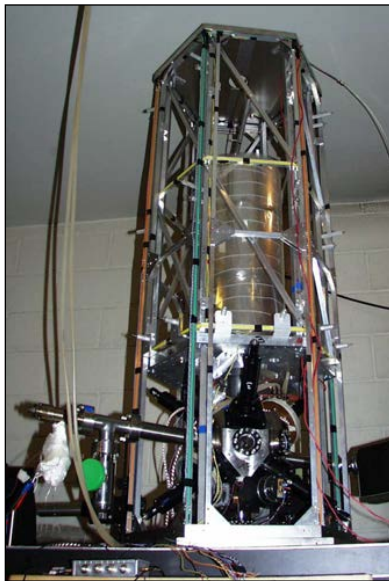


Activités Temps-Fréquence du LNE-SYRTE

Michel Abgrall



Journée de formation des guides de l'Observatoire de Paris - 19 Mars 2012

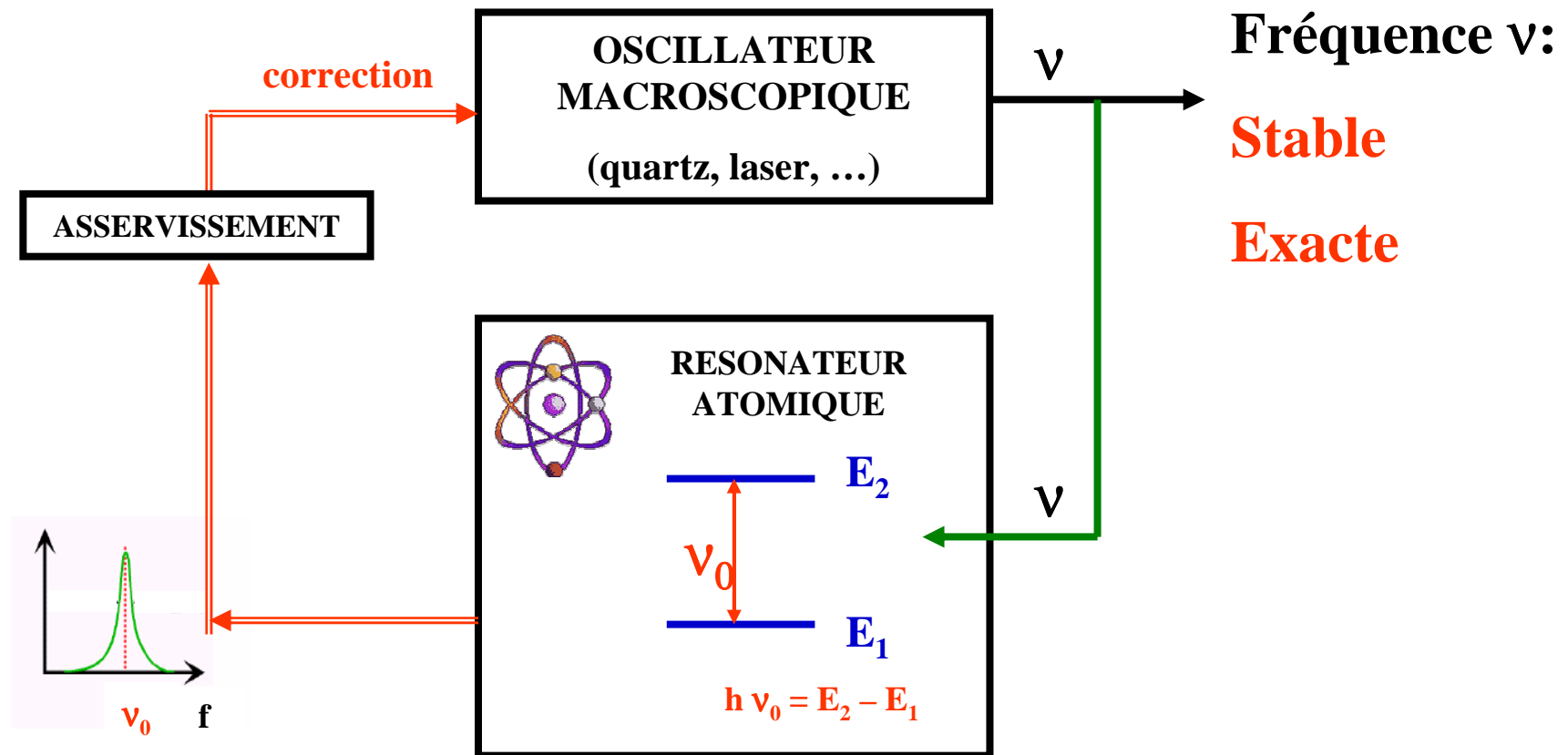
Sommaire

- Qu'est-ce qu'une horloge atomique
- Différents types d'horloges
 - Horloges commerciales
 - Horloges de laboratoire
 - Le programme PHARAO/ACES
- Références Nationales de Temps
 - Ses missions
 - Les échelles de temps UTC(OP) et TA(F)
 - Les moyens de comparaison longues distances

