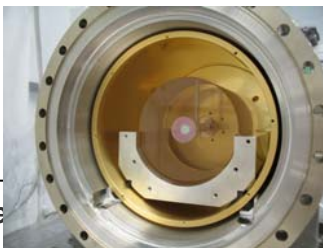
**Phénomène de repliement de spectre du bruit de fréquence de l'oscillateur (effet d'échantillonnage)**

**→ 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 :**

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

→ 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 !

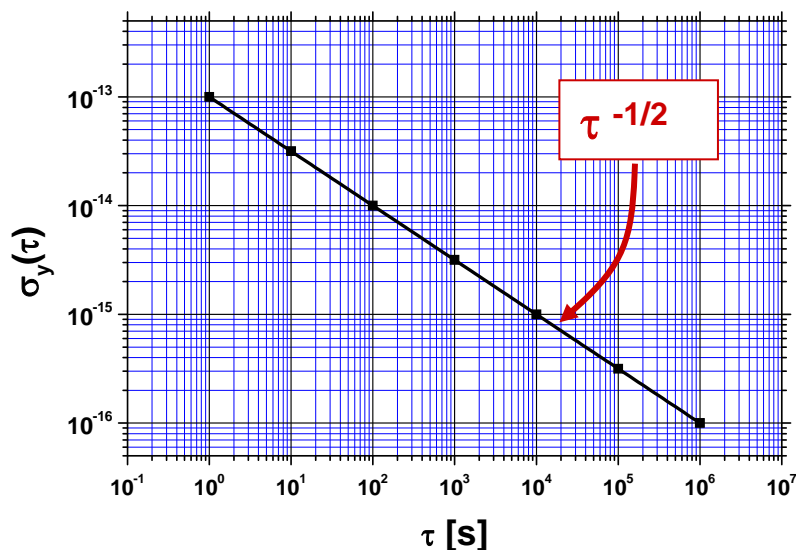
→ Limite quantique :

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

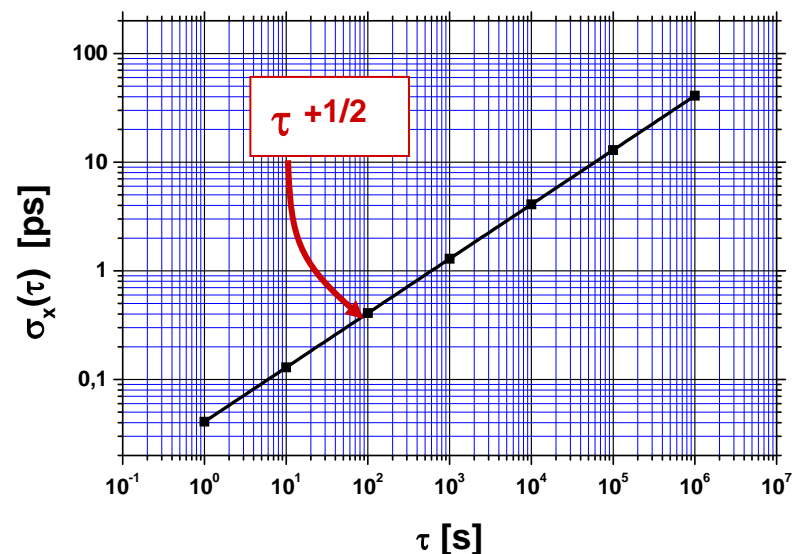
# Stabilité de fréquence et stabilité en temps

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

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 :

