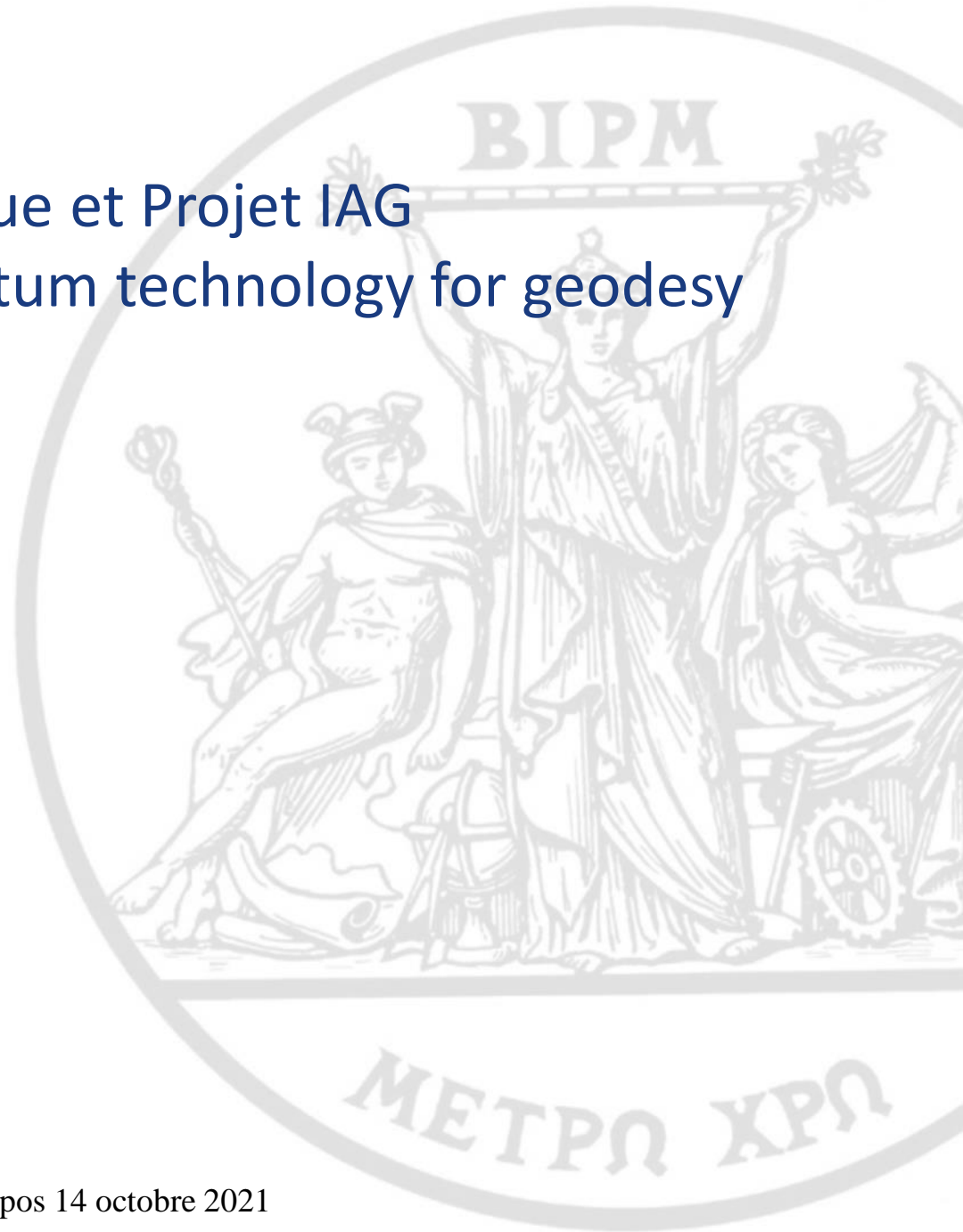


Géodésie chronométrique et Projet IAG Novel sensors and quantum technology for geodesy (QuGe)

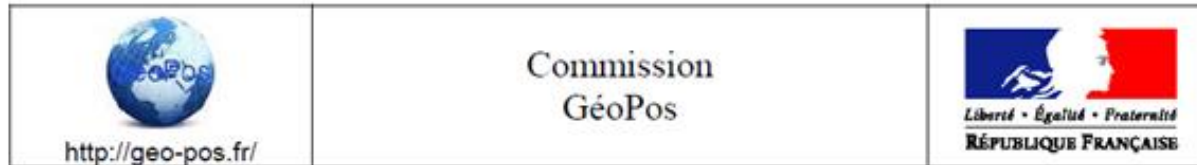
Gérard Petit
Bureau International des Poids et
Mesures
92312 Sèvres Cedex, France



Bureau
International des
Poids et
Mesures

Geopos 14 octobre 2021

Une première présentation il y a deux ans (octobre 2019)



Après-midi : Conférences scientifiques

Thème scientifique des conférences : les unités du SI appliquées à la géodésie.

Le SI nouveau est arrivé	Marc Himbert (LNE-LCM /CNAM)	14 :00	40 min
L'échelle de l'ITRF et les échelles des techniques spatiales: DORIS, GNSS, SLR et VLBI.	Paul Rebischung (IGN)	14:40	40 min
Géodésie chronométrique relativiste	Gérard Petit (BIPM)	15 :20	40 min
La télémétrie grande distance	Jean-Pierre Wallerand (Laboratoire Commun de Métrologie LNE/CNAM)	16h00	40 min
La gravimétrie dans le SI révisé	Sébastien Merlet (LNE-SYRTE)	16h40	40 min

-
- ◆ **[RAPPELS] Potentiel de pesanteur + horloges = géodésie chronométrique relativiste**
 - ◆ Progrès des horloges optiques, vers une redéfinition de la seconde
 - ◆ Géodésie chronométrique et le projet IAG QuGe

Formulation Relativiste: comparer deux horloges (1/3)

- ◆ Relativité générale: Temps propre vs. temps coordonnée

$$d\tau / dt = 1 - 1/c^2 [U(t,x) + v^2/2]$$

- ◆ Pour une horloge immobile sur Terre, v est due à la rotation de la Terre ω

$$d\tau / dt = 1 - 1/c^2 [U(t,x) + \omega^2 r^2/2]$$

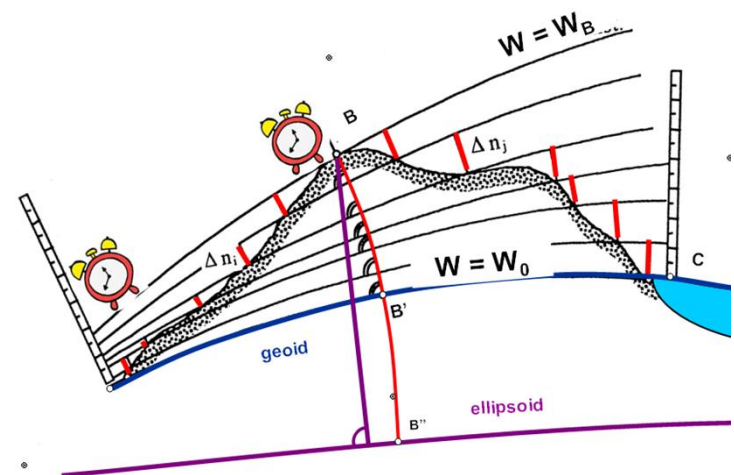
$$d\tau / dt = 1 - W/c^2$$

où **W est le potentiel de pesanteur (gravitation + rotation)** à l'emplacement de l'horloge.

