



LABORATOIRE
NATIONAL
DE MÉTROLOGIE
ET D'ESSAIS



PSL
UNIVERSITÉ PARIS



SORBONNE
UNIVERSITÉ



Systemes de Référence Temps-Espace

SYRTE

Le rôle du SYRTE dans la métrologie nationale et internationale

Sébastien Bize

SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, LNE

Séminaire « LABO1 » SYRTE + IMCCE

23/04/2024

Observatoire de Paris

Who decides on the international system of units ?

□ Answer: the Member States of *Convention du mètre*.

- *Convention du mètre* (Metre Convention) is an international treaty. It was signed in Paris on 20 May 1875 (and revised in 1921).
- Today: 64 Member States (and 36 Associate States and Economies).

□ *Convention du mètre* created an international organization with three organs

- *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM): forum of representatives of Members States
- *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM): advisory committee of metrologists of high standing
- *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM): permanent institute that provides the necessary secretariat and laboratory facilities to support CGPM and CIPM.

□ Additional selected facts

- CIPM has consultative committees for specific units or topics
 - Ex: Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF). Consultative committee for Mass and Related Quantities (CCM). Consultative Committee for Units (CCU).
- 6 Regional metrology organizations (RMOs) gather national metrology institutes

Members of Convention du Mètre and RMOs

□ 64 Member States. 36 Associate States and Economies.

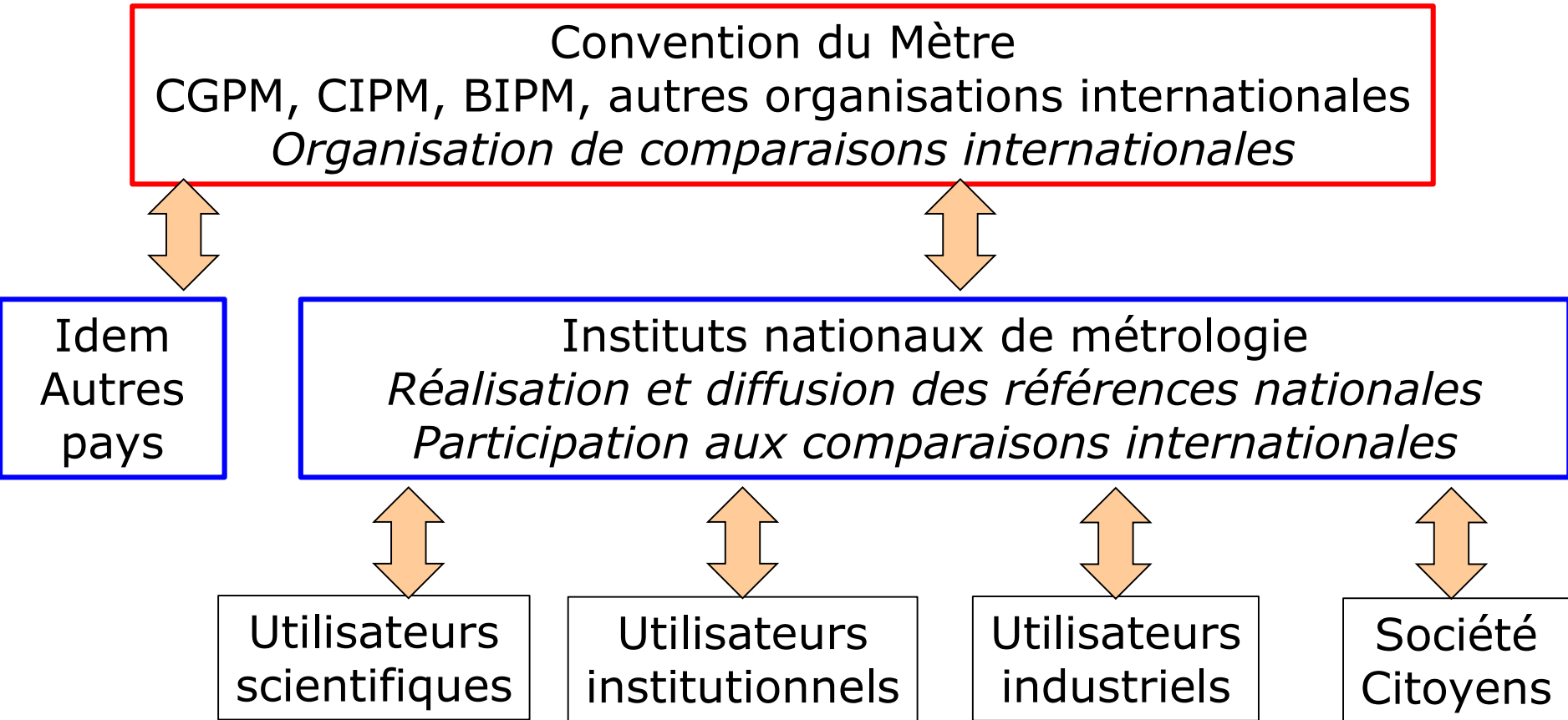
- <https://www.bipm.org/>



□ ~36 institutional liaisons

- IAU, ITU, IERS, IAG, CODATA, ISO, IEC, UNESCO, WHO, WMO, WTO, IAEA, UNFCCC, etc.