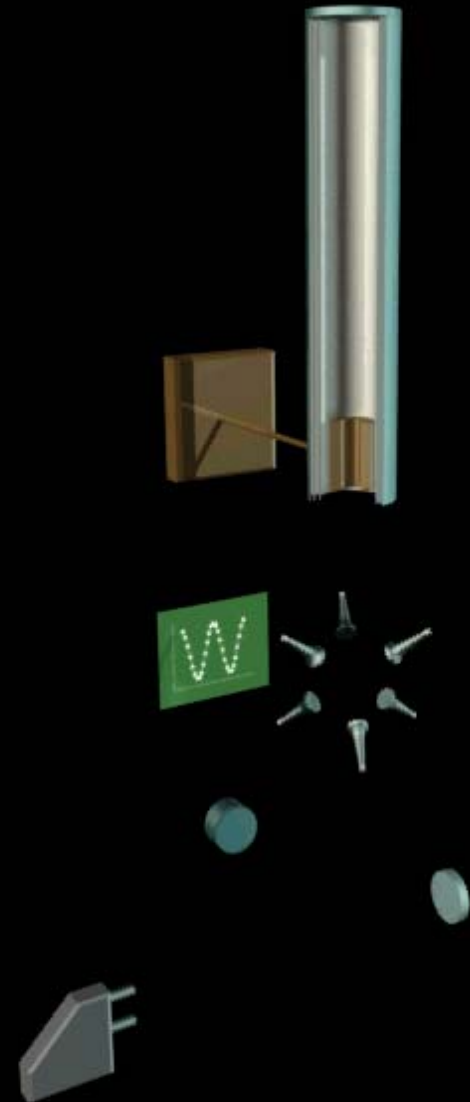
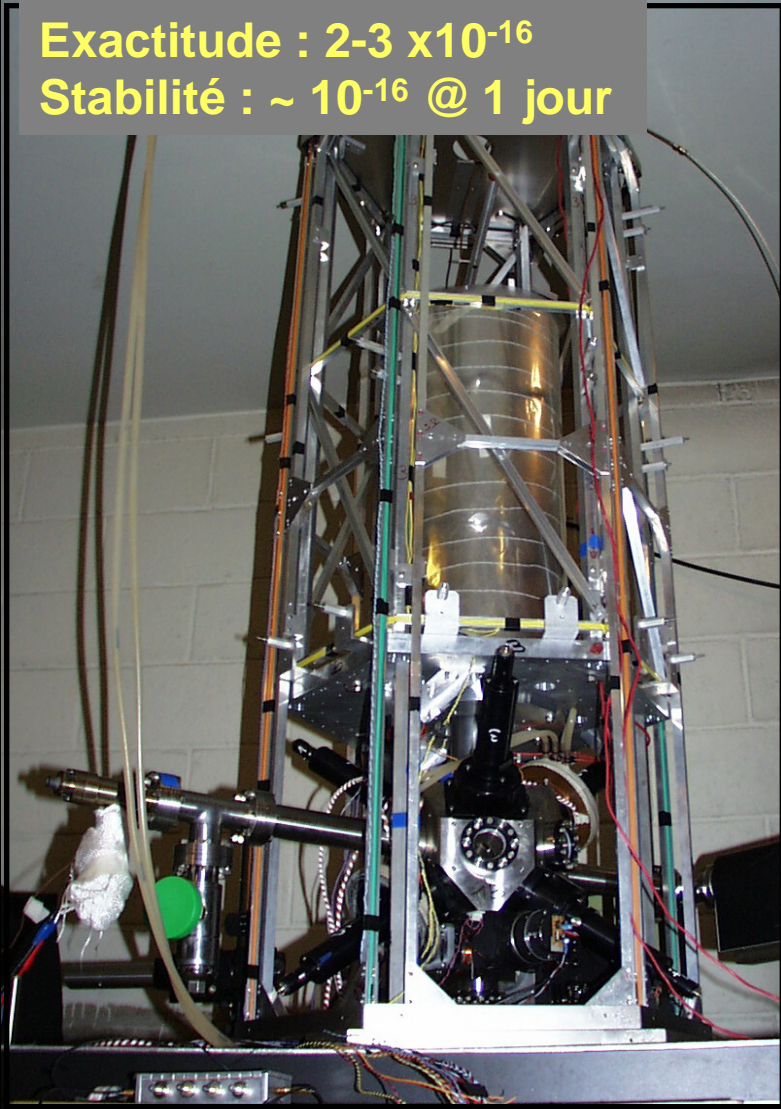
- Effet Doppler (1er ordre, 2nd ordre, effet de recul)
- Champs électromagnétiques externes (environnement, champs de piégeage, rayonnement du corps noir)
- Collisions
- Effets instrumentaux (électronique, câbles, ...)