- ◆ Pour deux horloges:

$$d\tau_A / d\tau_B \approx 1 + (W_B - W_A)/c^2$$

- ◆ Deux horloges idéales, avec une même valeur du potentiel de pesanteur, ont la même marche
- ◆ Pour comparer deux horloges il faut prendre en compte la différence du potentiel de pesanteur aux deux points.



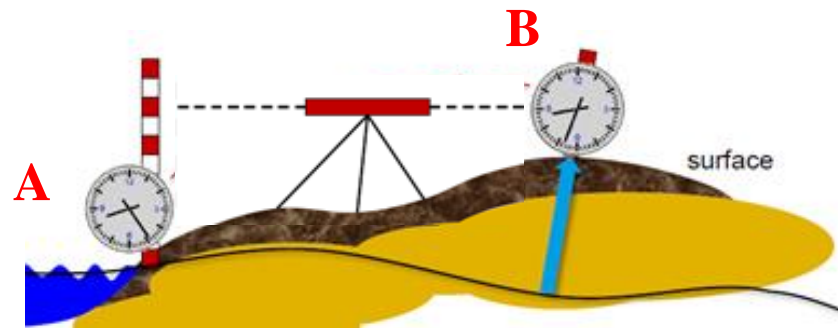
Comparer deux horloges... (2/3)

$$d\tau_A/d\tau_B \approx 1 + (W_B - W_A)/c^2$$

- ◆ Cet effet de “**décalage relativiste de la fréquence**” d’une horloge n’est **pas du tout négligeable** pour les horloges atomiques:
 - Environ 1×10^{-16} sur la fréquence par mètre d’altitude
 - Environ 1.7×10^{-13} entre le labo américain du NIST à Boulder (Colorado) et l’Observatoire de Paris
 - Environ 4.5×10^{-10} entre une horloge sur Terre et une horloge d’un satellite GPS

Il faut absolument en tenir compte pour comparer les horloges!

Horloge B en altitude, $W_B < W_A$,
elle prend de l’avance

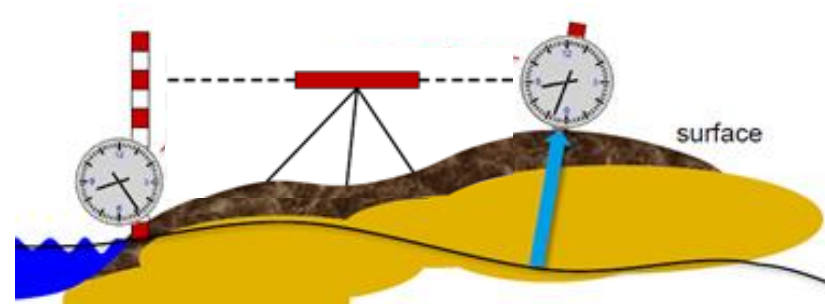


Comparer deux horloges... (3/3)

$$d\tau_A/d\tau_B \approx 1 + (W_B - W_A)/c^2$$

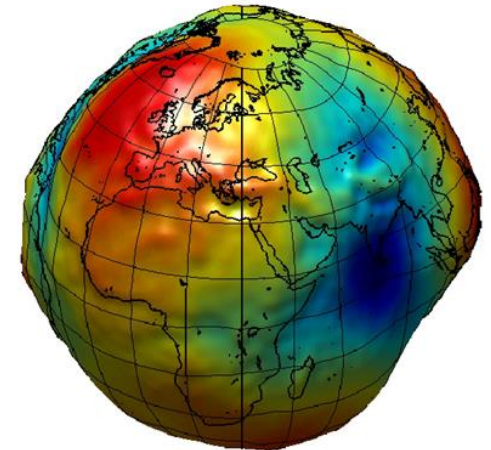
◆ 1ère option:

Si les deux horloges sont assez proches, on peut calculer $\Delta W = - \int g \cdot dH$ par intégration sur le trajet les reliant. On a donc besoin de connaître l'accélération de la pesanteur g et la différence d'altitude H .



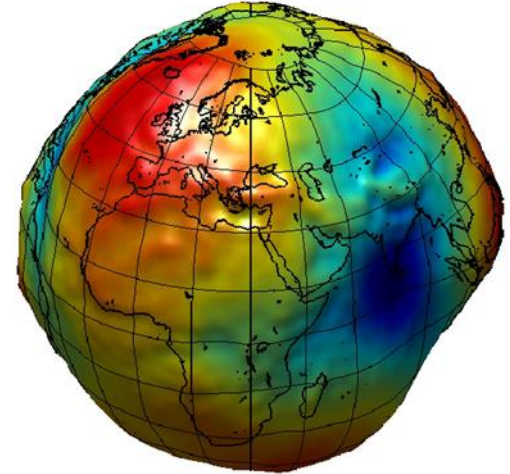
◆ 2ème option: Calcul avec modèles

- Modèle global du géopotential (GG)
- Géoïde régional calé sur modèle global (RG)
- Réseau de nivellement calé sur modèle global (LN)



Mix Global model and Regional information

- ◆ Use a global geopotential model to obtain the long wavelengths of the gravity potential
 - E.g. from GRACE / GOCE or EGM2008 (Pavlis et al 2008)
- ◆ Use regional information (gravity or geoid) to obtain the medium wavelength structure. Possibly add very short wavelength (local) information.
- ◆ Recent work:
 - NIST: Pavlis and Weiss (Metrologia, 2017) states 6×10^{-18} uncertainty. All three methods have been used, some weighted average chosen. Overall uncertainty estimated to be 0.6×10^{-17}
 - Denker et al. 2017 for SYRTE, PTB, later extended to other labs in Italy and UK. States 2×10^{-18} uncertainty using GNSS and Geoid EGG2015 .



Géodésie chronométrique relativiste

- ◆ Si on veut calculer le décalage relativiste de fréquence avec une exactitude meilleure que l'exactitude des horloges
 - Pour les fontaines à Cs actuelles (exactitude de fréquence de 1×10^{-16} , soit environ 1 m sur l'altitude), c'est assez facile à obtenir.
 - Pour les nouvelles horloges à 10^{-18} il faut 1 cm sur l'altitude...???????