Qu'est-ce qu'une horloge atomique?

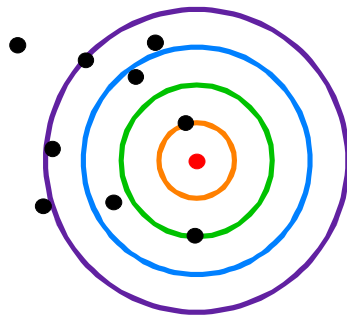
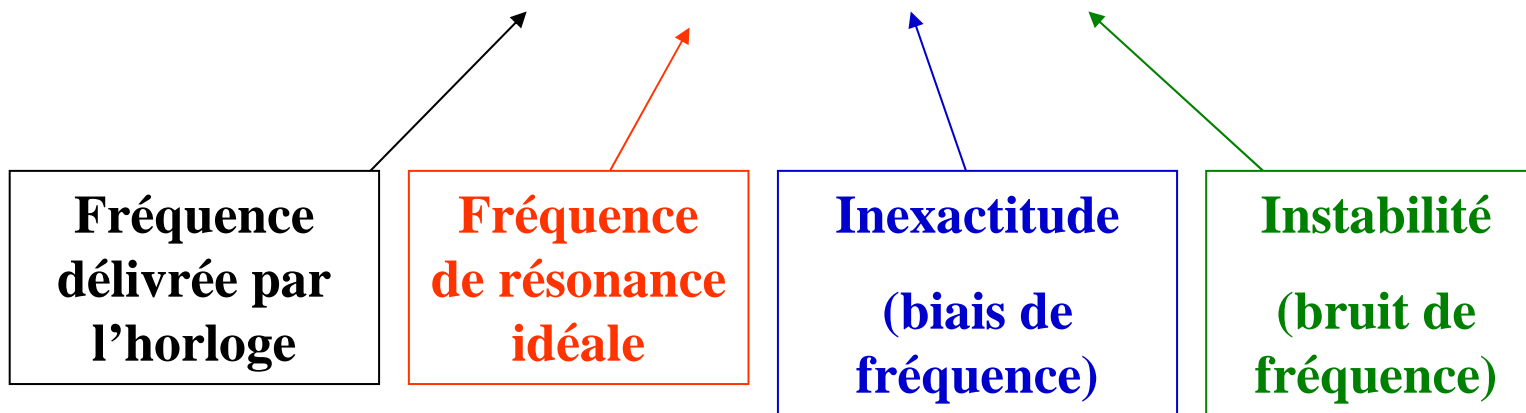
- Le temps est défini à partir de l'observation de phénomènes périodiques
- Une horloge doit fournir un signal stable et universel, facilement utilisable
- Depuis 1967, la seconde du SI est définie à partir de la transition hyperfine de l'atome de Césium 133 dont la fréquence a été fixée à la valeur de 9 192 631 770 Hz

Qu'est-ce qu'une horloge atomique?