## + 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 »

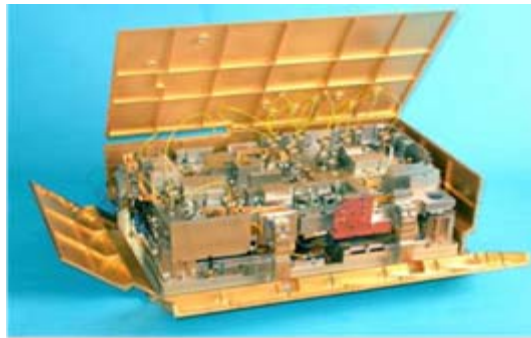
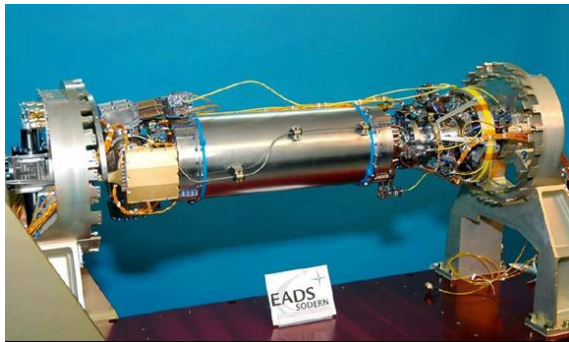
**Incertitude soit sur la mesure du paramètre soit sur la « précision » du modèle / calcul**

Effets systématiques	Offset relatif ( $\times 10^{-16}$ )	Incertitude relative ( $\times 10^{-16}$ )
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.</u> rés. autres transitions	0.0	0.1
Fuites micro-ondes, pureté spectrale, perturbations synchrones	0.0	0.5
Collisions avec le gaz résiduel	0.0	0.5
<b>Total</b>		<b>3.8</b>

# Le futur des horloges micro-ondes

## → Fonctionnement dans l'espace en microgravité :

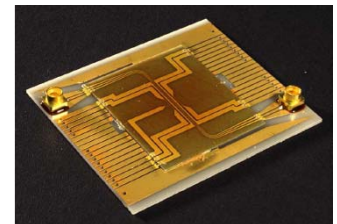
ACES/PHARAO (2015 sur ISS), STE-QUEST (Cosmic Vision, en 2023 ?)



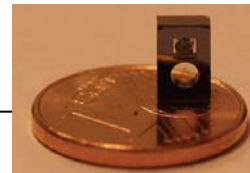
## → Horloges sur puces avec des atomes piégés

Temps de cohérence record

Possibilité d'utiliser des condensats de Bose-Einstein

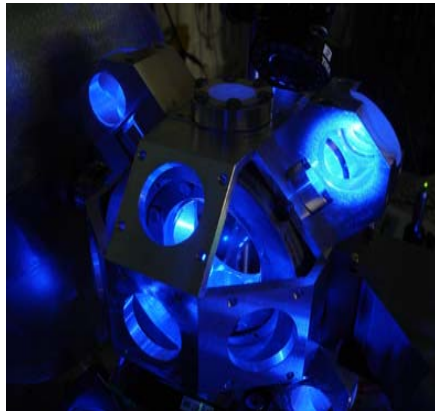
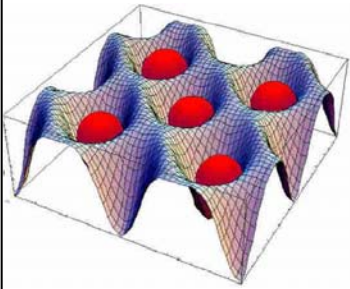