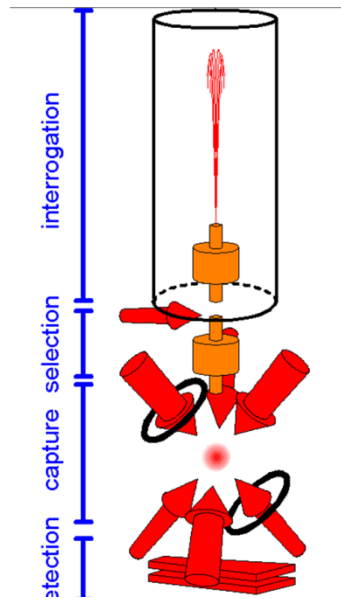
Mais on peut inverser le problème

- ◆ Si on a des horloges exactes (ou répétables) au niveau de 1×10^{-18}
 - Plusieurs types d'horloges optiques ont déjà atteint ce niveau de performance.
 - Reste à les rendre fiables, transportables,...
- ◆ Et si on peut les comparer entre elles au niveau de 1×10^{-18}
 - Par exemple avec des liens fibrés (sur un continent)
- ◆ **Alors on pourra mesurer directement le potentiel de pesanteur, et donc les altitudes, au niveau de 1cm**, partout où on pourra installer ces horloges et les comparer

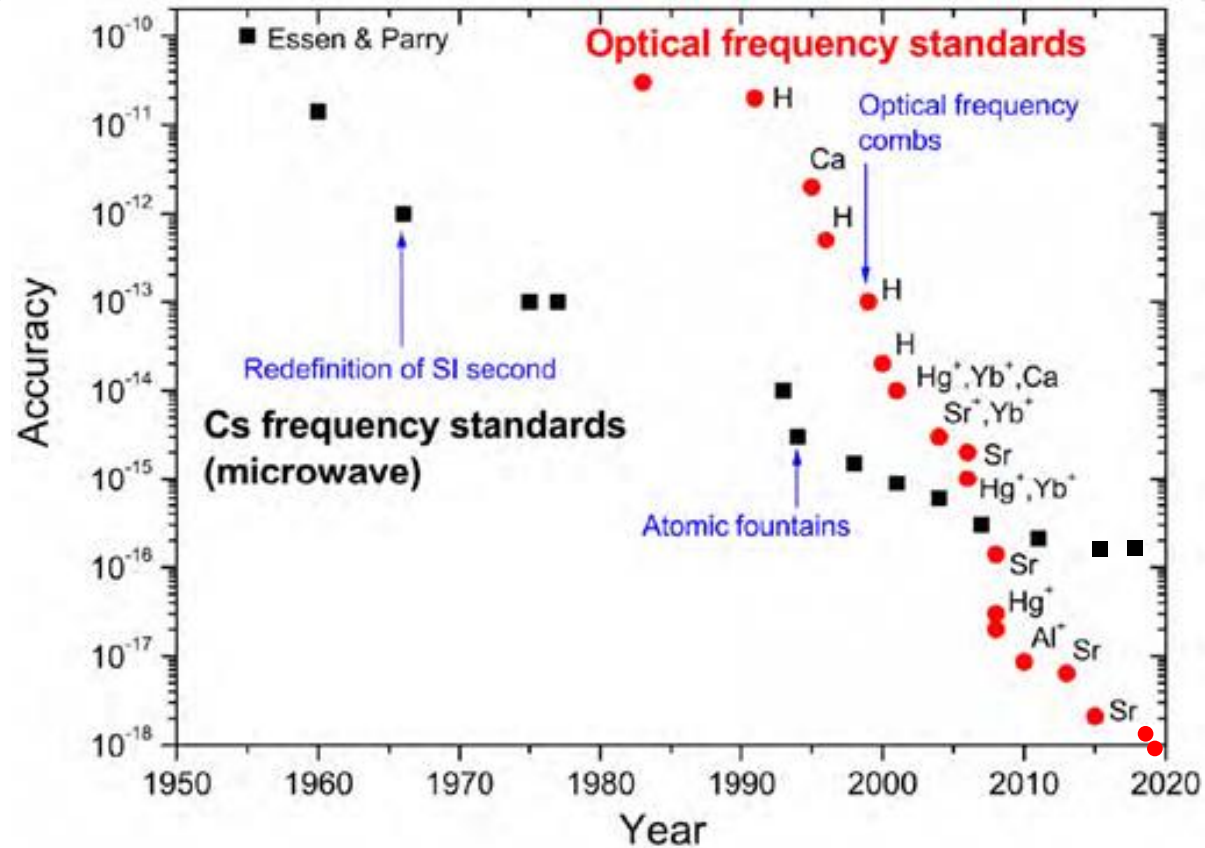
-
- ◆ [RAPPELS] Potentiel de pesanteur + horloges = géodésie chronométrique relativiste
 - ◆ **Progrès des horloges optiques, vers une redéfinition de la seconde**
 - ◆ Géodésie chronométrique et le projet IAG QuGe

Progresses of frequency standards

- ◆ Cs fountains now at 1×10^{-16} , close to their limit.



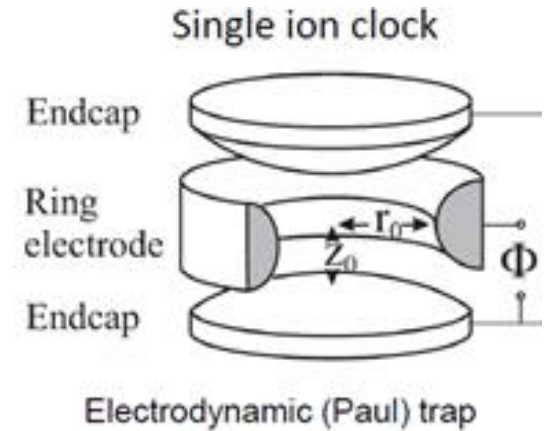
- ◆ Optical frequency standards have been easy to handle since frequency combs appeared. They are now in the low $\times 10^{-18}$.



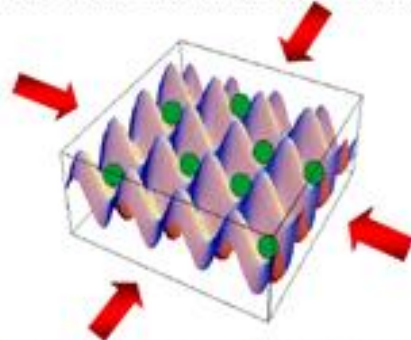
From S. Bize

Progresses of frequency standards

- ◆ Two main types of optical frequency standards
 - (Single) ion in an EM trap
 - ◆ Low SNR
 - ◆ Lots of studied ions
 - (Many) neutral atoms trapped in a lattice
 - ◆ High SNR
 - ◆ Reduce shifts / interactions between atoms