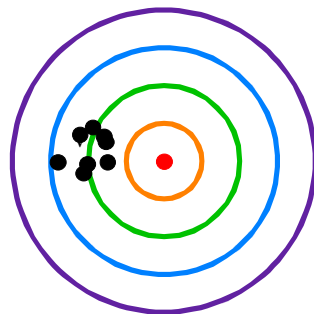


Stabilité et Exactitude

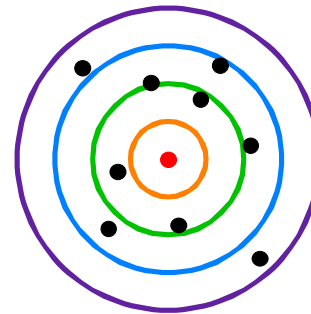
$$\nu = \nu_0 [1 + \varepsilon + y(t)]$$



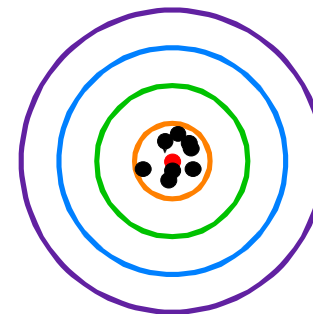
Inexact
Et Instable



Stable
Mais inexact

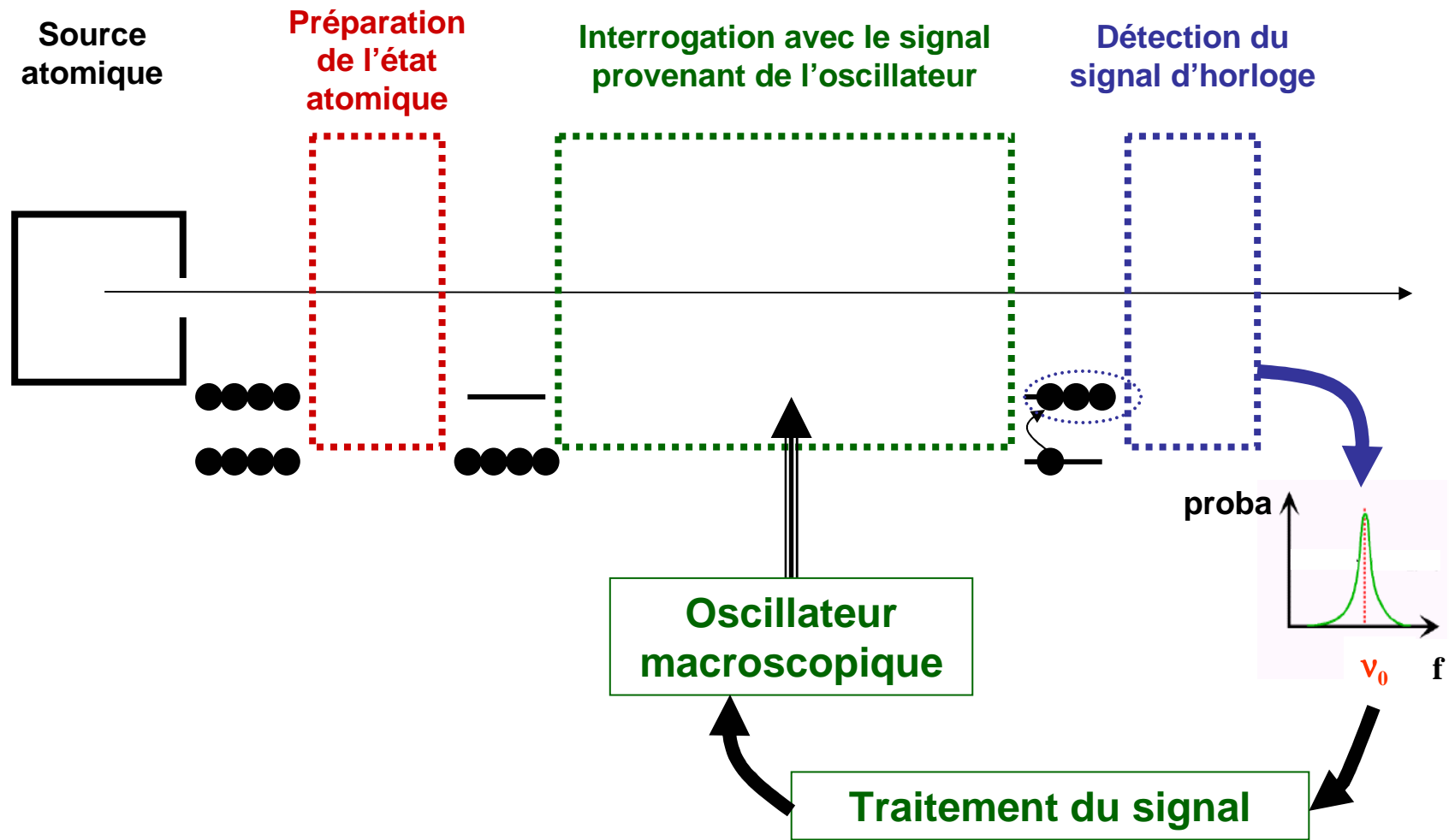


Exact
Mais instable



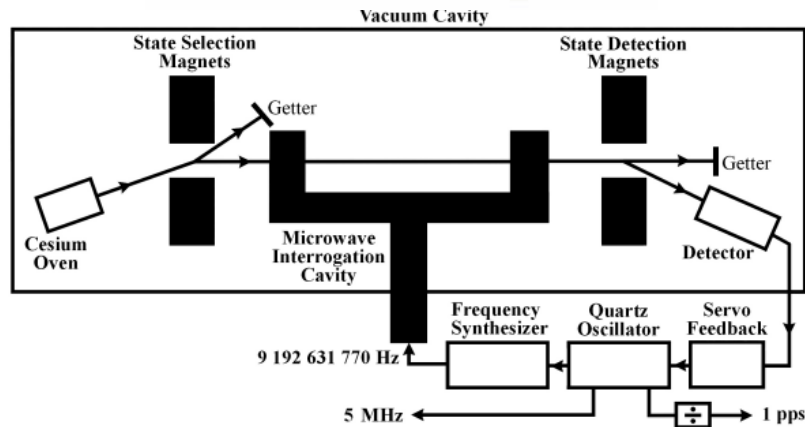
Stable
Et exact

Le résonateur atomique



Les horloges commerciales

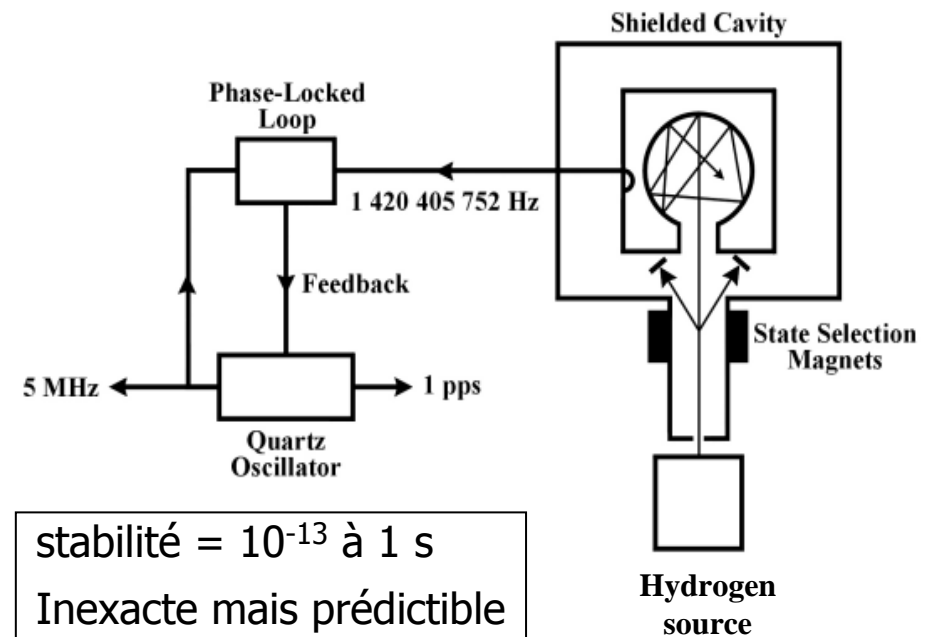
Horloge à Jet Thermique



Sélection et détection par des aimants

stabilité = $5 \cdot 10^{-12} \tau^{-1/2}$
exactitude = $5 \cdot 10^{-13}$

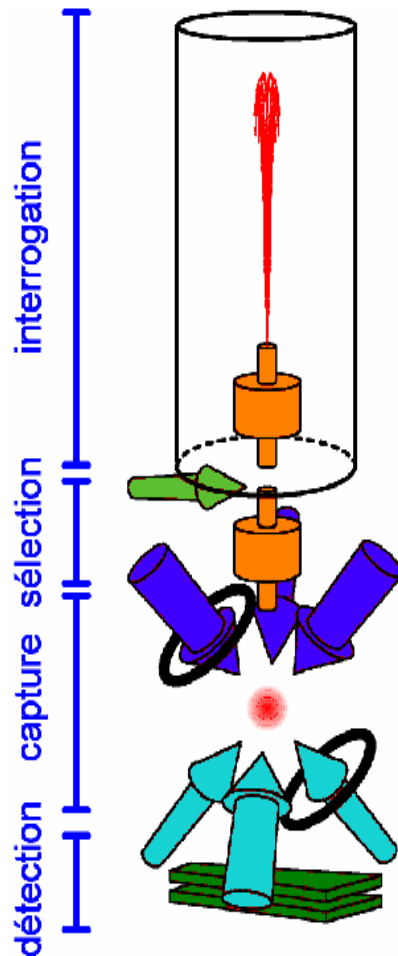
Maser à Hydrogène



stabilité = 10^{-13} à 1 s