## → Horloges miniaturisées pour les GNSS (horloges spatiales ou intégrées dans les récepteurs)



# 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

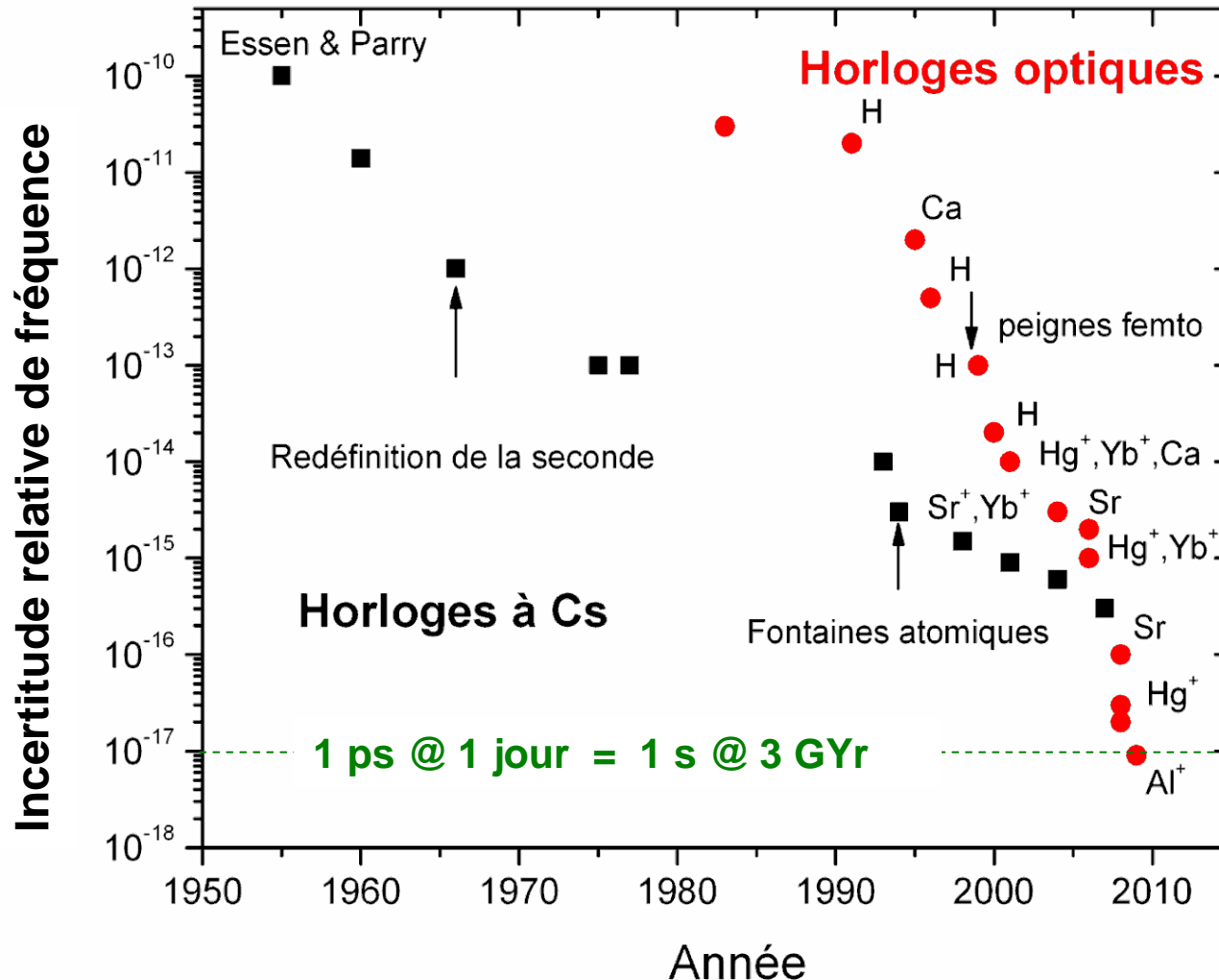


+ Mesures très précises des fréquences optiques avec des peignes laser fs





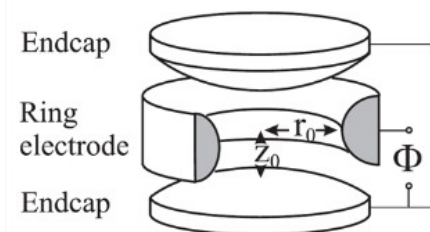
# Evolution des performances



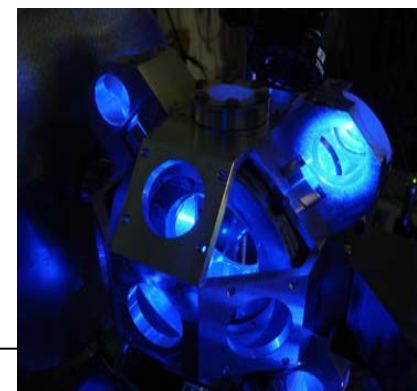
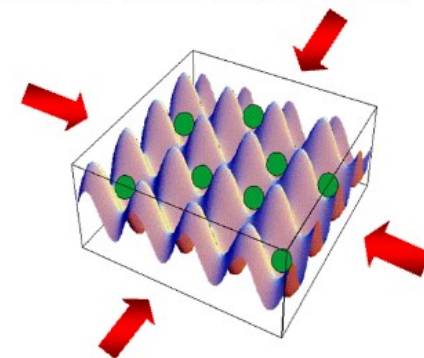
# Les meilleures horloges optiques