Neutral atom lattice clock



From F. Riehle

- $10^4 - 10^6$ atoms can be interrogated
- High S/N; high frequency stability



Progresses in optical clocks performance

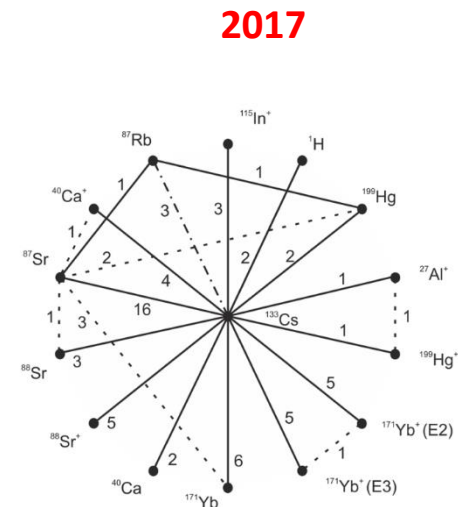
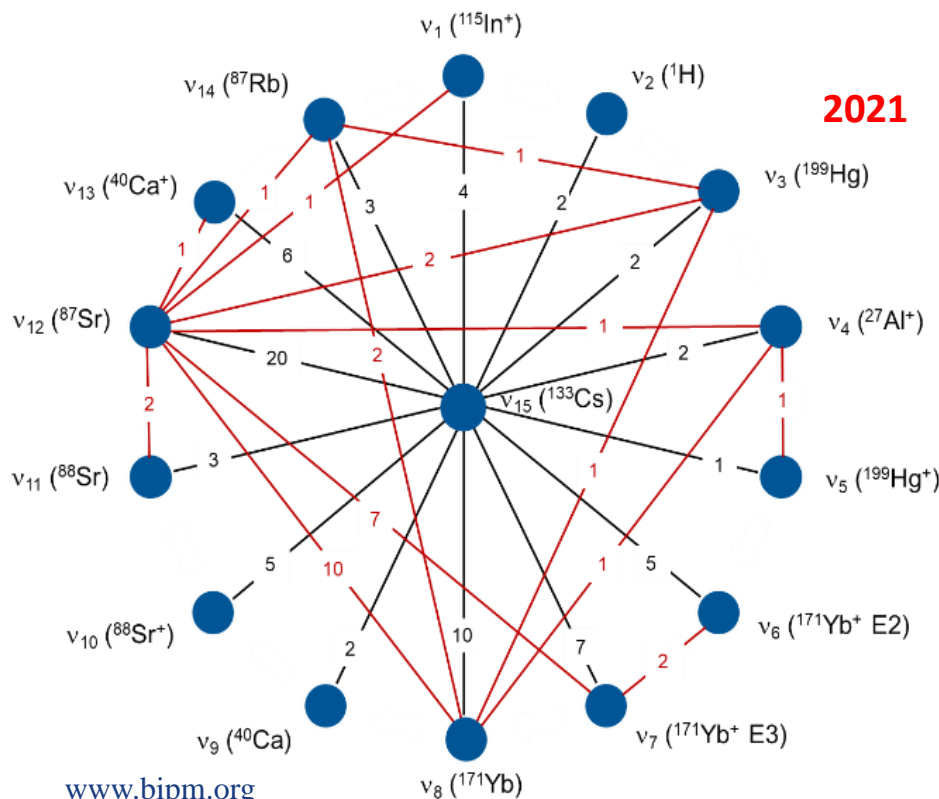
- For many of the optical transitions, the uncertainty on the estimation of systematic shifts is much lower than for Cs.
- Frequency measurements with uncertainty budget $< 3 \times 10^{-18}$, to date (2021):
 - $\nu(^{27}\text{Al}^+)$ 9.4×10^{-19} (Brewer et al. 2019) NIST
 - $\nu(^{171}\text{Yb})$ 1.4×10^{-18} (McGrew et al. 2018) NIST
 - $\nu(^{87}\text{Sr})$ 2.0×10^{-18} (Bothwell et al. 2019) JILA
also 2.1×10^{-18} (Nicholson et al. 2015) JILA
 - $\nu(^{171}\text{Yb}+\text{E3})$ 2.7×10^{-18} (Sanner et al. 2019) PTB
 - At least six more with uncertainty budget $< 1 \times 10^{-17}$
- In several cases, two units are built and compared to a similar level of accuracy e.g. for $\nu(^{171}\text{Yb})$ 9.4×10^{-19} (McGrew et al. 2018) NIST
- These transitions are also compared to the Cs transition with uncertainty **limited by the Cs fountains (low 10^{-16})**

Comparisons between optical clocks

- ◆ Optical frequency ratios are being measured with much smaller uncertainty than the comparison to Cs e.g.
 - $\nu(^{27}\text{Al}^+) / \nu(^{171}\text{Yb})$ 6.0×10^{-18} (Beloy et al. 2021) NIST
 - $\nu(^{27}\text{Al}^+) / \nu(^{87}\text{Sr})$ 8.0×10^{-18} (Beloy et al. 2021) NIST-JILA
 - $\nu(^{171}\text{Yb}) / \nu(^{87}\text{Sr})$ 6.8×10^{-18} (Beloy et al. 2021) NIST-JILA
 - $\nu(^{88}\text{Sr}) / \nu(^{87}\text{Sr})$ 2.3×10^{-17} (Takano et al. 2017) RIKEN/Tokyo
 - $\nu(^{88}\text{Sr}) / \nu(^{87}\text{Sr})$ 2.8×10^{-17} (Origlia et al. 2018) PTB
 - $\nu(^{171}\text{Yb}^+\text{E3}) / \nu(^{87}\text{Sr})$ 2.8×10^{-17} (Dorscher et al. 2020) PTB
 - Etc.....
- ◆ However these are mostly in same lab (or a few km apart).
- ◆ Long-distance measurements at the 10^{-17} level still rare.

Global adjustment of all measurements

- ◆ Performed by the WG on Frequency Standards of the CCL-CCTF at regular intervals.
- ◆ Provides conventional values of 13 optical transitions (+ Rb μ wave) vs. Cs + conventional values of optical ratios (with better uncertainty)
- ◆ Latest adjustment in 2021: 72 measurements vs. Cs, 33 ratios (mostly optical)



Steps towards the redefinition of the second (1/2)

