

# Systemes de référence et métrologie temps-espace

**P. Charlot**

Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux

**P. Tuckey**

Observatoire de Paris/SYRTE

Journées GRAM, Nice, 29-30 Novembre 2010



# Plan

---

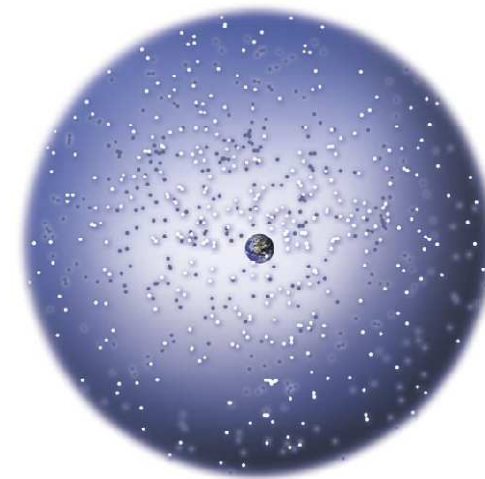
- Métrologie de l'espace
  - Systèmes de référence célestes
  - Orientation de la Terre
  - Géodésie spatiale
  - Systèmes observationnels et services internationaux
- Temps-fréquence
  - « Horloges » et cie
  - Comparaisons d'horloges à distance
  - Echelles de temps
  - Acteurs français, structures, services

# Les repères célestes

---

- Repère de type « cinématique »  
i.e. « non tournant »
  - Matérialisé par les directions des sources extragalactiques (quasars)
  - Objets situés à des distances cosmologiques, ne présentant pas de mouvements propres
- Repère de type « dynamique »  
i.e. défini par les lois de la dynamique
  - Matérialisé par les éphémérides des planètes et des autres corps du système solaire

*La sphère des quasars  
entourant la Terre*

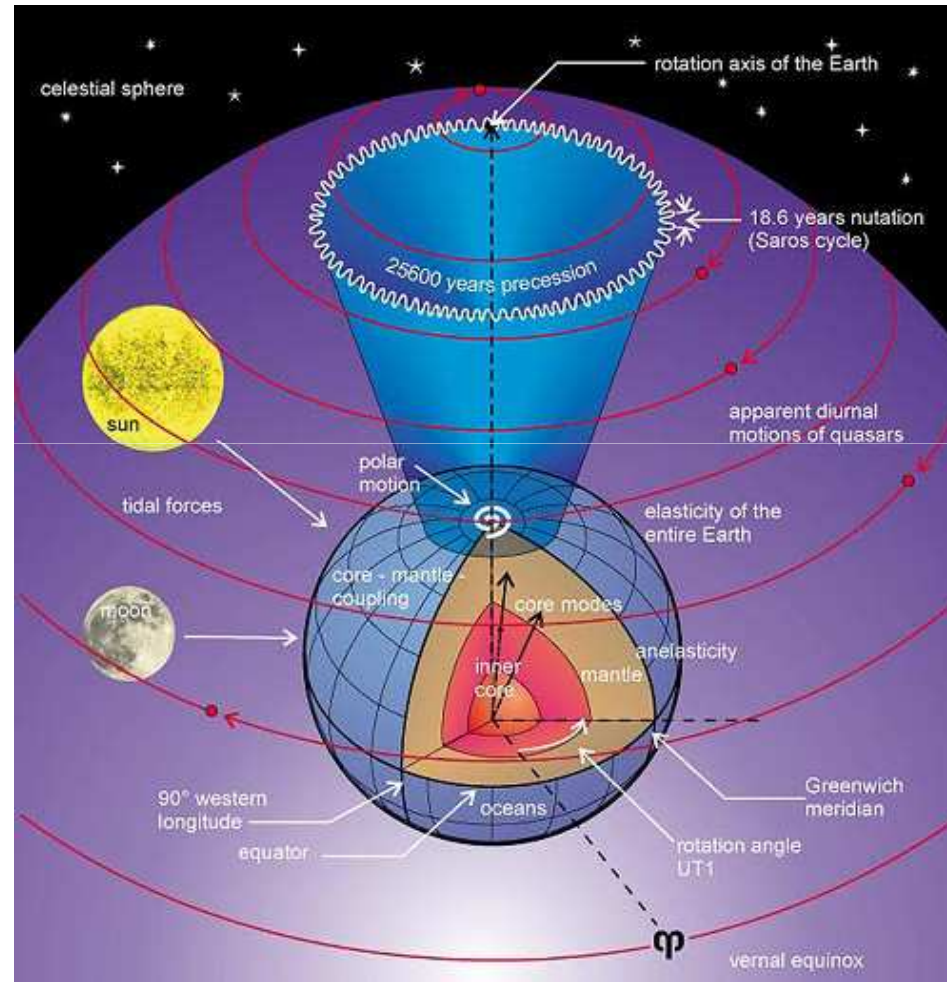


# Orientation de la Terre

Précession/  
nutation

Mouvement  
du pôle

Rotation de la  
Terre (UT1)



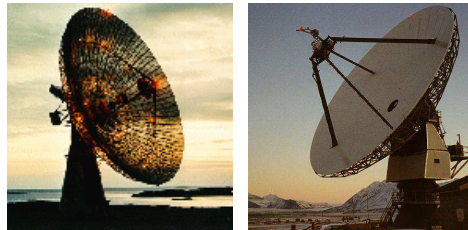
Action de la  
Lune, du Soleil  
et des planètes

Action des  
couches fluides  
(atmosphère,  
océans, hydro-  
logie,...)

La manière dont  
la Terre réagit  
dépend de la  
manière dont  
elle est faite...