Diffusion du système international d'unités



□ But

- Assurer l'équivalence des références primaires pour assurer l'équivalence des mesures
- Pour le commerce, l'industrie, la science

Le rôle du SYRTE dans la métrologie nationale et internationale

- ❑ **Le SYRTE est « institut désigné » (*designated institute*) pour le temps-fréquence et la gravimétrie**
 - Dans le cadre du réseau national de la métrologie française piloté par la LNE
 - Décret n°2005-49 du 25 janvier 2005
- ❑ **L'Observatoire de Paris est en charge d'établir la valeur locale d'UTC**
 - UTC(OP), base du temps légal français
 - Décret n°2017-292 du 6 mars 2017
- ❑ **Pilotage**
 - Convention-cadre entre LNE, Observatoire de Paris, CNRS et SU.
 - Contrat-programme annuel supervisé par le Conseil scientifique temps-fréquence du Comité de la métrologie et la DRST du LNE
- ❑ **Service d'observation INSU-AA-ANO1-Horloges**
 - Coordonné par l'Observatoire de Paris
 - Mise en œuvre avec OSU THETA à Besançon et OSU OCA (reference de temps de la station de télémétrie laser MeO)
- ❑ **Service d'observation Gravimétrie**
 - + infrastructure de recherche EPOS-France, resp. du PIN PGrav de l'INSU

Activités de pilotage et de coordination

□ Participation aux instances internationales

- CCTF, CCM et Groupes de travail permanents et *ad hoc* du CCTF, du CCM (+CCL, CCU)
 - CCL-CCTF WGFS, CCTF WGATFT, CCTF WGMRA, CCTF WGSP, CCTF WGTWSTFT, CCTF WGALGO, CCTF WGGNSS, CCTF WGPSFS, CCTF WGTAI, CCM WG gravimetry
 - Task group on the redefinition of the second
 - Task group on Continuous UTC
 - Task group on Traceability though GNSS measures
- Commission A de l'IAU WG on time metrology standards, de l'IAG
- Présidence du groupe de travail WP7A de l'ITU-R

□ EURAMET

- Technical committee on time and frequency (TC-TF): Présidence
- TC-Q
- Programme de recherche European Partnership in Metrology

□ Pilotage du Labex national et de la fédération de recherche FIRST-TF

- 5 cores labs. ~60 members acting in T&F including ~30 companies.

□ Co-pilotage (avec le LPL) de l'infrastructure de recherche REFIMEVE

- Dissémination des références du SYRTE via le réseau fibré de RENATER
- 2 Equipex successifs. ~30 labos et instituts, dont ESRF, SOLEIL, CERN, 3 connexions européennes

Current definition of the SI system

□ CGPM 2018 Resolution 1



On the revision of the International System of Units (SI)

7

Resolution 1

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

...
decides that, effective from 20 May 2019, the International System of Units, the SI, is the system of units in which:

- ♦ the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ is 9 192 631 770 Hz,
- ♦ the speed of light in vacuum c is 299 792 458 m/s,
- ♦ the Planck constant h is $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s,
- ♦ the elementary charge e is $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C,
- ♦ the Boltzmann constant k is $1.380\,649 \times 10^{-23}$ J/K,
- ♦ the Avogadro constant N_{A} is $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- ♦ the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd} , is 683 lm/W,

- The system of units is set by fixing 5 numerical constraints to the fundamental framework defined by general relativity + the standard model of particle physics

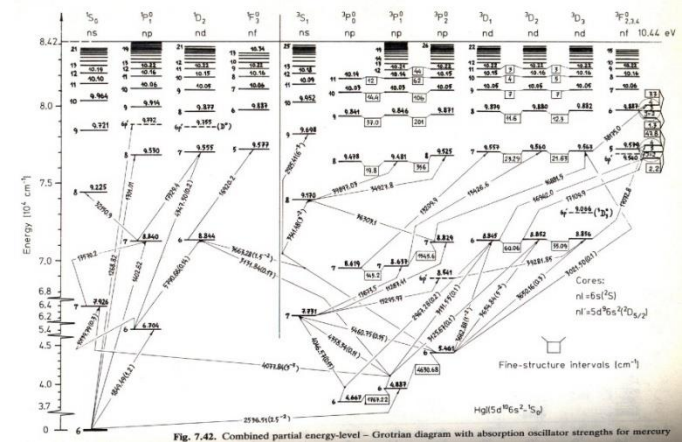
$$\Delta\nu_{\text{Cs}}, c, h, e, k$$

□ L'unité astronomique est définie à partir du mètre SI

- 1 AU = 149 597 870 700 m (IAU resolution B2 2012)