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 :

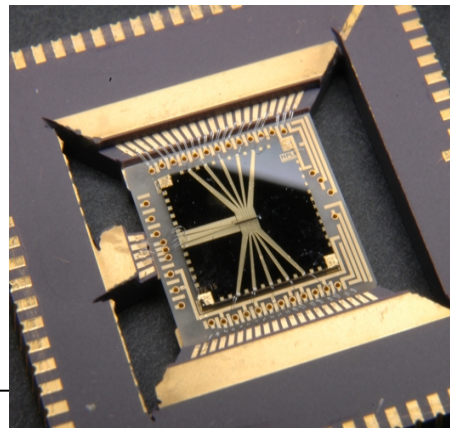
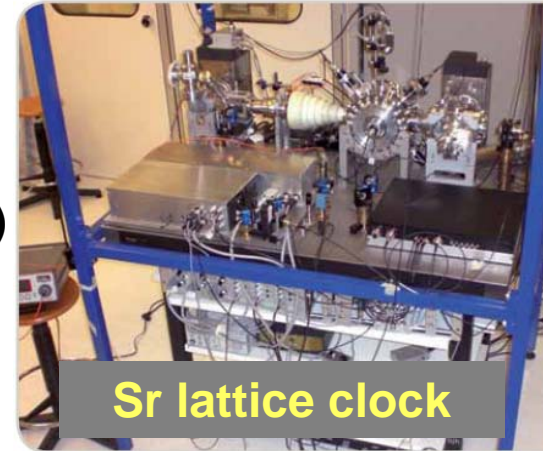
Meilleur contrôle de l'environnement, des vibrations

Connaissance du potentiel de gravitation ( $10^{-18} \rightarrow 1$  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...)

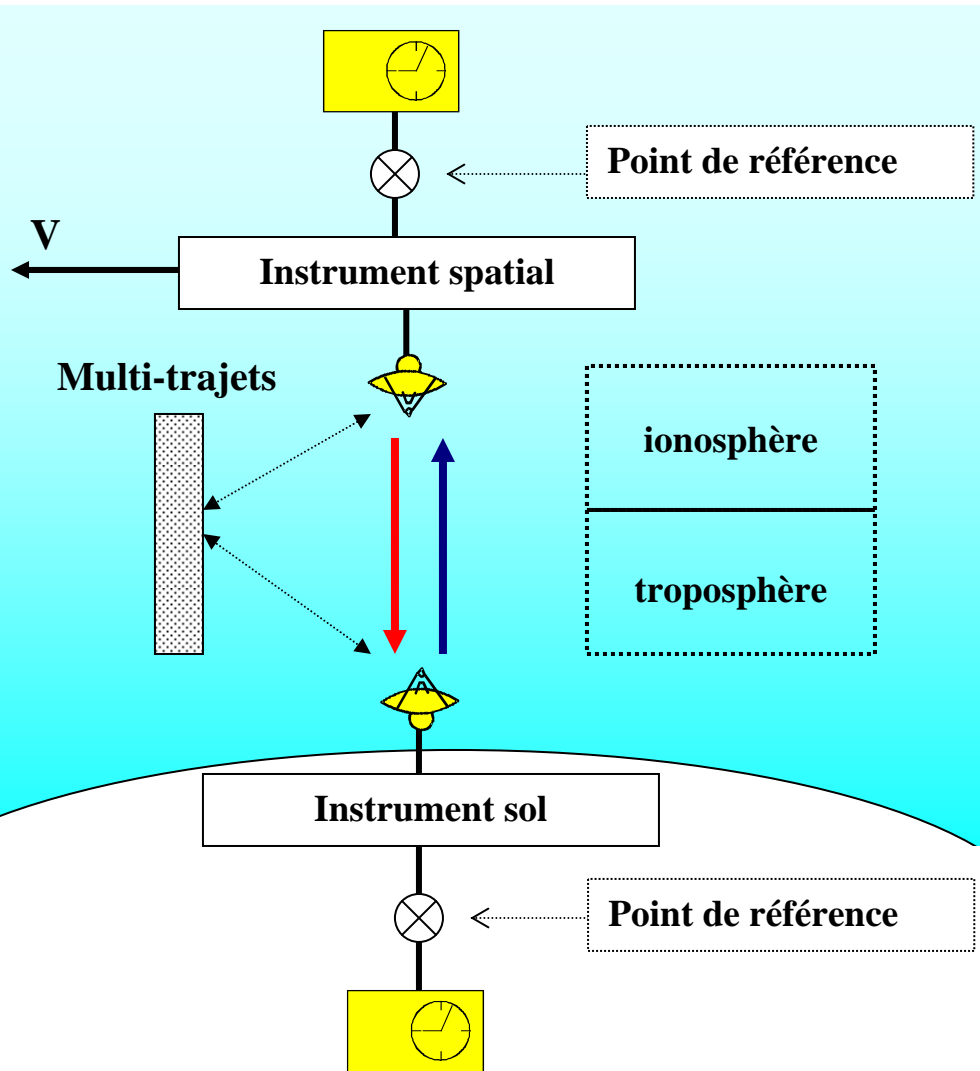
→ repose sur la stabilité en temps du lien