# Systemes observationnels

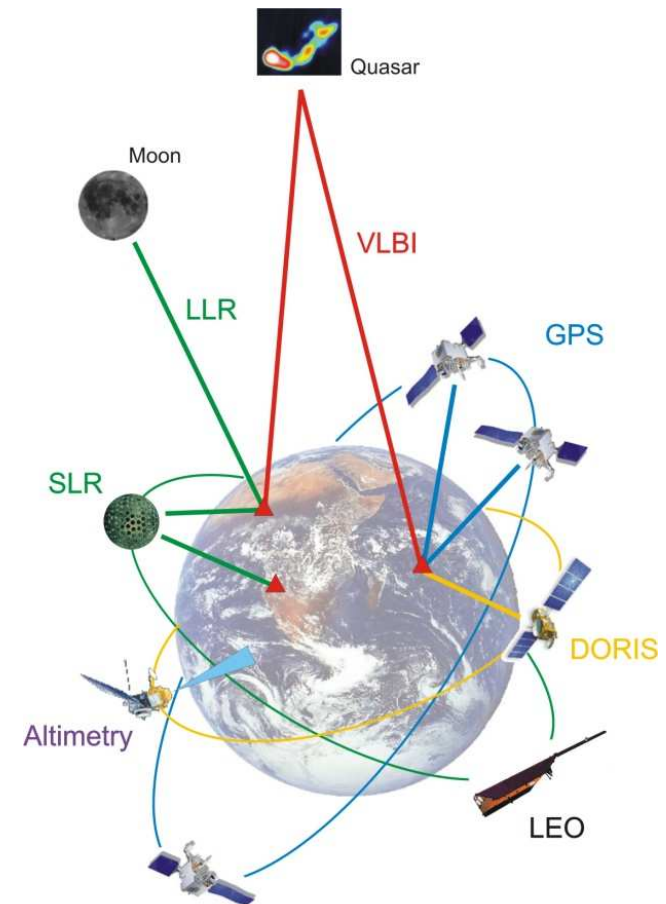
**VLBI**



**TIR LASER**



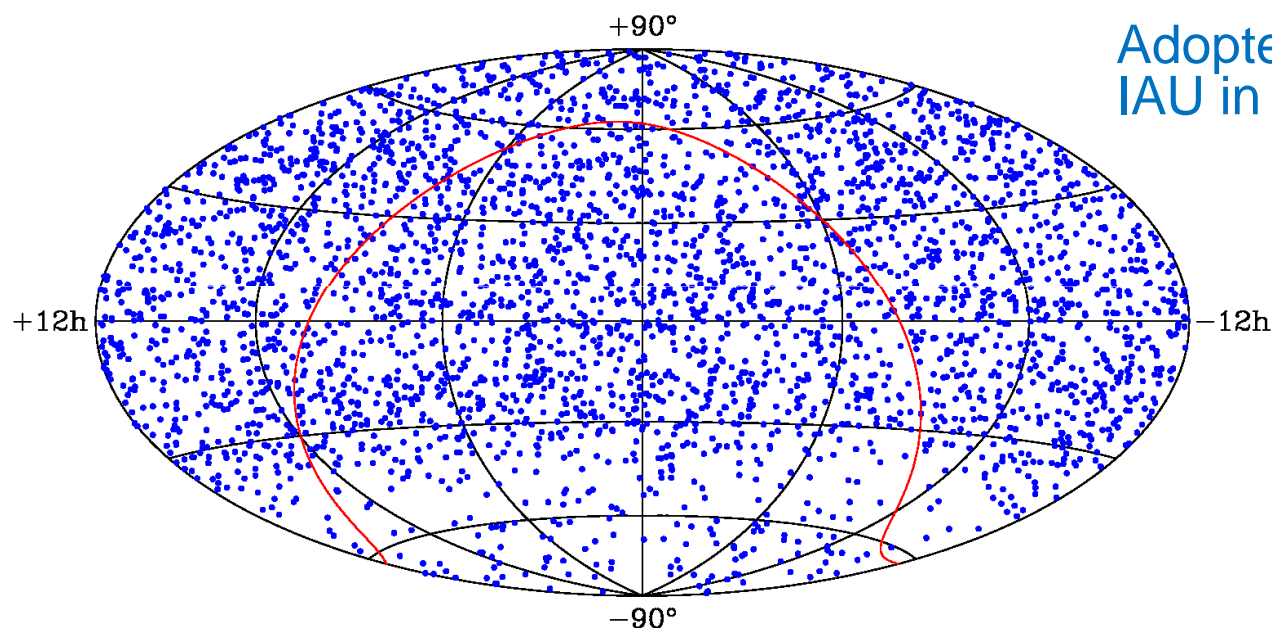
**GNSS  
(GPS / GLONASS  
GALILEO)**



L'observation VLBI de quasars rend inertiel l'ensemble du systeme

# International Celestial Reference Frame (ICRF2)

- 3414 compact extragalactic sources observed with VLBI  
*5 times more than ICRF1*

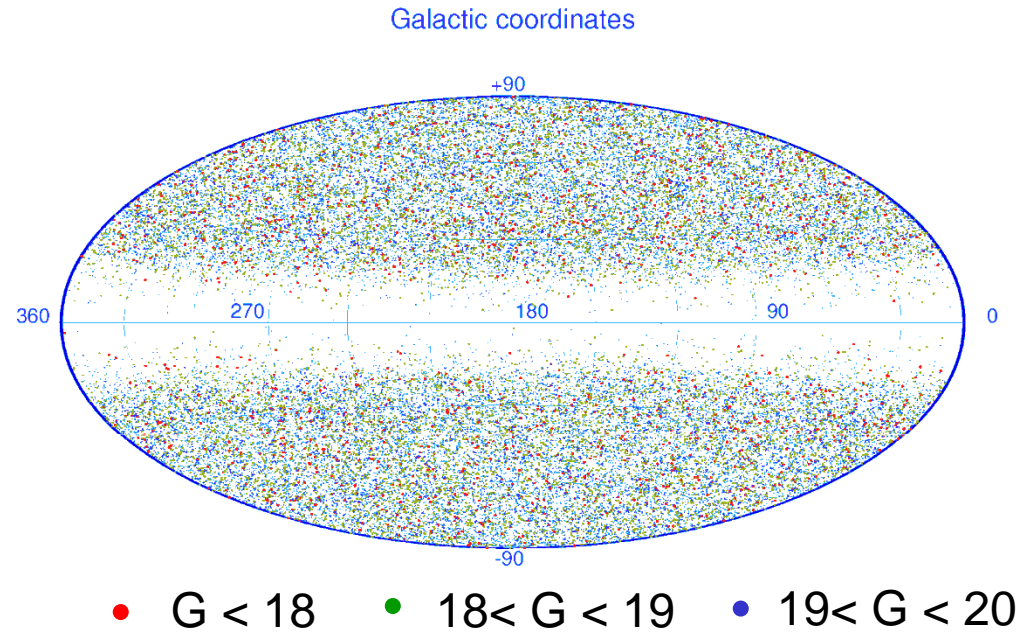


- Noise floor of  $\sim 40 \mu\text{as}$   
*5-6 times better than ICRF1*
- Axis stability of  $\sim 10 \mu\text{as}$   
*2 times better than ICRF1*



# En optique: Gaia

Lancement: 2012



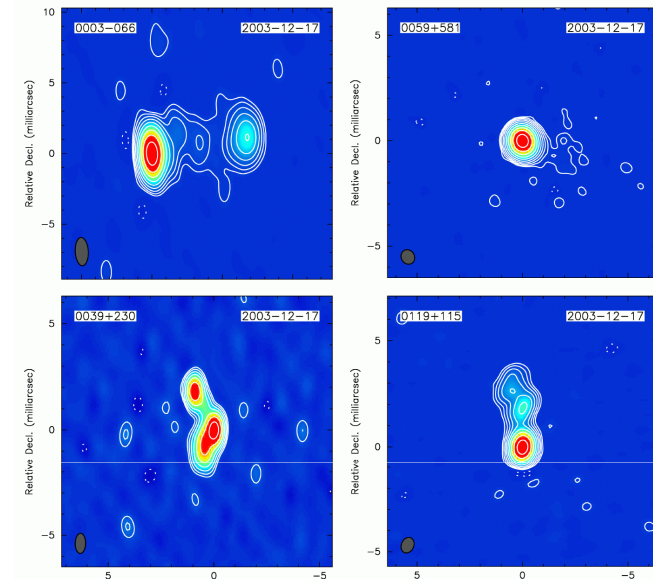
- 500 000 QSO
- Stabilité des axes:  
~0.3  $\mu\text{as}/\text{yr}$