Inexacte mais prédictible

Application : Génération d'échelles de temps

Les fontaines Atomiques



Paramètres caractéristiques

- Nb d'atomes capturés = 10^9
- Température = $1\mu\text{K}$
- Vitesse de lancement $\sim 4\text{m/s}$
- Temps d'observation = 0.5 s

Effets systématiques :

- Champ magnétique
- Rayonnement du corps noir
- Collisions entre atomes
- Défauts du signal d'interrogation
- Transitions atomiques voisines
- Lumière parasite
- etc...

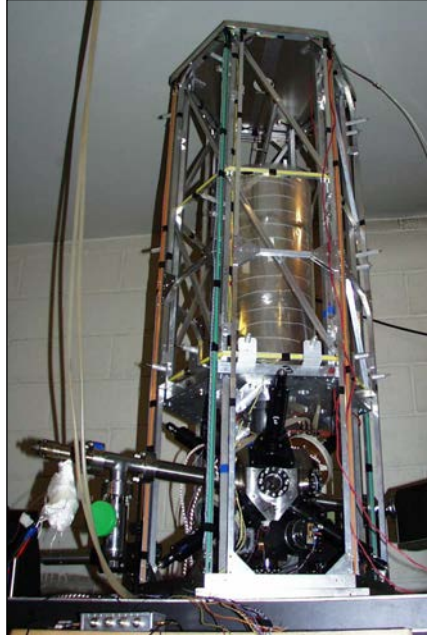
Sources de bruit :

- Système de détection
- Oscillateur de référence

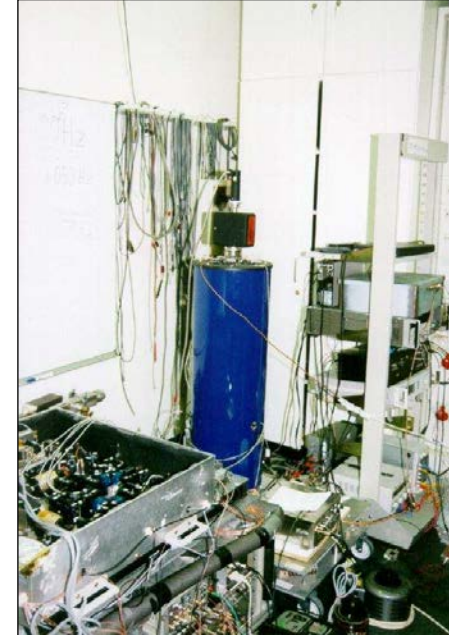
Les Fontaines Atomiques



FO1 (Césium)
Exactitude 4×10^{-16}



FO2 (Césium et Rubidium)
Exactitude 3×10^{-16}



FOM (Césium)
Exactitude 6×10^{-16}

Stabilité cour terme : de 2 à $8 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$, suivant l'oscillateur de référence

Exactitude de 10^{-16} :

Dérive du temps de l'horloge de 1 s après 300 millions d'années

Applications : réalisation de la seconde du SI ;
tests de physique fondamentale

Les Horloges Optiques

Rapport 10^5 entre les fréquences des domaines optiques et micro-onde

Deux types d'horloges optiques en développement dans le monde :

- Horloges à ions piégés
- Horloges à atomes neutres piégés

En développement au LNE-SYRTE :

- Deux horloges Strontium en cours d'évaluation
- Une horloge à Mercure en construction