Niveaux d'énergie et fréquences atomiques

□ Les atomes ont des niveaux d'énergie discrets, quantifiés



□ A une différence d'énergie entre deux niveaux correspond une fréquence

- via la relation de Planck-Einstein

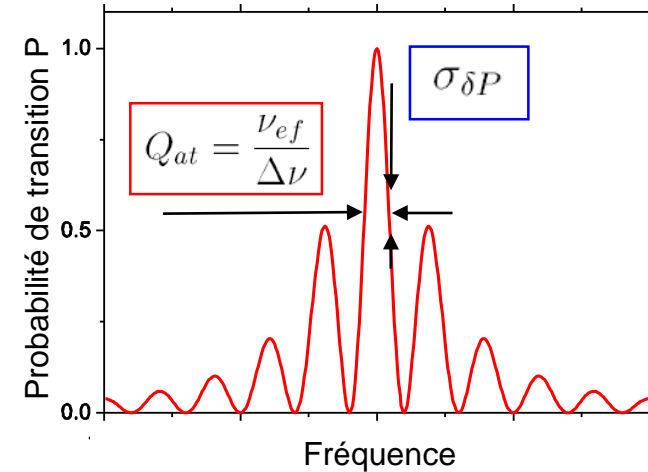
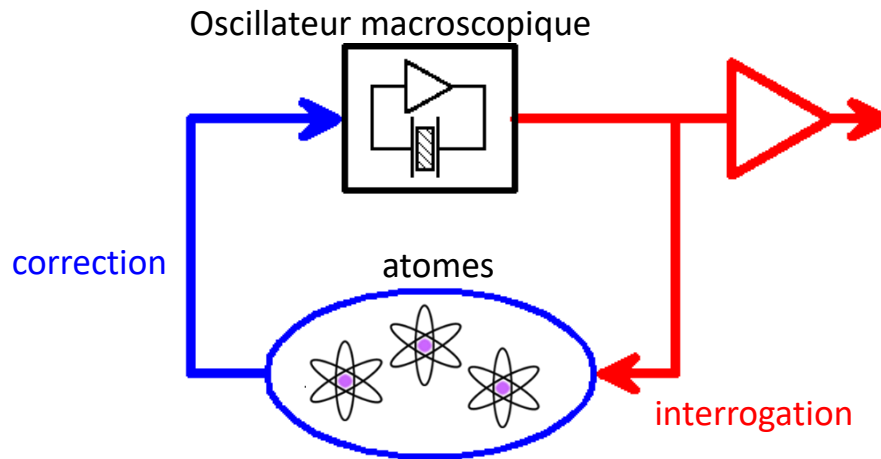
$$\hbar\omega_{ef} = h\nu_{ef} = E_e - E_f$$

□ Ces fréquences de Bohr d'un atome non perturbé sont *a priori* parfaitement stables et universelles

- 2 atomes de la même espèce sont identiques
- Les atomes ne s'usent pas, ne vieillissent pas

Étalons atomiques de fréquence

Architecture



Signal généré par un étalon de fréquence

- Un signal électromagnétique oscillant, macroscopique, concrètement utilisable, dont la fréquence est liée à la transition atomique
- Affecté d'un déplacement et d'un bruit de fréquence

$$\omega(t) = \omega_{ef} \times (1 + \varepsilon + y(t))$$

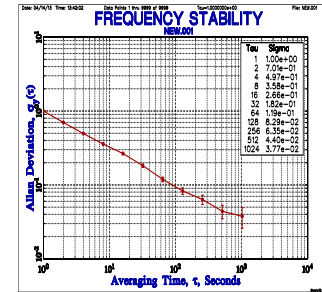
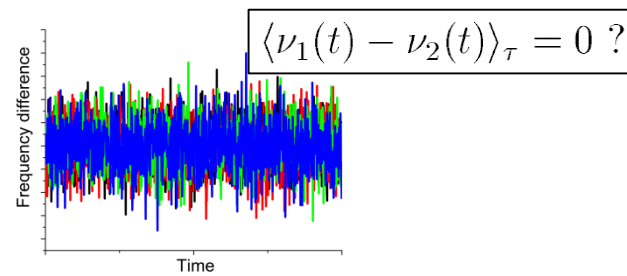
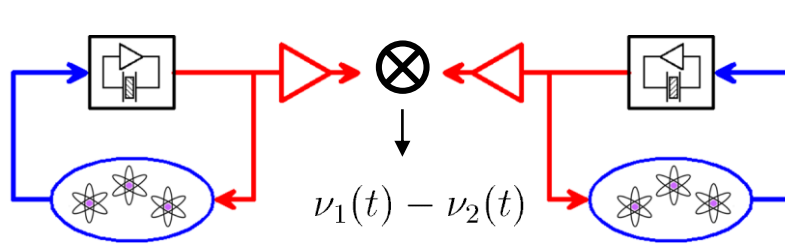
Propriétés essentielles des étalons de fréquence

- Exactitude : incertitude totale sur le déplacement ε
- Stabilité : propriété des fluctuations $y(t)$, caractérisée par $\sigma_y(\tau)$