V magnitude	6-13	14	16	18	20	mag
Position @2015	6	10	25	70	205	$\mu\text{as}$

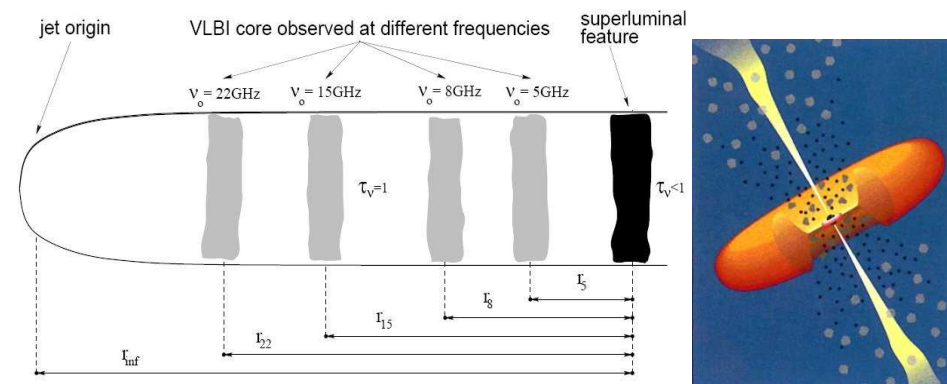
# Enjeux futurs (1)

- Prendre en compte la distribution de brillance radio des sources dans la définition du repère.
- Aligner les repères VLBI et Gaia le plus précisément possible (sources ponctuelles)
- Comparer les positions radio et optiques à quelques dizaines de  $\mu$ as près

- Localisation relative des émissions optique et radio
- Opacité dans les jets



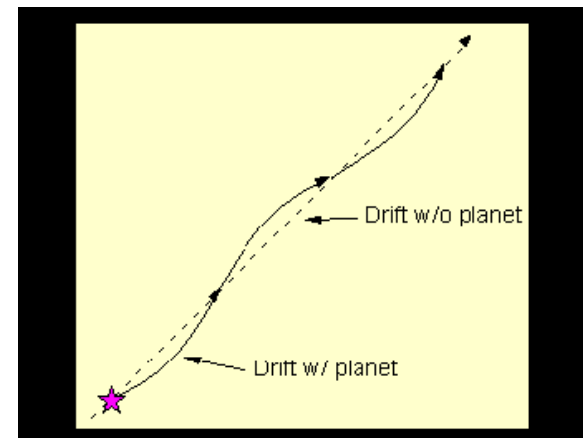
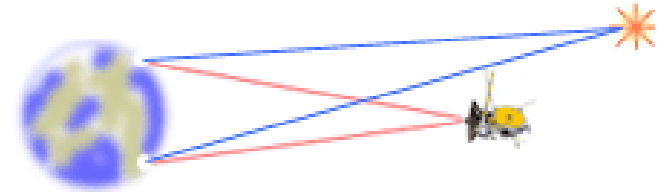
Bordeaux VLBI Image Database (BVID)





# Enjeux futurs (2)

- Recherche de mouvements transverses systématiques  $< 1 \mu\text{as}/\text{yr}$  dans le repère Gaia (cosmologie)
- Utilisation des sources de l'ICRF en tant que calibrateurs
  - observations d'objets faibles
  - mouvements propres dans la Galaxie, détection de planètes extra-solaires
  - Navigation interplanétaire
- Rotation de la Terre



# Orientation de la Terre (1)

---

- Développements théoriques et modélisation pour prendre en compte des effets astronomiques et géophysiques non considérés jusqu'à présent
- Etude de la nutation libre du noyau et de la graine
- Rebond post-glaciaire
- Détectabilité des séismes sur la rotation de la Terre (phénomènes de relaxation post-sismiques sur plusieurs années?)
- Combinaison des techniques (VLBI, GNSS, SLR, LLR,...)
- Etude des effets sub-diurnes → est-il possible d'estimer les paramètres de rotation de la Terre à une fréquence horaire?

# Orientation de la Terre (2)

---

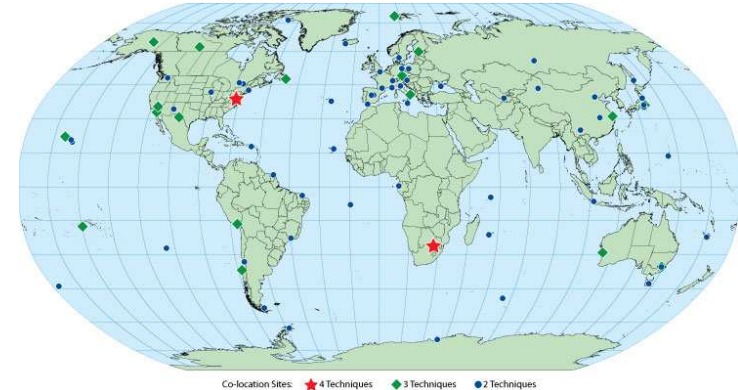
## Interférométrie atomique

- **Gravimètre atomique**
  - Mesures des perturbations locales en temps réel
  - Mesures sur des durées très longues possible
- **Gyromètre**
  - Mesures de la rotation locale sur des échelles de temps rapide (1s à 1 jour)
- Possibilité de réaliser des mesures d'accélération et de rotation sur le même appareil
- Combinaison avec mesures VLBI



# Géodésie spatiale

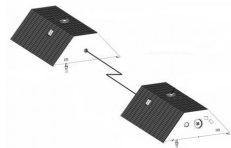
- International Terrestrial Reference Frame (ITRF)
  - mouvements tectoniques et déformations de la croûte
- Altimétrie satellitaire
  - niveau des mers
- Champ de gravité → géoïde



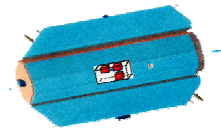
*Geodetic observatories (core sites)*



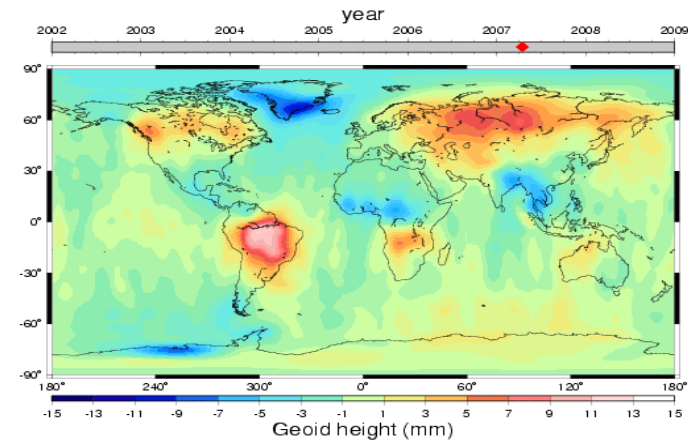
CHAMP



GRACE



GOCE



# Services internationaux

- IVS: International VLBI Service for geodesy and astrometry

*LAB, SYRTE*



- ILRS: International Laser Ranging Service

*OCA, SYRTE*



- IGS:

*CNES, IGN*



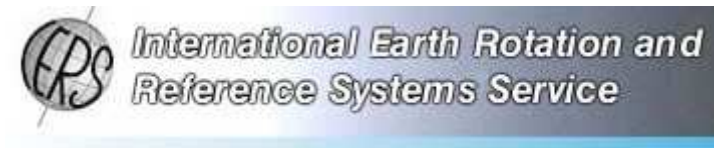
- IDS: International DORIS Service

*CNES, IGN*



- IERS:

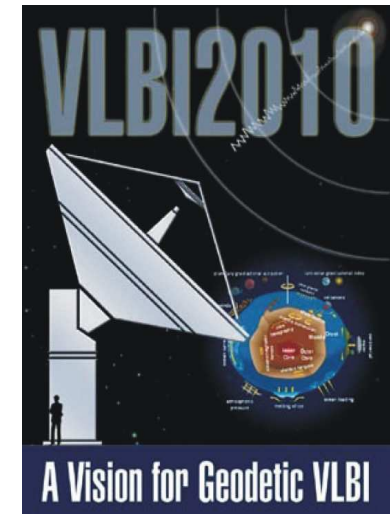
*IGN, SYRTE*





# VLBI2010 (1)

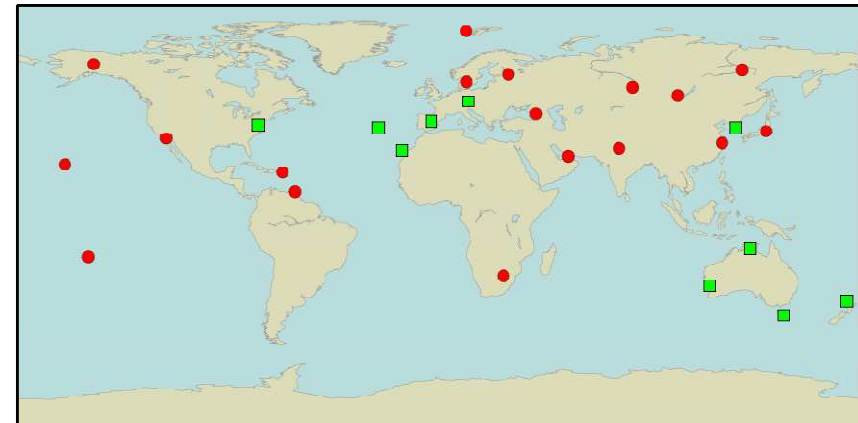
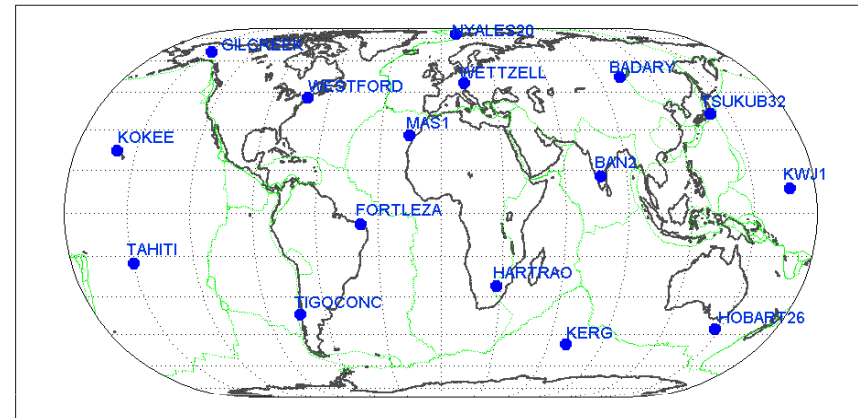
- Objectifs
  - Précision de **1 mm** sur la position des stations
  - Suivi de la rotation de la Terre **en continu 24h/24h**
  - Moins de 24h entre observations et résultats
- Moyens
  - **Antennes de petite taille (12m), ultra-rapides (6°/s) et automatiques**
  - **Système d'observation à large bande**
  - Transfert des données par **réseau haut débit**



# VLBI2010 (2)

- Observatoires géodésiques fondamentaux
  - au moins 3 des techniques de mesure (VLBI, SLR, GNSS)
- Site de Tahiti
  - projet d'antenne VLBI2010
  - station laser de nouvelle génération

simulation - 16 stns origin(lon,lat) [0 0]



---

# Temps- fréquence

# « Horloges » et cie

---

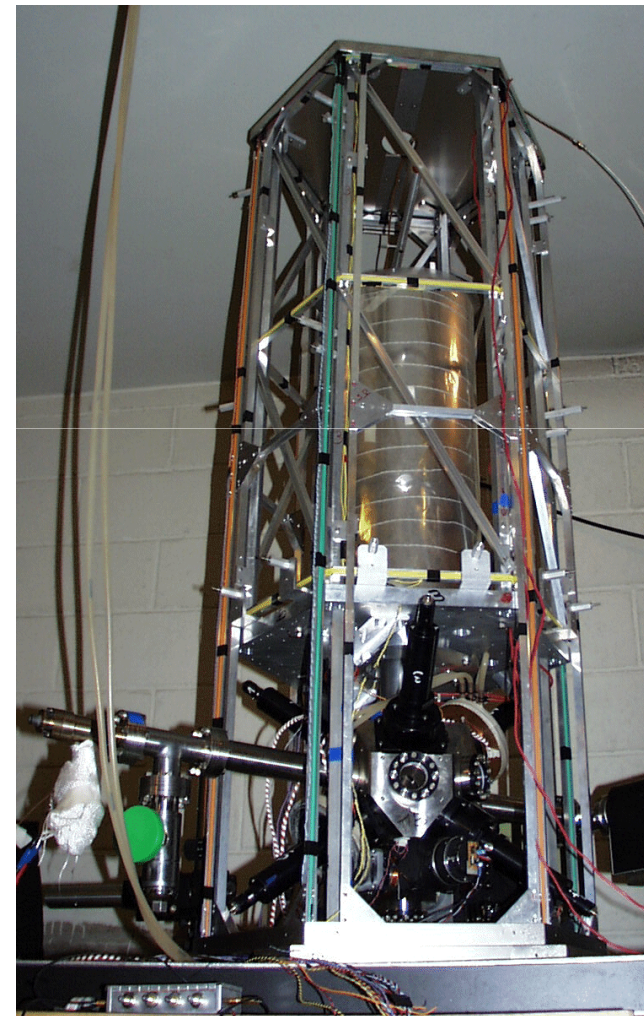
Objet : réalisation de l'unité de temps.

Equivalence avec la réalisation de l'unité de fréquence.