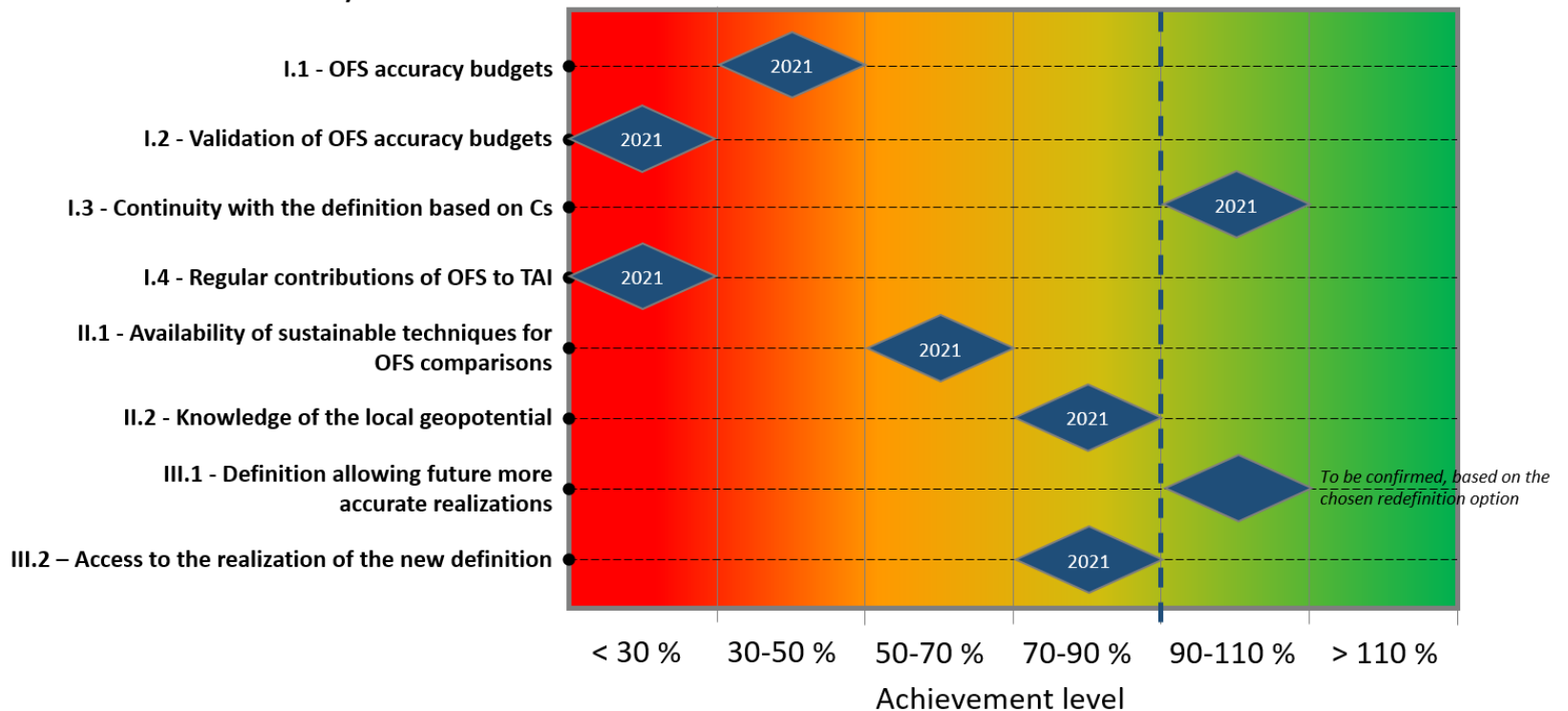
- ◆ The Consultative Committee for Time and Frequency works on updating the roadmap towards the definition of the second
- ◆ It initiated in 2020 a Task Force « Redefinition of the second »
 - Three subgroups reported in March 2021 following a wide-ranging consultation
 - A. Requests from user communities
 - B. Performance of clocks and possible approaches for redefinition
 - c. T/F dissemination and time scales

Consider frequency comparison and relativistic shift computation to 10^{-18}
 - Prepares a Recommendation to the CGPM in 2022, opening the path to a redefinition, to occur likely not before 2030.

Steps towards the redefinition of the second (2/2)

- ◆ The CCTF established a set of criteria to be regularly monitored.
- ◆ Mandatory criteria must be fulfilled to decide on the redefinition.

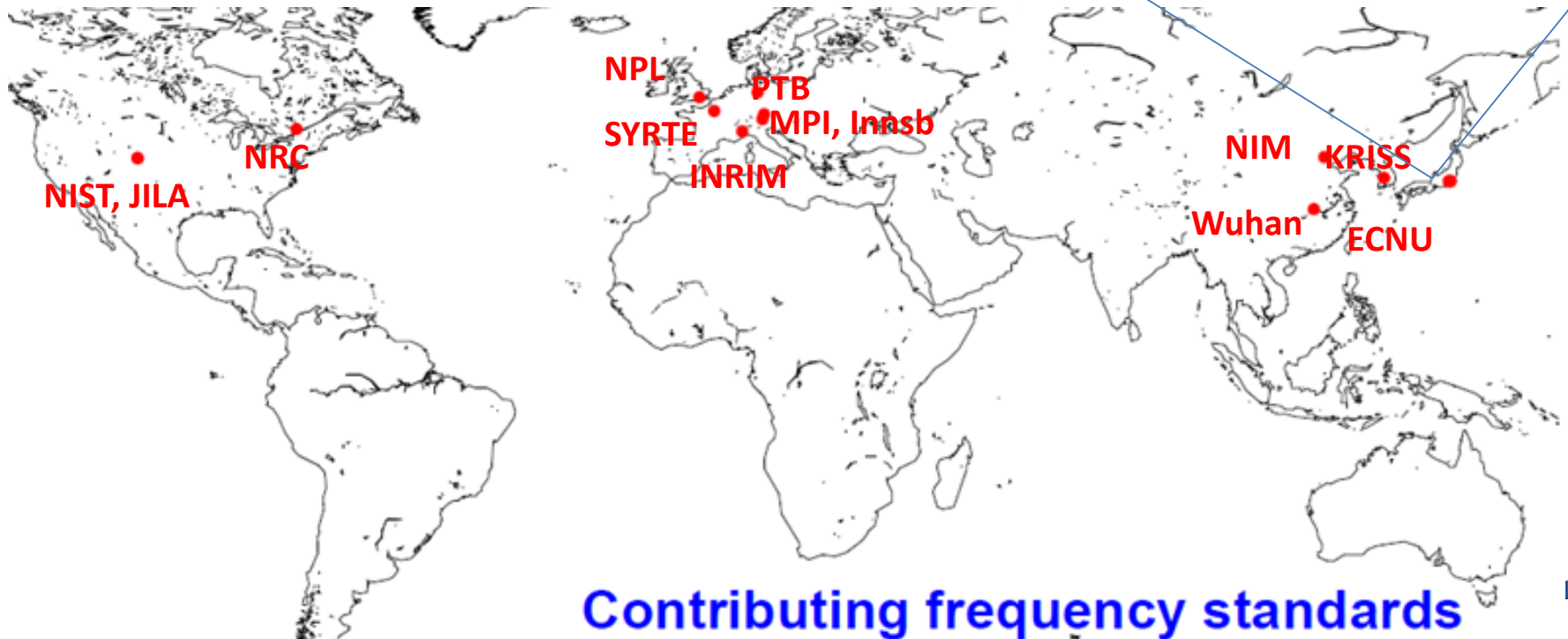
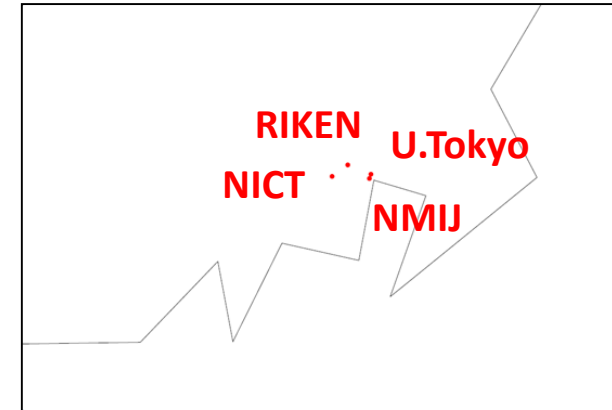
Mandatory criteria