Des étalons de fréquence aux échelles de temps

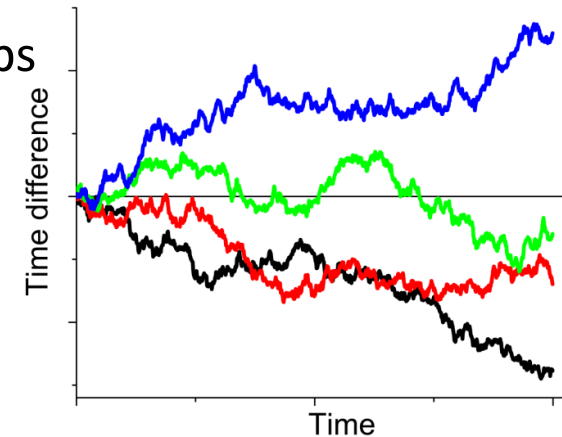
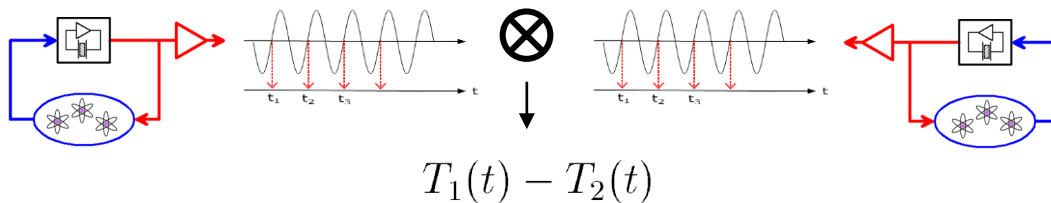
□ Comment savoir si l'exactitude est correctement évaluée ?

- Les comparaisons entre 2 étalons identiques (ou plus) sont essentielles



□ Deux échelles de temps complètement indépendantes finissent par diverger l'une de l'autre

- marche aléatoire (ou pire) de la différence de temps



□ Une unique échelle de temps de référence

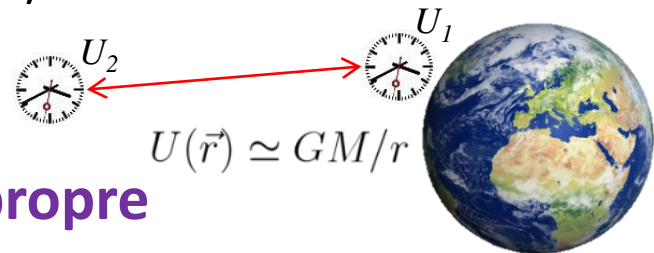
- Nécessaire pour une référence de temps cohérente à l'échelle globale
- TAI/UTC et réalisations physiques locales UTC(k) pilotées vers UTC
- Note: TAI/UTC diverge de la même manière par rapport à une « représentation idéale » du temps

Étalons de fréquence dans l'espace-temps courbe

□ L'espace-temps est modifié au voisinage des objets massifs

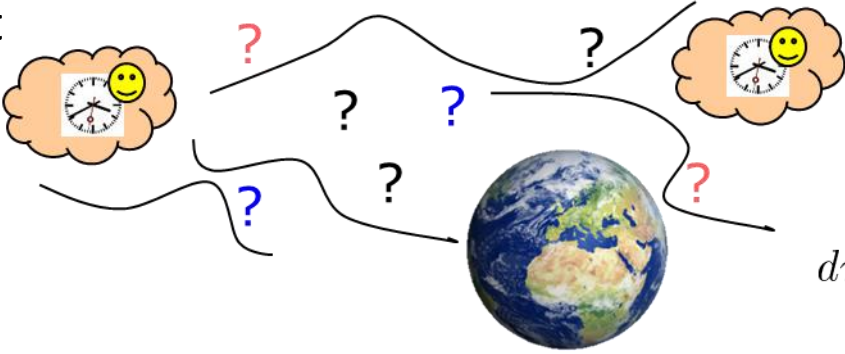
- Décrit par la relativité générale d'Einstein
- → déplacement gravitationnel vers le rouge: $10^{-16}/m$ à la surface de la Terre

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \left(1 - \frac{U_2 - U_1}{c^2} \right)$$



□ Un étalon de fréquence réalise son temps propre

- Valide dans un petit volume d'espace temps avoisinant qui peut être considéré comme plat



$$d\tau \simeq \left(1 - \frac{U(T, \vec{R})}{c^2} - \frac{1}{2} \frac{\vec{V}^2}{c^2} \right) dT,$$