- Étalons primaires de fréquence
- PHARAO/ACES
- Horloges optiques : l'avenir
- Oscillateurs ultra-stables, métrologie optique
- Horloges compactes

# Etalons primaires

- Mettent en œuvre de la définition de la seconde (césium)
- Génèrent un signal de fréquence connue – équivaut à réaliser la seconde
- SYRTE a 3 fontaines atomiques
- Exactitude relative :  $4 \times 10^{-16}$
- Poids important au niveau mondial

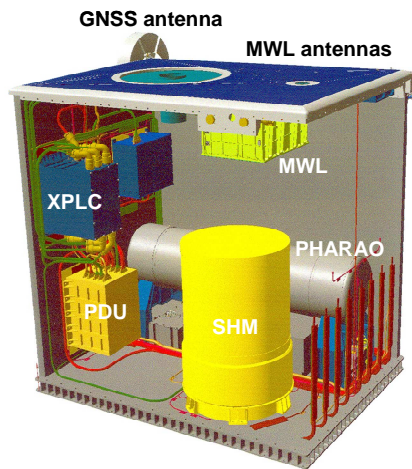


SYRTE (FO2)

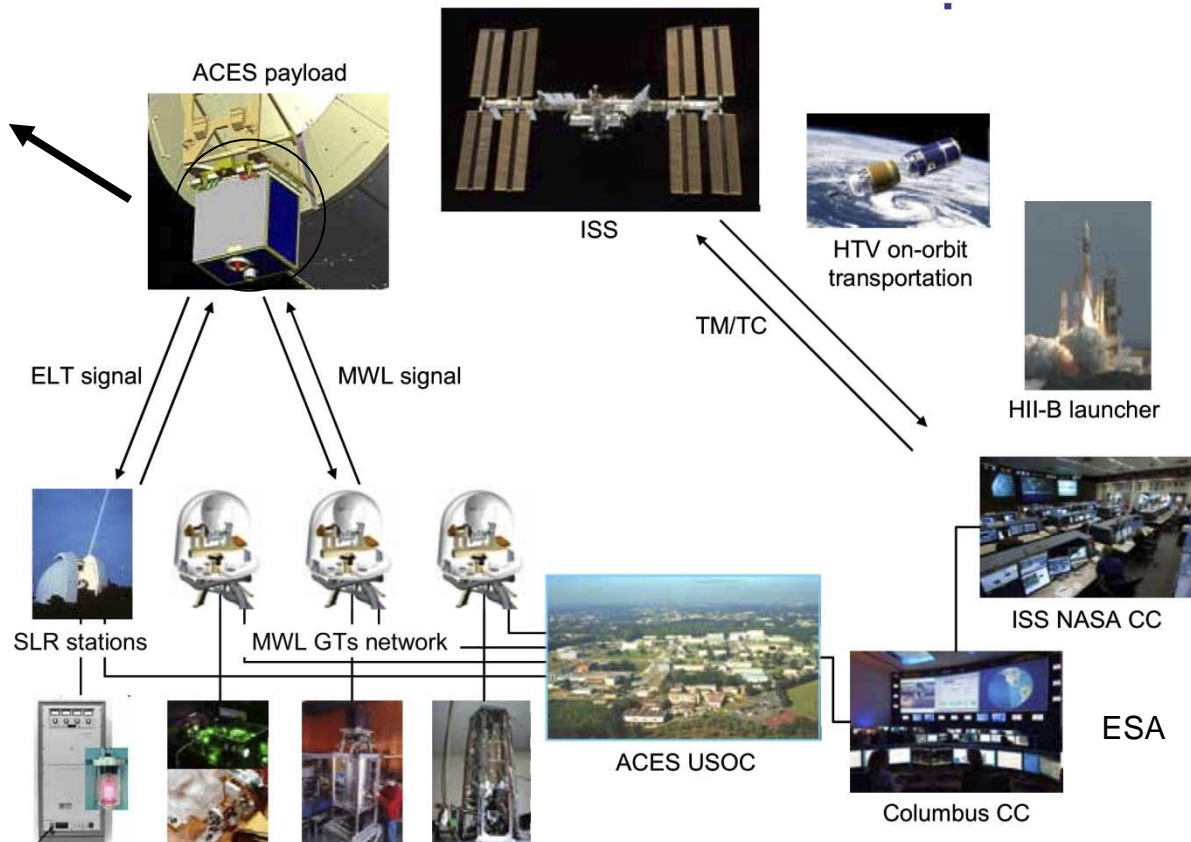


# PHARAO/ACES (CNES-ESA)

## ACES payload



## ACES systems (2014)

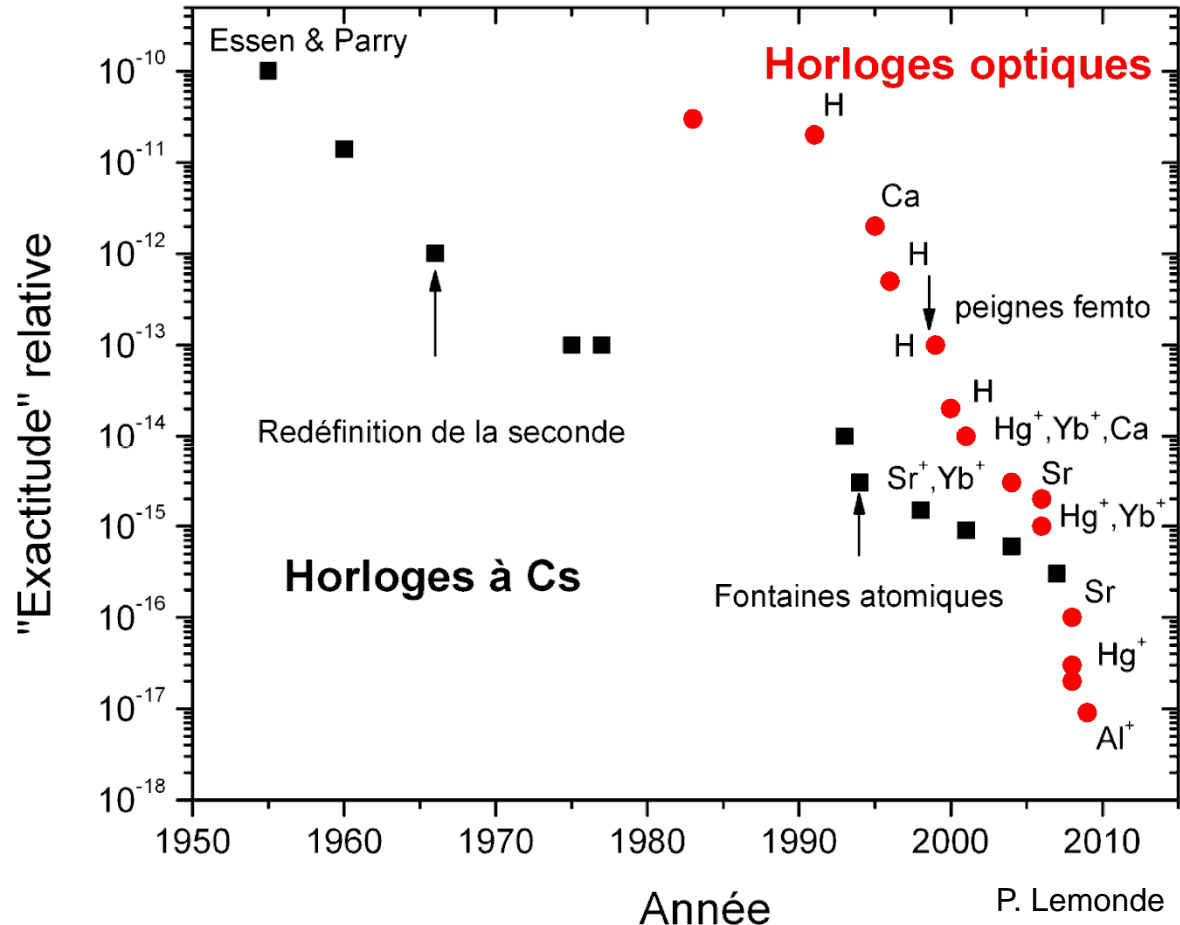


Une horloge à atomes froids dans l'espace  
 Accès mondial  
 Tests de physique fondamentale