### ❑ **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)

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

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

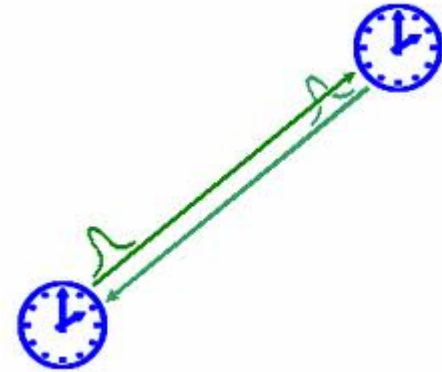
**Effets instrumentaux** (amplitude et fréquence des signaux, effets géométriques d'antennes, ...)

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

# Types de mesures

## ❑ Signaux pulsés

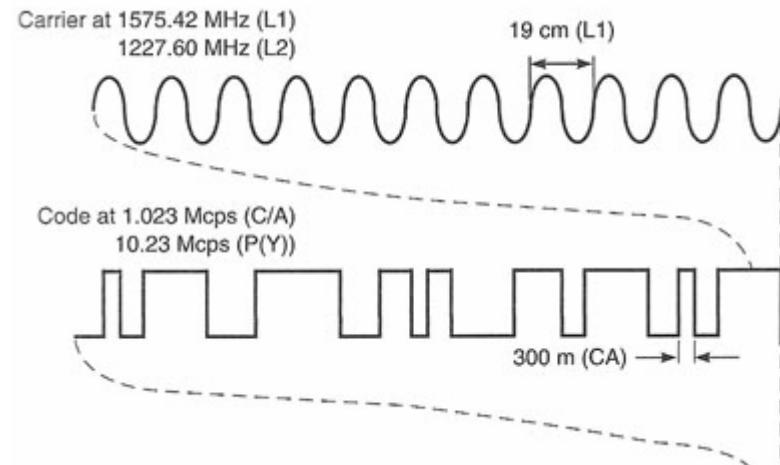
→ Datation des instants d'émission et de réception d'impulsions