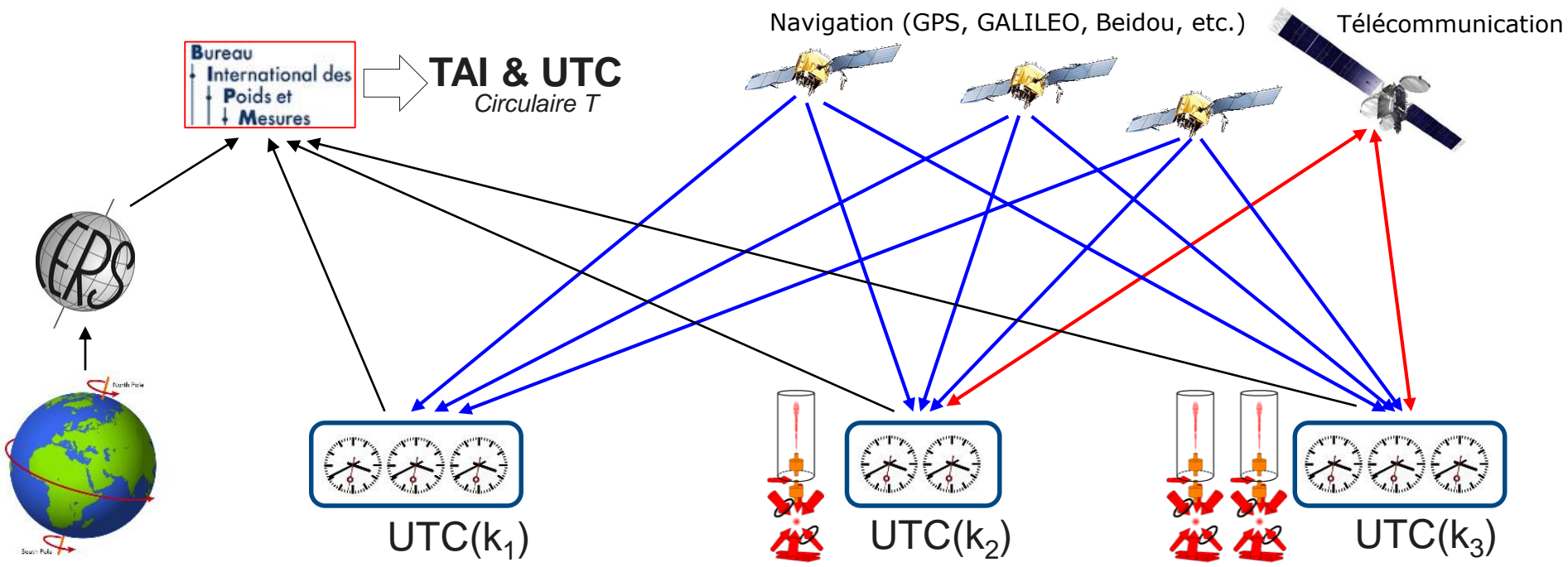
□ Inévitablement, les comparaisons d'étalons de fréquence au voisinage de la Terre sont des expériences de relativité générale

- Besoin de définir un système de coordonnées globale, de prendre en compte la gravité précisément, etc.
- L'élaboration du TAI ne fait pas exception. *TAI est une réalisation de TT lui-même défini par un taux constant par rapport au TCG, etc. (CGPM 2018 – Resolution 2, IAU 2000 Resolution B1.9)*

Elaboration du temps atomique international (TAI)

Architecture

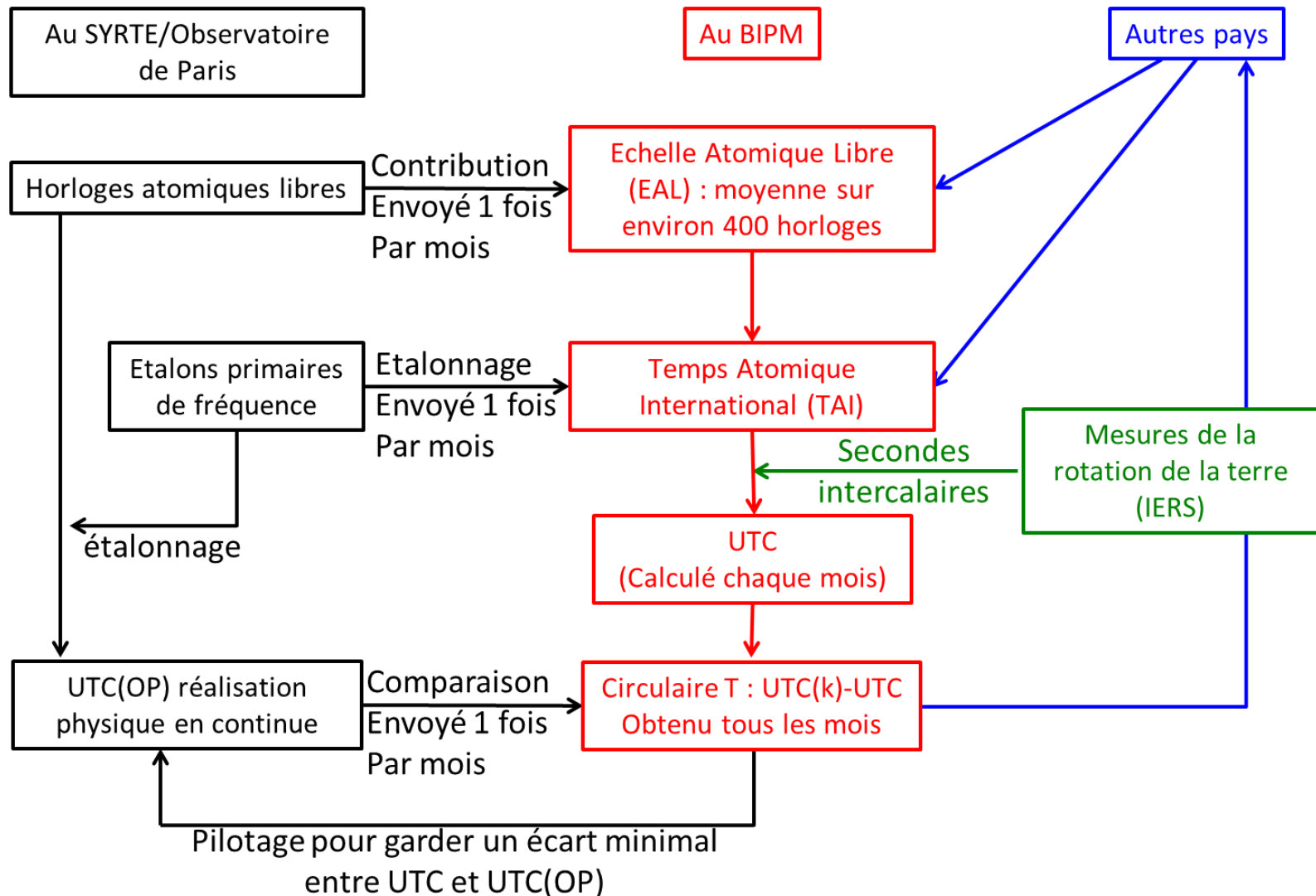
- ~400 étalons commerciaux comparés par méthodes satellitaires
- Et seulement quelques étalons primaires de quelques instituts