# Horloges optiques

- Basées sur des transitions atomiques optiques
- Amélioration rapide
- *Voir présentation J. Lodewyck*

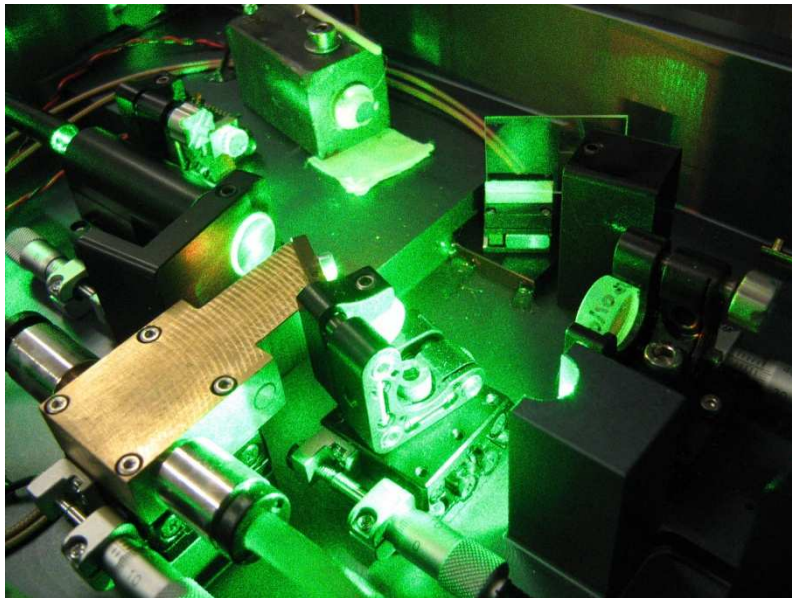
**Grand challenge :  
redéfinition de la seconde**



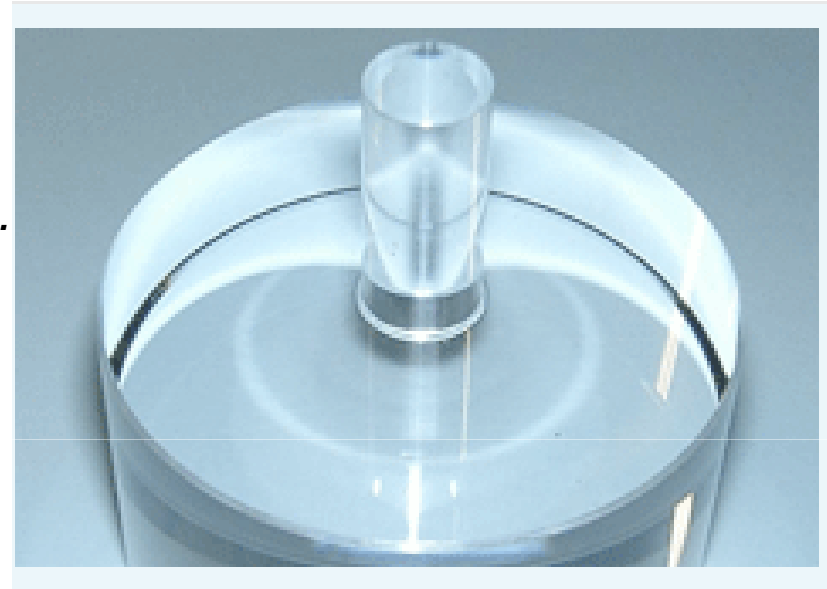
# Oscillateurs, métrologie optique

Oscillateurs micro-ondes ultra-stables

Lasers ultra-stables (VIRGO, horloges optiques, LISA...). *Voir présentation C. Zumsteg*



Y. Le Coq



V. Giordano

Peigne de fréquences femto-seconde  
(Prix Nobel Hänsch/Hall 2005)