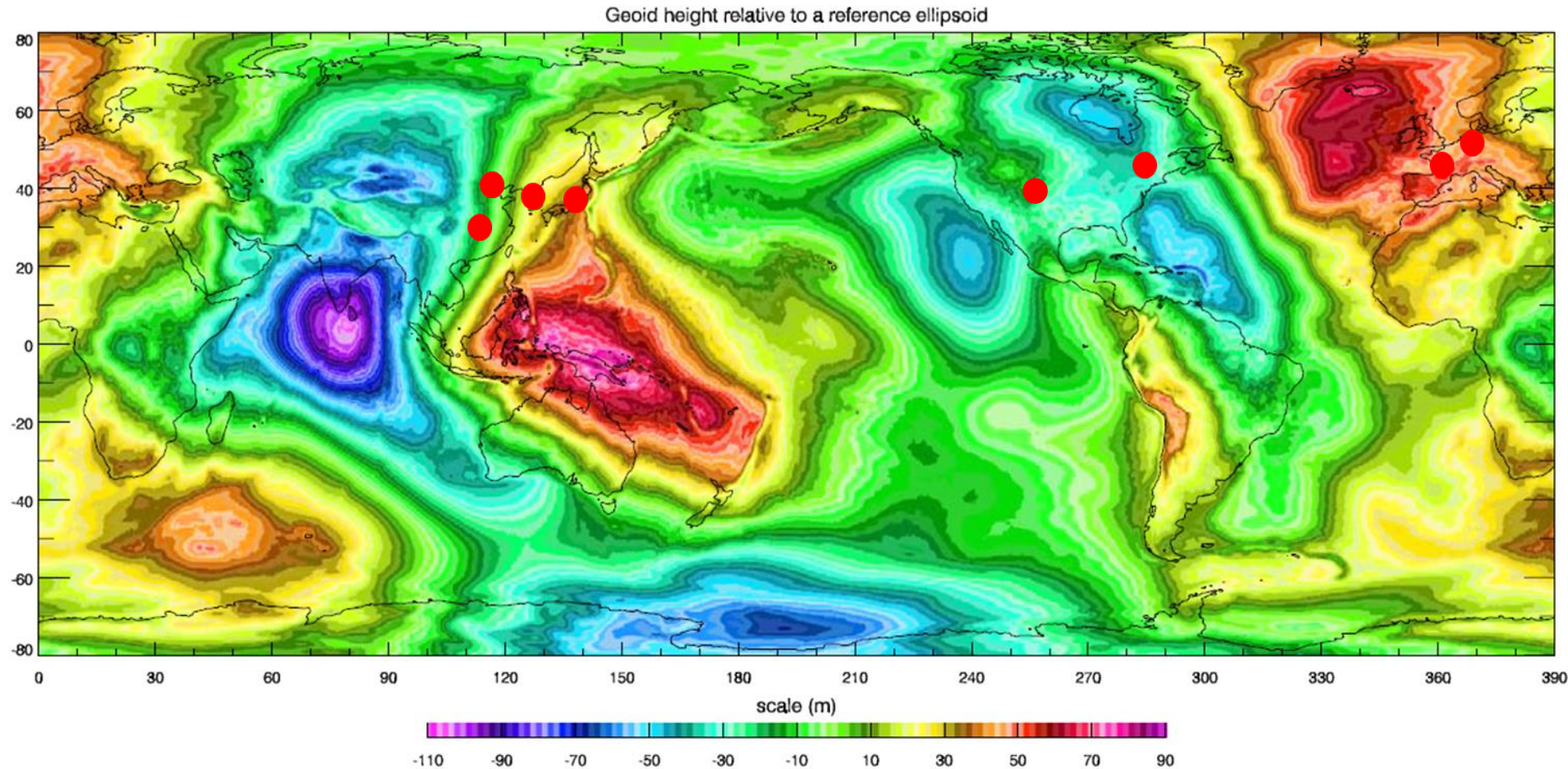
Where are the labs operating optical clocks?

Labo	Transitions
JILA	Sr
NIST	Yb, Al+, Hg+
NRC	Sr+
NPL	⁴ Yb+, ⁸ Yb+, Sr+
SYRTE	Sr, Hg
PTB	Sr, ⁴ Yb+
MPIQ	H
U. Innsbruck	Ca+
INRIM	Yb

Labo	Transitions
NIM	Sr
Wuhan	Ca+
ECNU	Yb
KRISS	Yb
U. Tokyo	Sr
RIKEN	Sr, Hg, Yb
NMIJ	Sr, Yb
NICT	Sr



Location of sites on a global geoid map



Clock sites are not all in smooth geopotential. Can formal uncertainties of a few 10^{-18} be obtained everywhere?

Computation of geopotential for 2021 optical clocks

- ◆ A bibliographic study of the refereed publications for some of the sites operating optical clocks (and possibly also Cs fountains).
- ◆ Sometimes it is not possible to find all details in a simple bibliographic study.

Labo/location	Standard	Best $u_B/10^{-17}$	$u_B(\text{Rel})/10^{-17}$	Method	Ref(Relat shift)
SYRTE/Paris	Sr , Hg, FO	~4	0.2-0.3	GG-RG	Denker et al. 2017
IT /Torino	Yb , FO	~3	0.3	GG-RG	Riedel et al 2020 / Denker et al 2017
PTB/Braunschw.	Sr , Yb+ ,FO	1.5	0.2-0.3	GG-RG	Denker et al. 2017
NPL/Teddington	Yb+, Sr+, Sr	1	0.3	GG-RG	Riedel et al 2020 / Denker et al 2017
NIST/Boulder	Yb , AL+, Hg+	~0.1	0.6	GG, RG, LN	Pavlis and Weiss, Metrologia, 2017
KRISS/Daejeon	Yb	1.7	0.9	GG-RG	KRGG14 geoid + EGM2008
NICT/Koganei	Sr	7	~2	GG-RG	Miyahara et al. 2014 GSIGEO2011
NMIJ/Tsukuba	Yb	22	6	LN	Tokyo MSL

-
- ◆ [RAPPELS] Potentiel de pesanteur + horloges = géodésie chronométrique relativiste
 - ◆ Progrès des horloges optiques, vers une redéfinition de la seconde
 - ◆ **Géodésie chronométrique et le projet IAG QuGe**

Les conditions pour la géodésie chronométrique

Il faudrait avoir

- ◆ Un ensemble d'horloges optiques de référence exactes à 10^{-18}
- ◆ Un réseau de liens optiques (ou autres, à 10^{-18}) entre les horloges de référence
- ◆ Des horloges optiques transportables exactes à 10^{-18}
- ◆ Une technique de comparaison de fréquence à 10^{-18} pour « les derniers 100-200 km » (ex. lien optique atmosphérique)

2021

Plus tard



???