- Une ressource globale pour la science et la société
- Un mécanisme de vérification de l'équivalence des références primaires

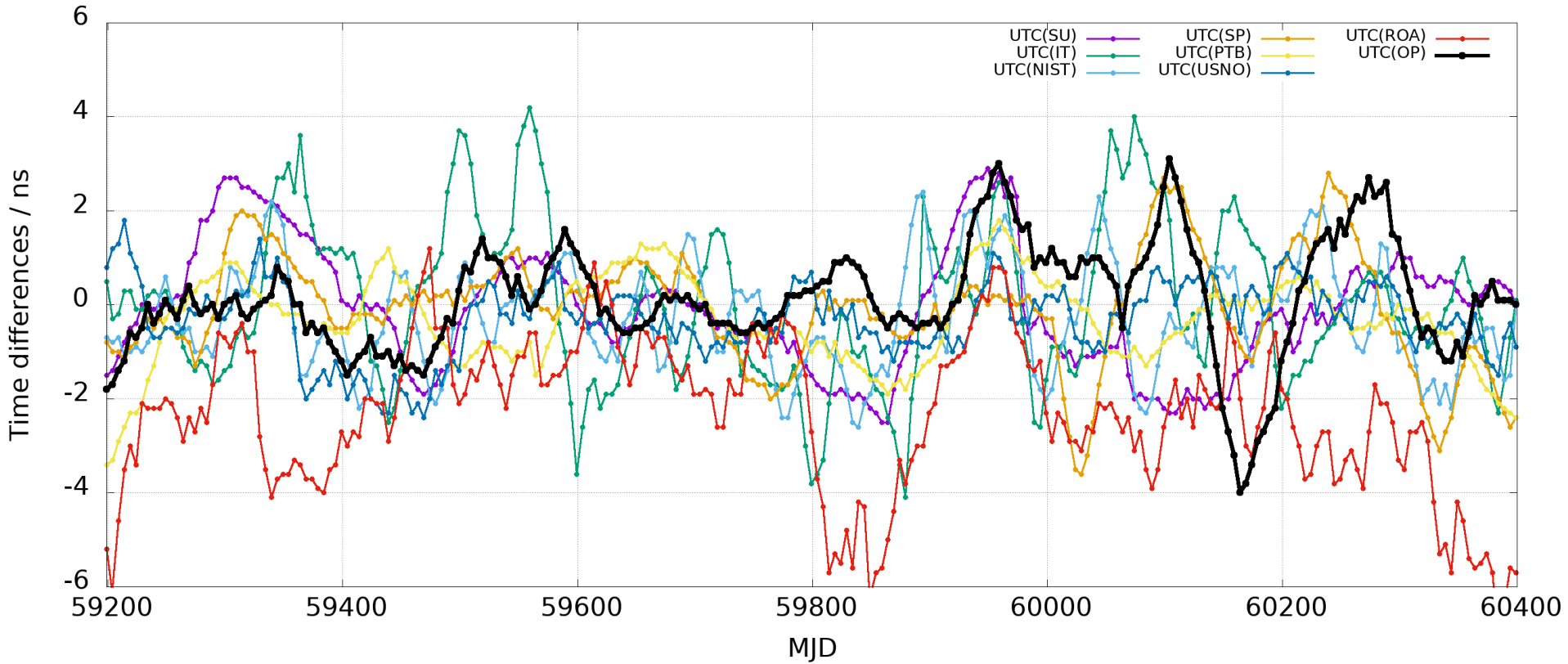
Elaboration de TAI, UTC & UTC(k)

□ Au LNE-SYRTE - Observatoire de Paris : UTC(OP)