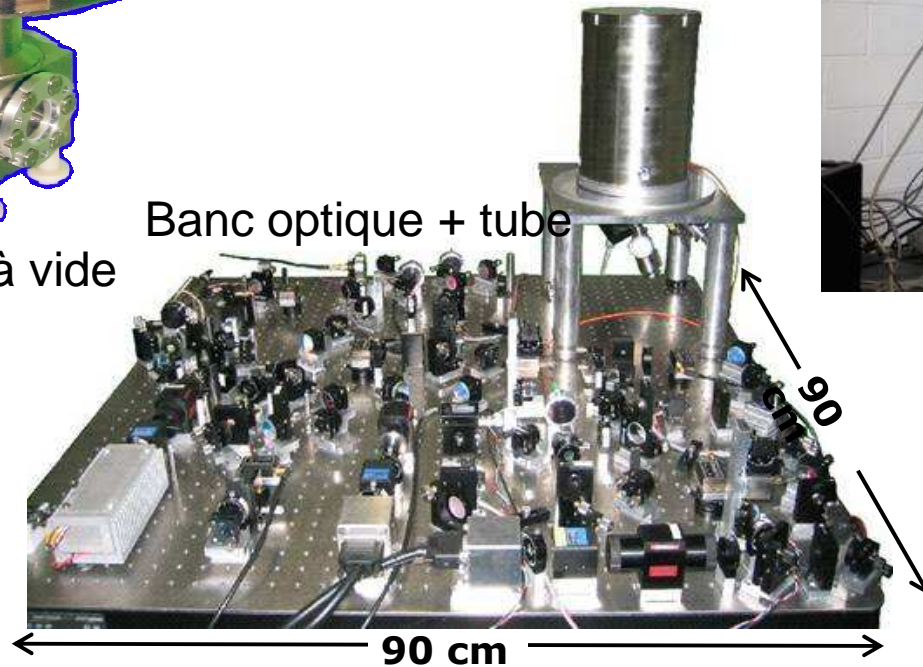
# Horloges compactes

## HORACE (cible Galileo gén. 2)



Enceinte à vide

Banc optique + tube



D. Holleville

P. Charlot / P. Tuckey

# Comparaisons d'horloges à distance

---

Horloge = étalon de fréquence + compteur

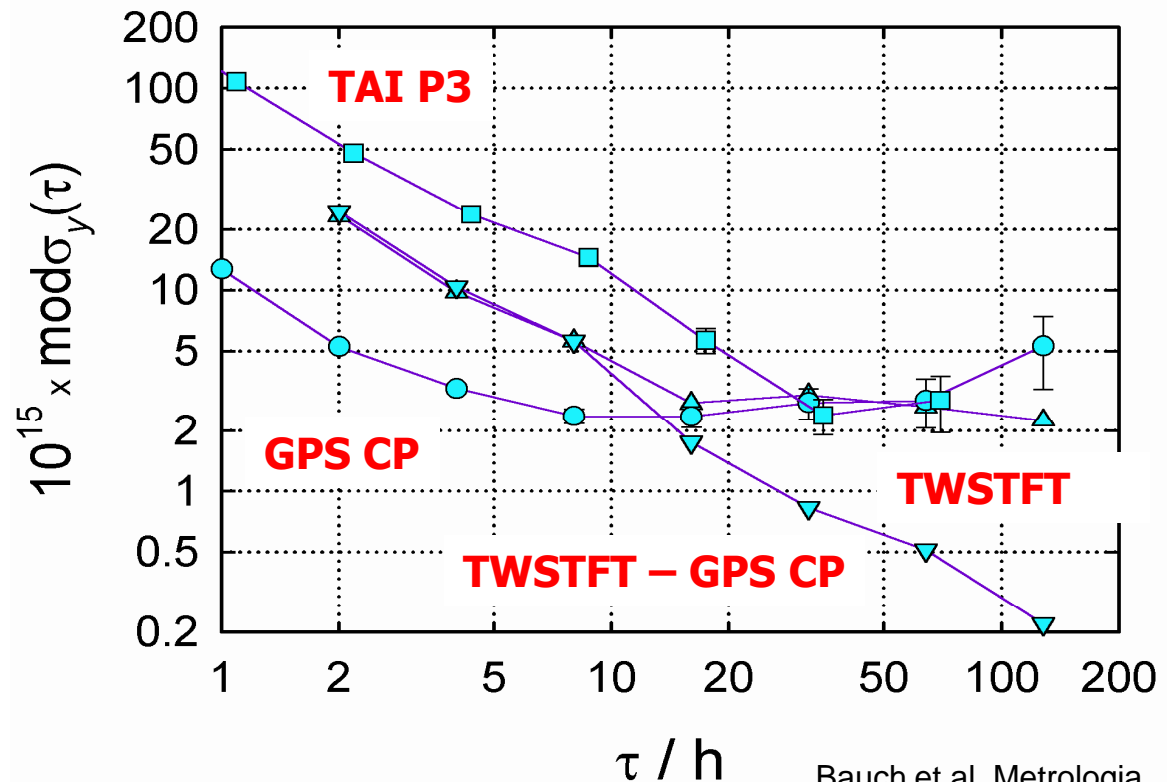
Comparaisons de temps ou de fréquence : se limiter ici à fréquence

- Méthodes courantes : GNSS, TWSTFT
- Méthodes nouvelles : T2L2, liens fibrés, MWL ACES
- Méthodes futures : TW-phase, lien laser cohérent, ...



# Comparaisons par GNSS et TWSTFT

Comparaisons limitées à une résolution de fréquence d'environ  $10^{-15}$  sur 24 heures



Bauch et al, Metrologia  
43 (2006) 109-120

**Enjeu majeur : réaliser des comparaisons avec une résolution adéquate pour les horloges optiques.**

# Nouvelles méthodes de comparaison

---

- T2L2 : *Voir présentation E. Samain*
  - Lien laser sol-satellite-sol, en vol sur Jason-2 depuis 2008
  - Objectif  $10^{-16}$  sur un jour
- Lien « MWL » de ACES :
  - Lien micro-onde, multi-voies, multi-fréquences, code et phase
  - Modèle de vol en construction pour ACES
  - Objectif  $< 10^{-16}$  sur un jour (intercontinental, dans mission ACES)
- Liens optiques fibrés : *Voir présentation A. Amy-Klein*
  - Résolution  $< 10^{-19}$  sur un jour, démontré sur 100s km
  - Lien France-Allemagne en cours, Equipex REFIMEVE déposé

# Méthodes futures de comparaisons

---

- Lien laser satellite cohérent : *Voir présentation K. Djerroud*
- TWSTFT phase :
  - Utiliser phase du signal en plus du code
  - Bonne accessibilité (satellites de télécommunications)
  - Objectif  $10^{-16}$  en un jour
- Galileo, nouveaux concepts de systèmes de satellites (USTAR,...)

# Echelles de temps

---

Echelle de temps = horloge + origine

Le 4<sup>ème</sup> coordonné du référentiel

Peut être « simple » ou « composite », « physique » ou « papier »