## ❑ 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

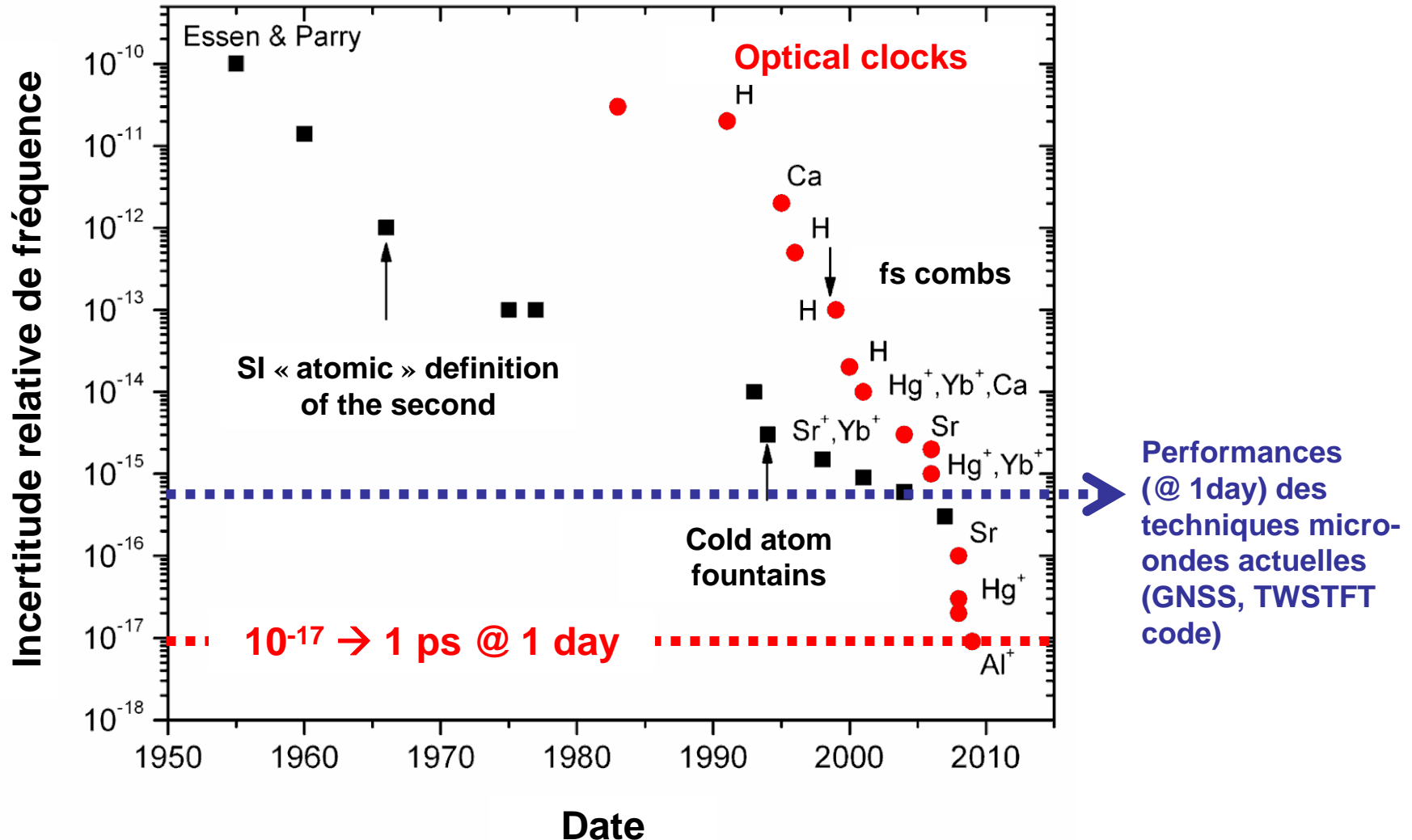
## « Exactitude » en temps :

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

# Performances des transferts / horloges



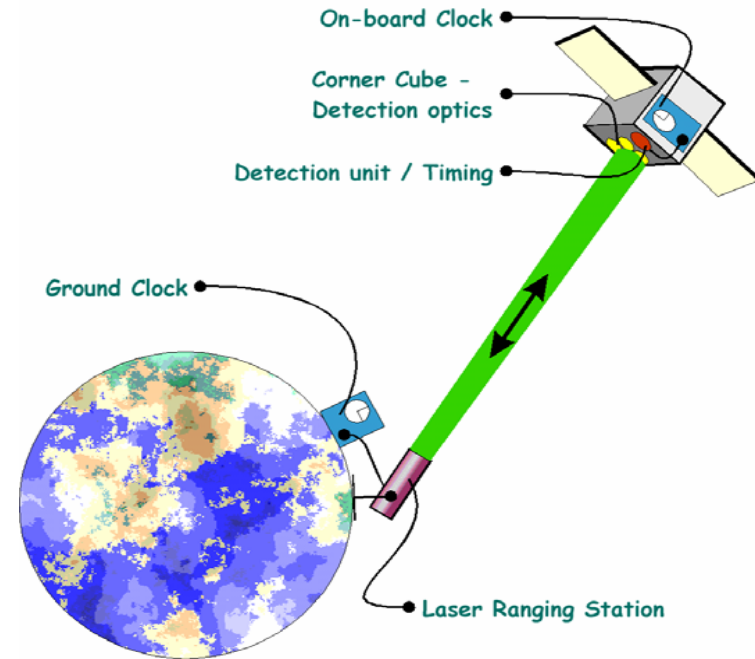
# Transferts T/F avec des porteuses micro-ondes