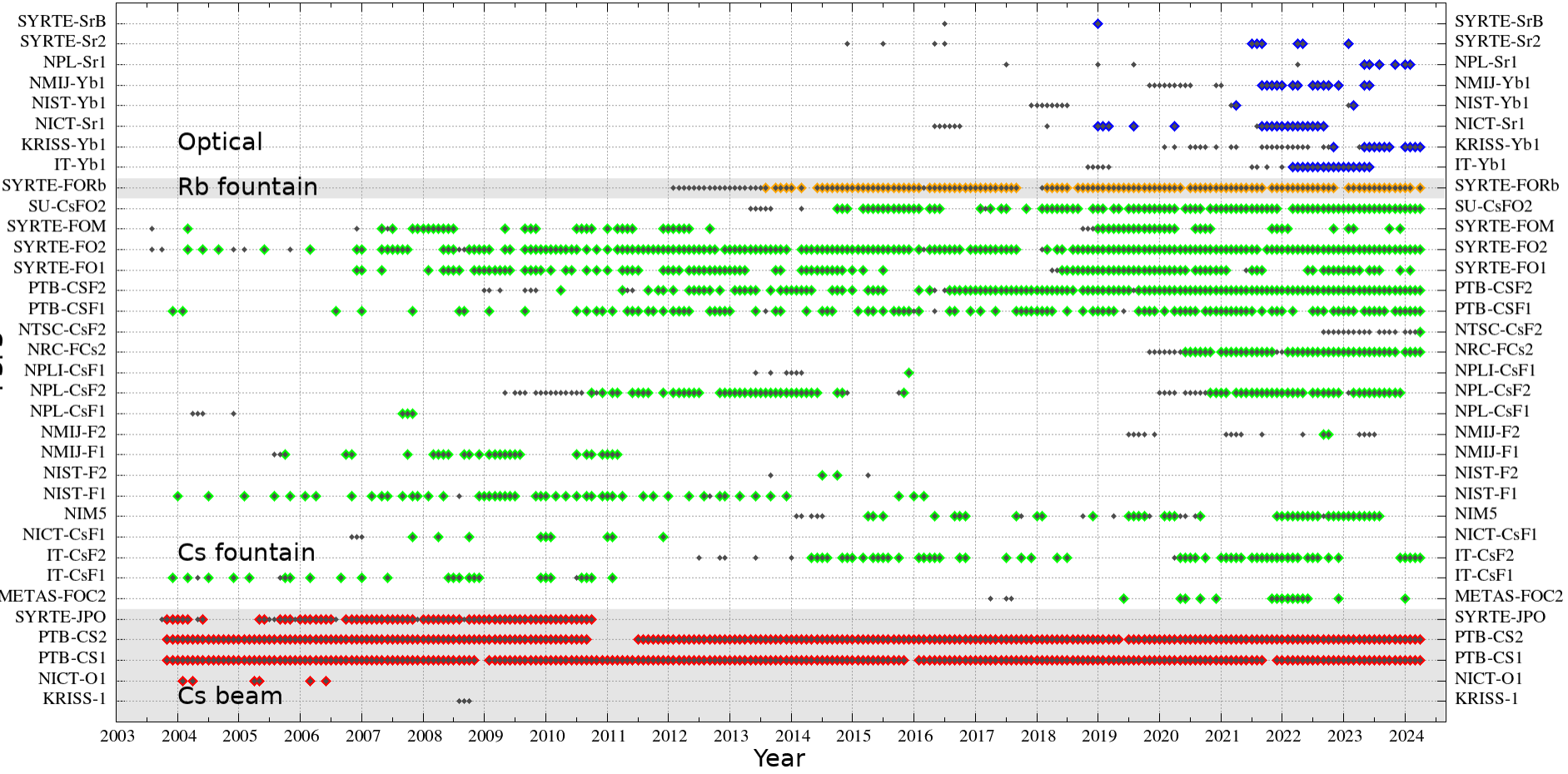
UTC(OP)-UTC

UTC-UTC(k) comparisons



Etalonnages du temps atomique international

Graphical representation of all evaluations of Primary and Secondary Frequency Standards reported since Circular T 190. Enhanced color dots indicate evaluations carried out within the month of TAI computation.



Dissémination des références nationales de temps

- ❑ **Par raccordement à UTC(OP)**
- ❑ **Par méthodes satellitaires dans le cadre du TA(F)**
 - Observatoire de Besançon (dont LNE-LTFB), de la Côte d'Azur, de Paris/site de Nançay
 - CNES, DGA
 - Orange, Spectracom Orolia, Keysight
 - Parc d'horloges commerciales : ~15 jets de césium, ~15 masers à hydrogène
- ❑ **ALS162 (sur porteuse à 162 kHz de l'émetteur d'Allouis)**
- ❑ **Internet (serveurs ntp)**
- ❑ **Système SYREF (en fréquence, basé sur GPS)**
 - ~20 sites industriels
- ❑ **Par le site internet heurelegalefrancaise.fr**
- ❑ **Au LNE-LTFB**
 - ~460 étalonnages certifiés par an de dispositifs industriels
- ❑ **Participation à EGNOS, au réseau IGS**
- ❑ **Contribution à GALILEO**
- ❑ **Étalonnage de récepteur GNSS pour la région EURAMET**

Dissémination des références nationales de temps

□ Mise en œuvre d'un système qualité formalisé

- Selon les prescription du CIPM MRA et la norme ISO17025-2017
 - CIPM Mutual Recognition Arrangement is a framework through which National Metrology Institutes (NMI) demonstrates the international equivalence of their standards and have their Calibration and Measurement Capabilities (CMC) internationally recognized.
- Participation à un système d'audits interne, par les pairs au niveau de EURAMET et entre RMOs