- Exemples
- Enjeux

# Exemples d'échelles de temps

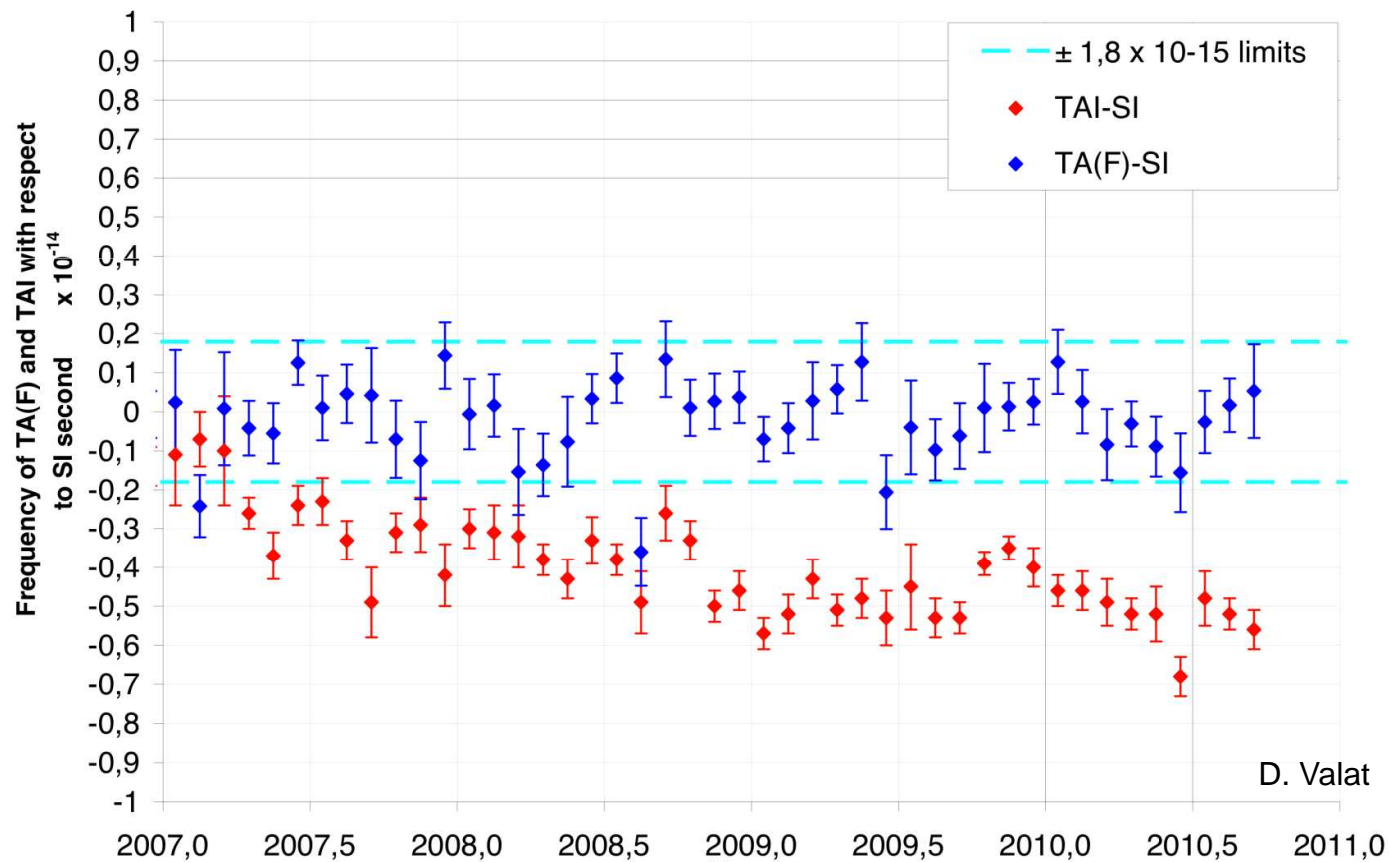
---

- UTC :
  - Échelle composite papier, calculée mensuellement par BIPM
  - Référence mondiale normalisée et reconnue
  - Réalisation du TT
- UTC(OP) :
  - Échelle physique
  - Approximation/lissage temps réel de UTC
  - Référence nationale opérationnelle
  - $|\text{UTC}-\text{UTC(OP)}| < \sim 70 \text{ ns}$ , incertitude  $\sim 1,5 \text{ ns}$



# Exemple : Temps Atomique Français

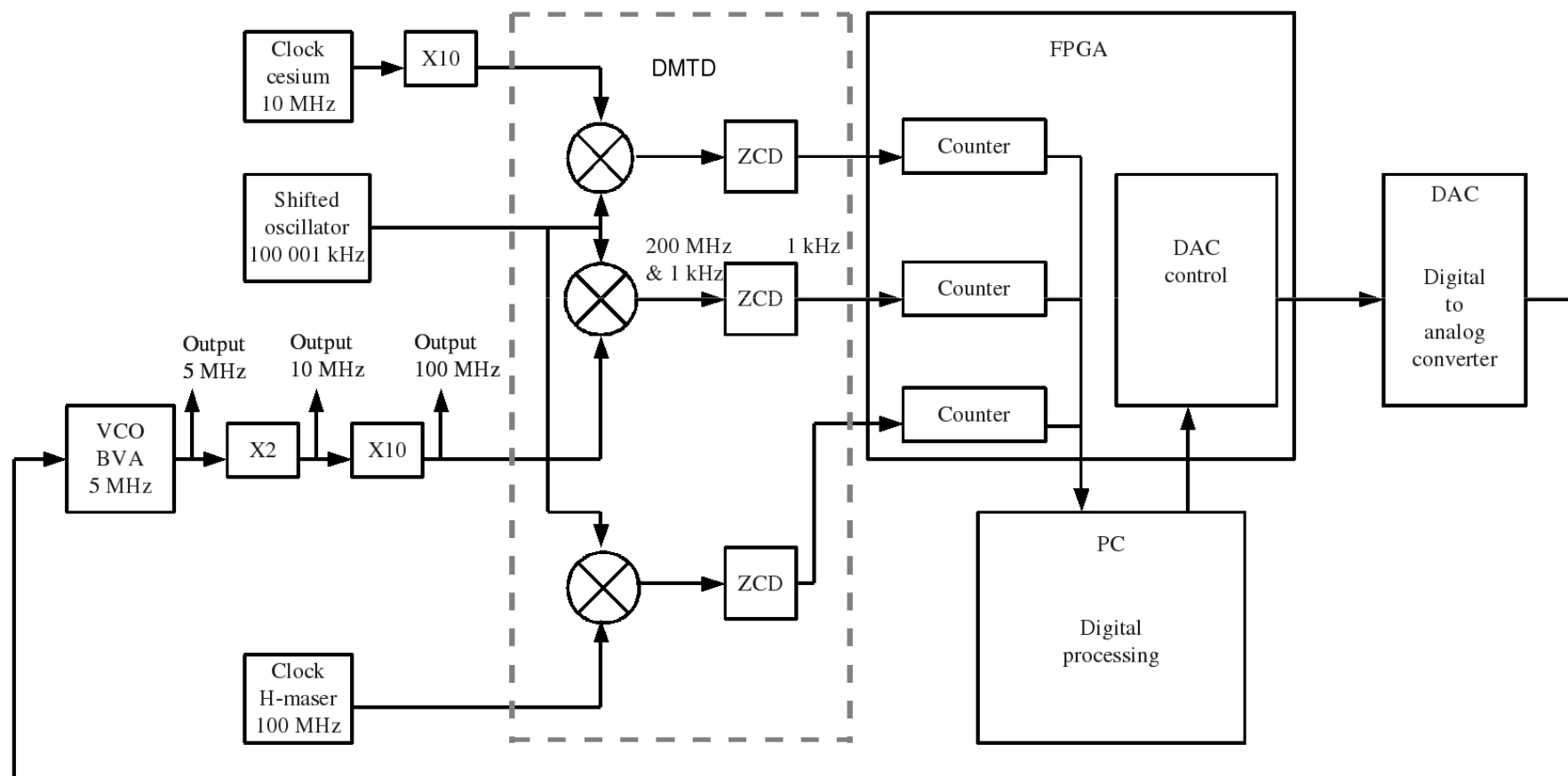
Collaboration entre 9 labos/agences/industriels français, utilise horloges opérationnelles et fontaines, échelle de temps composite papier, objectif exactitude de fréquence :



D. Valat

# Exemple : une horloge composite physique

Thèse de C. Plantard (UTINAM)



# Echelles de temps : enjeux

---

- Court terme :
  - Améliorer performances et fiabilité des horloges/échelles composites physiques pour diverses applications
  - Soutien à Galileo. Demande de prédiction plus exacte de UTC en restant quasi-temps réel
- Long terme : traduire l'amélioration des étalons de fréquence et méthodes de comparaison dans les échelles de temps (étalonnage absolu des équipements, algorithmie)

# Acteurs français, structures, services

## Labex FIRST-TF



N. Dimarcq

# Acteurs français, structures, services

---

## Réseaux existants :

- INSU – Moyen national temps-fréquence : SYRTE, UTINAM, GEOAZUR (transfert au GRAM ?)
- LNE : SYRTE, LTFB = UTINAM+FEMTO-ST

## Services :

- Réalisation des références nationales
- Participation/raccordement international
- Diffusion aux utilisateurs : France Inter, GPS, NTP, LORAN-C, horloge parlante, étalonnages, soutien aux projets scientifiques...

# Perspectives

---

## Métrologie de l'espace

- Un système de référence céleste optique et radio unifié, dense, ultra-précis (quelques dizaines de  $\mu\text{as}$ )
- Des observations continues 24h/24h pour étudier les effets sub-diurnes dans la rotation de la Terre
- De nouvelles méthodes d'analyse pour combiner les observations VLBI et de géodésie spatiale afin de tirer parti des avantages de chaque technique
- La mise en place d'observatoires géodésiques fondamentaux, notamment à Tahiti  
*Equipex RESIF*

# Perspectives

---

## Temps-fréquence

- Redéfinition de la seconde :
  - Horloges optiques
  - Nouvelles méthodes de comparaisons à distance
  - Échelles de temps
- Fort impact du spatial. Soutien/transfert à l'industrie
- *Equipex REFIMEVE et Labex FIRST-TF*

## Services permanents pour la métrologie du temps et de l'espace