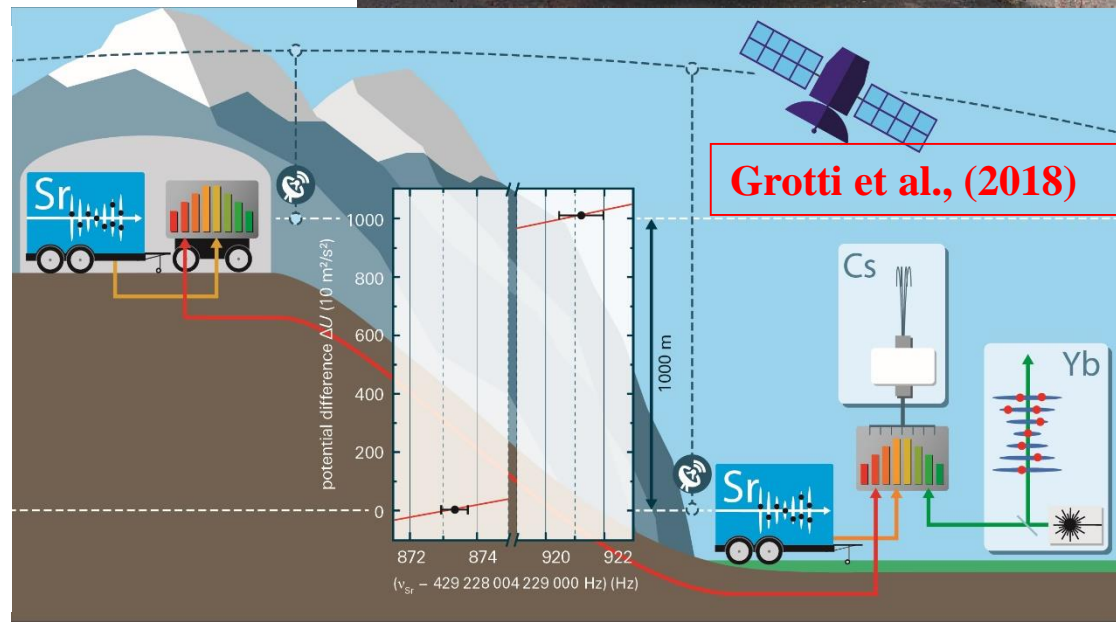


Horloges transportables

- ◆ Permet de placer une horloge optique aux points à mesurer, mais ne règle pas la question de la comparaison de fréquence.
- ◆ Des horloges optiques transportables existent. 10^{-17} attendu, 10^{-18} possible
 - Horloge Sr de la PTB
 - Autres projets Ca+, etc...
- ◆ Première expérience terrain:



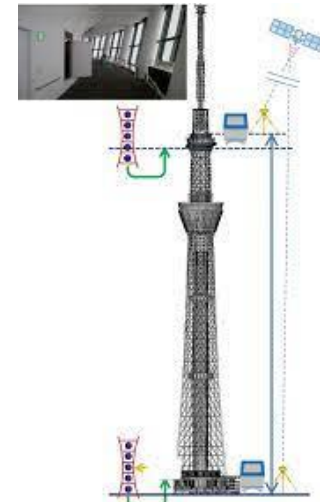
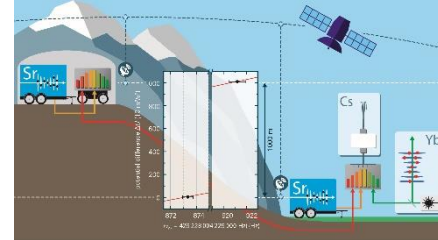
- Horloge Sr étalonnée à Turin (fontaine Cs), puis transportée au Tunnel du Fréjus;
- Horloge Sr dans le tunnel comparée à la fontaine de Turin par lien fibré;
- Premier résultat: 10^{-16} « seulement », mais démontre la faisabilité



Transportable clocks

Essential tools for chronometric geodesy

- ◆ J. Grotti et al., Nat. Phys. 14, 437 (2018).
 - PTB Sr accurate in the 10^{-17} region
- ◆ M. Takamoto et al., Nat. Phot. (2020).
 - “Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks”
 - Two Sr lattice clocks consistent within $4 \cdot 10^{-18}$ operated in a 450 m tower in Tokyo
- ◆ Y. Huang et al., PRA (2020)
 - “Geopotential measurement with a robust, transportable Ca+ optical clock”
 - Wuhan Ca+ with $1.3 \cdot 10^{-17}$ accuracy
- ◆ M. Delehaye, C. Lacroûte, Jour. Mod. Opt. 65, 622 (2018).
 - “Single-ion, transportable optical atomic clocks”, Review paper

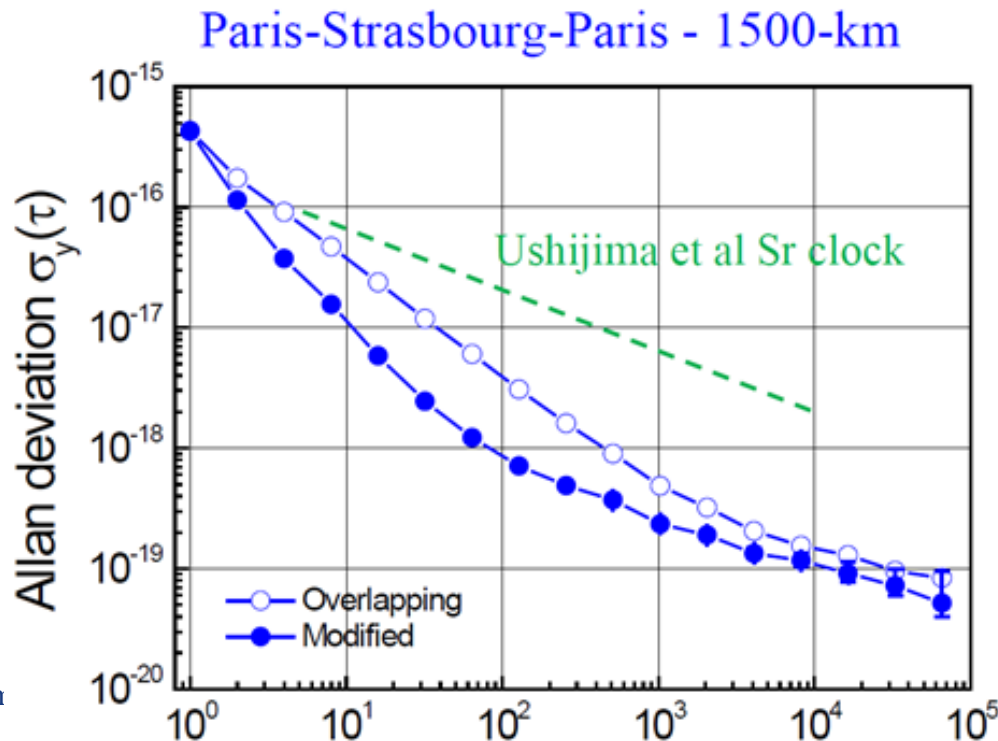


See also previous talk

Fiber links to compare optical clocks frequencies

- ◆ Better than 10^{-18} within hours.
- ◆ 1500 km link demonstrated on public telecom network.
- ◆ Requires hardware installation (bi-directional amplifiers, multiplexers, regenerating stations) and negotiations with operators. However industrial solutions are now existing.
- ◆ Continental networks are initiated.