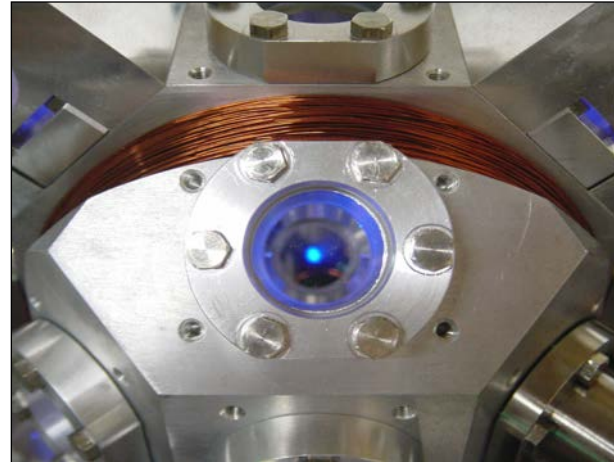
Performances attendues :

- **Exactitude** 10^{-17} - 10^{-18}
- **Stabilité** court terme de 10^{-15}

Applications : tests de physique fondamentale



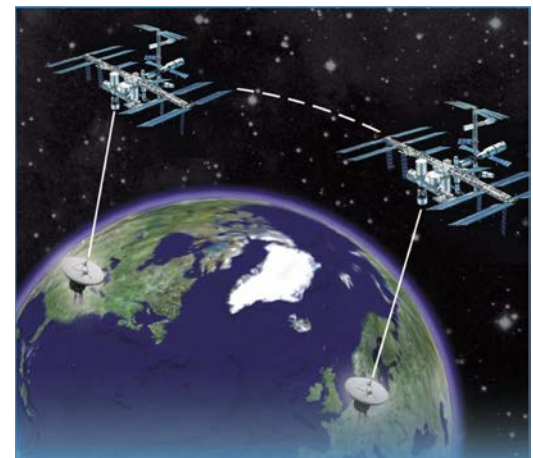
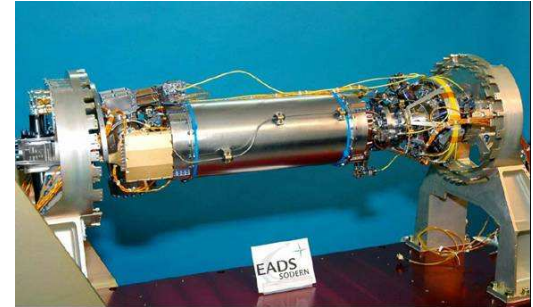
Système optique de l'horloge Strontium



Piège Magnéto-optique de Strontium

Le Programme PHARAO-ACES

- ACES comporte une horloge à atomes froids de césium (PHARAO), un maser à hydrogène et des moyens de comparaison bord sol.
- ACES sera installée à bord de la station spatiale internationale en 2014, pour une mission de 18 à 36 mois
- Comparaison entre PHARAO et les horloges ultrastables au sol au niveau mondial
- Objectifs scientifiques : tests de physique fondamentale, géodésie relativiste, physique des atomes froids en micro-gravité, ...



Les Références Nationales de Temps

- Réalisation et diffusion de **UTC(OP)**
 - Temps légal en France
 - Pivot pour toutes nos comparaisons de temps
- Réalisation du Temps atomique français TA(F)
- Lien privilégié avec l'Observatoire de Besançon, Laboratoire associé chargé des étalonnages industriels (baies SYREF)
- Activités de service :
 - Horloge parlante (exactitude 50 ms)
 - Loran-C (chaîne européenne)
 - France-Inter (exactitude de la fréquence de la porteuse $\sim 10^{-12}$)
 - NTP (exactitude qq dizaines de ms)
 - EGNOS (aviation civile)

UTC(OP)