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

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

# Liens optiques cohérents

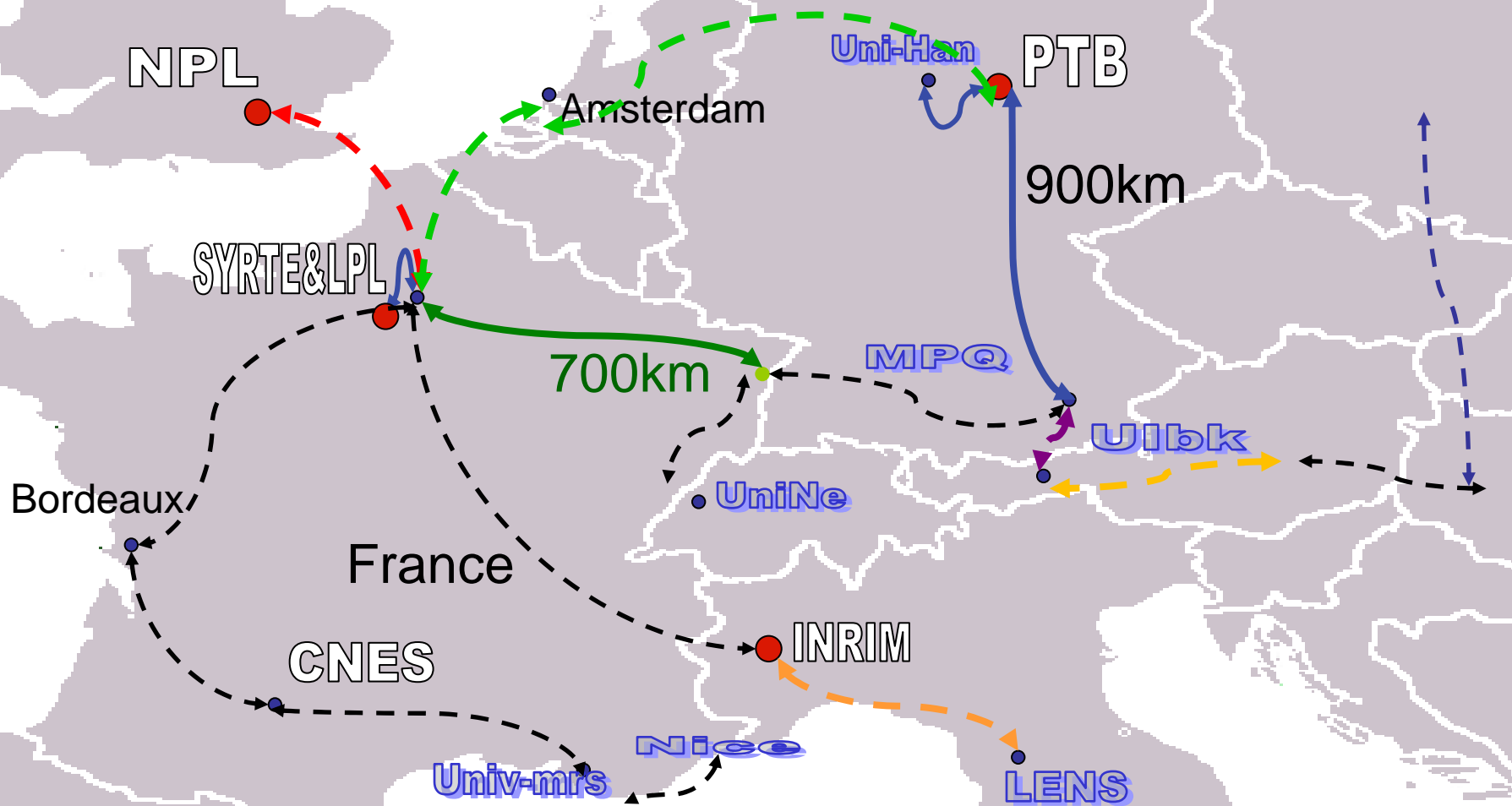
## → Propagation guidée dans une fibre

- 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-picoseconde ( $10^{-18}$  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.**