Gravimétrie

□ Point de référence gravimétrique au LNE Trappes

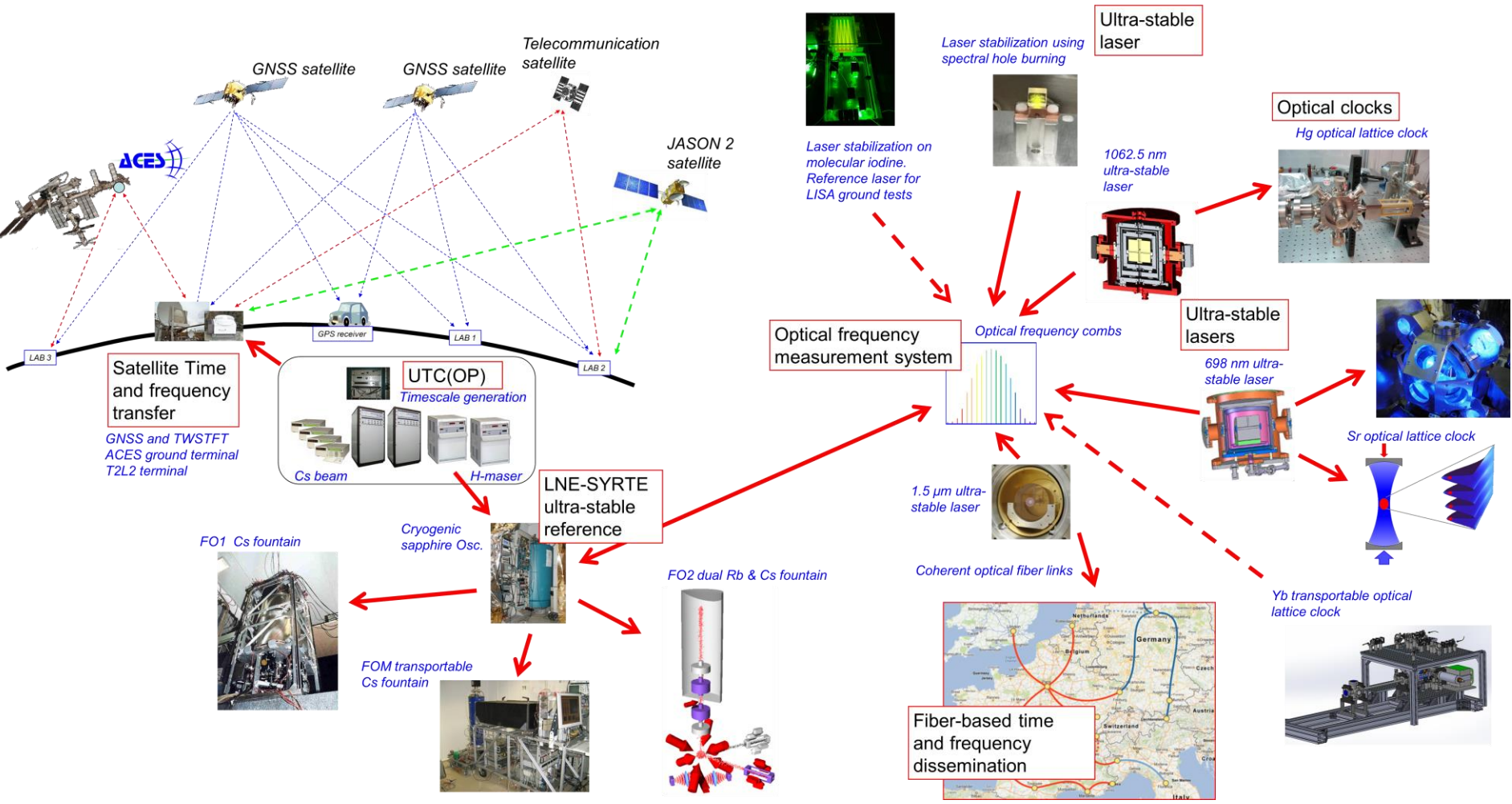
- Mesures par un gravimètre atomique absolu
- Suivi continu par un gravimètre supraconducteur
- Transferts à l'aide d'un gravimètre à ressort
- + récepteur GNSS géodésique



□ Participation à des comparaisons clés internationales

- Avec le gravimètre atomique absolu (qui est transportable)
- Avec d'autres gravimètres du parc français

Ensemble d'horloges du SYRTE



Quelques enjeux dans le domaine de la métrologie



- ❑ **Maintien en opération des références nationales de temps**
 - Un système de plus de 100 instruments qui doit fonctionner 24/7.
 - Passage à l'UTC continu. Dissémination de UT1 par NTP.
- ❑ **Développement de l'utilisation GALILEO (et du multi-GNSS)**
 - et passage en phase opérationnelle de EGNOS v3
- ❑ **Mission spatiale ACES**
 - Lancement en janvier 2025
- ❑ **Redéfinition de la seconde à partir de transition(s) optique(s)**
 - Atteindre $<1E-18$. Consolider. Fiabiliser.
 - Contribuer activement aux choix de redéfinition.
- ❑ **Extension, utilisation et maintien de l'infrastructure REFIMEVE**
- ❑ **Développer des nouvelles architectures pour des échelles de temps optiques**
- ❑ **Accompagner l'adoption généralisée des gravimètres atomiques**