- A partir d'environ 240 horloges situées dans ~ 70 institutions, le **BIPM** construit chaque début de mois pour le mois précédent :
 - Une échelle atomique libre: **EAL**
 - Le Temps atomique international: **TAI**
 - Le Temps universel coordonné: **UTC**
- UTC maintenu proche de UT1: $|\text{UTC} - \text{UT1}| < 0,9 \text{ s}$
 - $\text{UTC} - \text{TAI} = 34 \text{ s}$
 - Prochaine seconde intercalaire le 30/06/2012 (IERS)
- **UTC: échelle de temps « papier » diffusée en temps différé (≈ 1 mois)**
- Les Laboratoires nationaux de métrologie doivent construire des **prédictions** de l'UTC (CCTF : $|\text{UTC} - \text{UTC}(k)| < 100 \text{ ns}$ (1σ))
- Le LNE-SYRTE construit **UTC(OP)**, basé sur une horloge commerciale à Césium pilotée en fréquence
- UTC(OP) maintenu à 50 ns (1σ) de l'UTC depuis ~ 10 ans
- Développement d'un nouvel UTC(OP) basé sur une moyenne de masers piloté par les fontaines atomiques

Le TA(F)

- Fabriqué à partir de ~ 25 horloges à césium commerciales, disséminées dans 9 laboratoires français: Agilent Tech., CELAR, CNES, DCN, FT R&D, OB, OCA, OP, Spectracom.
- TA(F) : référence de fréquence stable et exacte sur des périodes de l'ordre de 1 mois
- Algorithme de **stabilité**: ARIMA >>>> **EAL(F)**
- Algorithme d'**exactitude**: pilotage par les fontaines atomiques du LNE-SYRTE.
- $|TA(F) - SI| < 1.5 \times 10^{-15}$ (k=1) depuis 2007

Transfert de temps par GNSS

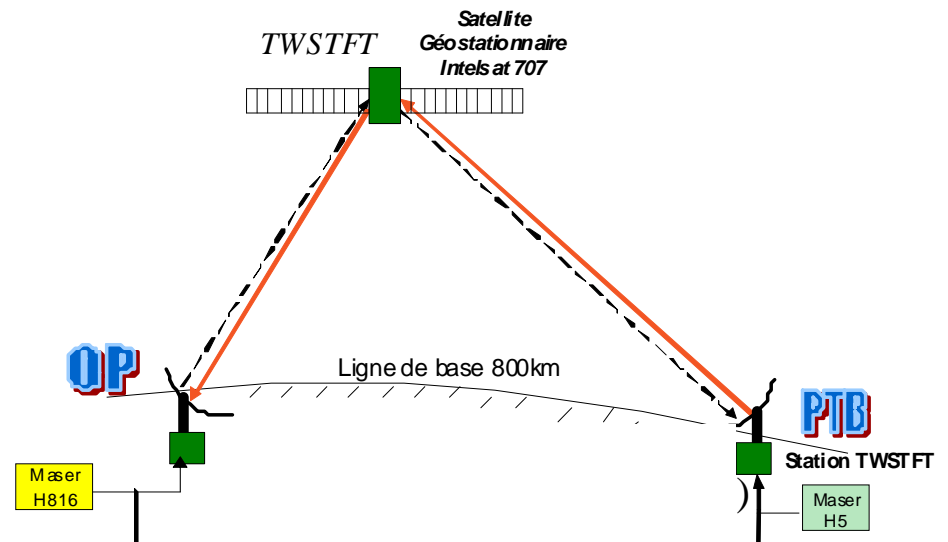
- 4 récepteurs GPS bi-fréquence multicanaux au LNE-SYRTE (GPS, GLONASS, GALILEO)
- Chaque récepteur enregistre les messages des satellites visibles (positions satellites, TGPS, corrections troposphérique, ionosphérique par modélisation ou mesure)
=>UTC(k) – TGPS pour chaque satellite
- Calcul des vues communes entre 2 laboratoires distants
- **Stabilité** : $\sim 10^{-15}$ à 1 jour
- **Exactitude** : qq ns
- Etalonnages relatifs par récepteur voyageur



Applications : raccordement TAI/UTC, comparaison d'étalons primaires

Transfert de temps par TWSTFT

- Deux stations TWSTFT au LNE-SYRTE
 - **OP01**: depuis janvier 2005
 - **OP02**: depuis février 2009
- Technique 2 voies : Emission-réception d'une paire de stations distantes via un satellite géostationnaire de télécom
 - Les délais de propagation s'annulent au premier ordre
- **Exactitude** 1 - 2 ns
- **Stabilité** $\sim 10^{-15}$ à 1 jour



Applications : raccordement TAI/UTC, comparaison d'étalons primaires

Merci pour votre attention