See previous talk



Development of optical time/frequency links

- ◆ Stems from collaborations at national or regional level
- ◆ REFIMEVE+
French collaboration on fibre networks with Europe in mind
- ◆ European metrology projects
 - ROCIT: Robust optical clocks for international timescales
<http://empir.npl.co.uk/rocit/>
 - TIFOON: Advanced time/frequency comparison and dissemination through optical telecommunication networks
<http://empir.npl.co.uk/tifoon/project/>

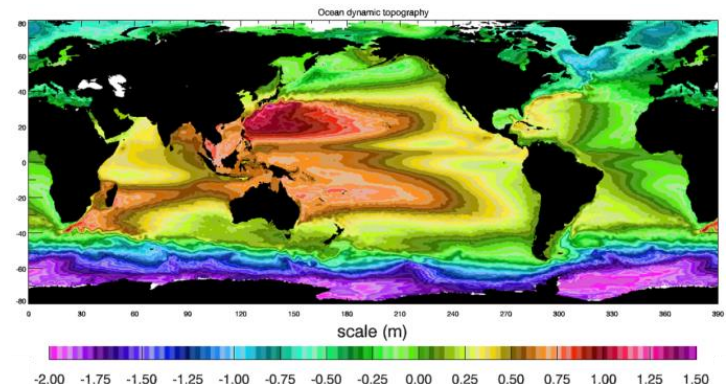
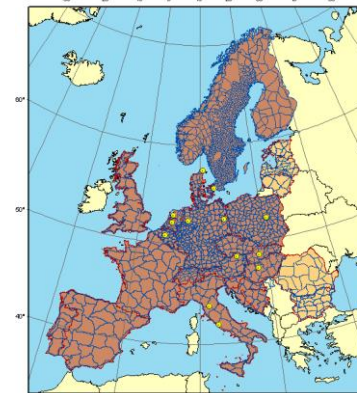
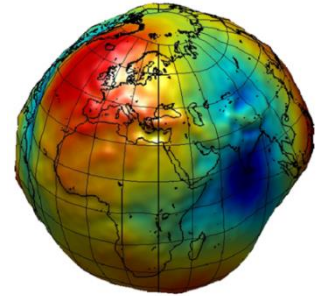
See previous talk



From A. Amy-Klein

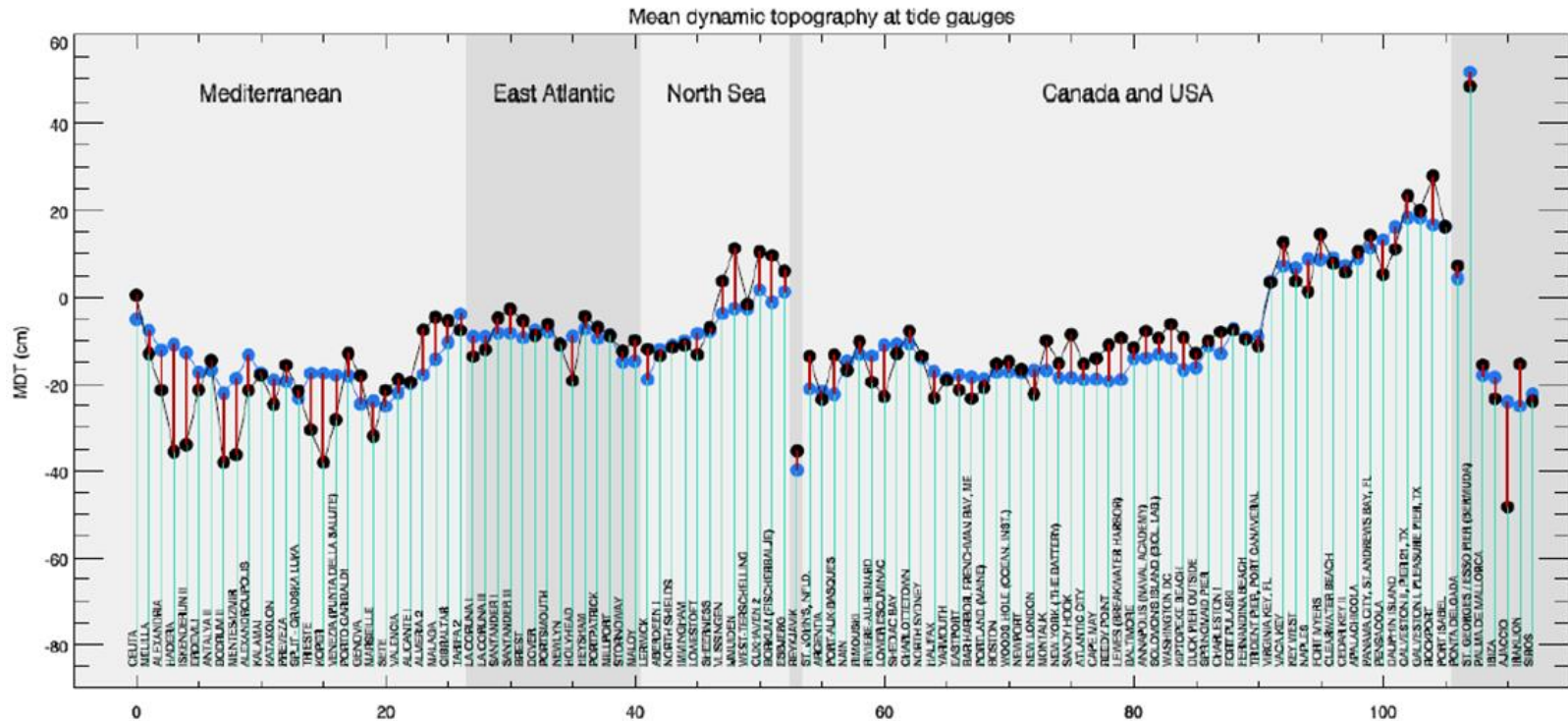
Pourquoi mesurer le potentiel de pesanteur?

- ◆ Les horloges mesurent directement les différences de potentiel de pesanteur. Que peut-on en faire?
- ◆ Valider (et/ou améliorer) les modèles globaux et régionaux de potentiel et de géoïde;
- ◆ Unifier les références d'altitude de tous les pays;
- ◆ Etudier les phénomènes qui font varier la répartition des masses / l'altitude;
- ◆ Mesurer la topographie dynamique des océans
- ◆



Local measurements of sea level (tide gauges) must be reconciled to global models of the dynamic topography

Coastal dynamic topography of the North Atlantic



Tide gauges
Hydrodynamic levelling

Point measurements – no spatial smoothing – bigger errors (~10 cm)

From C. Hughes

Hughes, C. W., R. J. Bingham, V. Roussenov, Joanne Williams and P. L. Woodworth, 2015: The effect of Mediterranean exchange flow on European time mean sea level. *Geophys. Res. Lett.* 42(2), 466-474 doi: [10.1002/2014GL062654](https://doi.org/10.1002/2014GL062654).

IAG Project - Novel Sensors and Quantum Technology for Geodesy (QuGe)

Jürgen Müller

Institut für Erdmessung

Leibniz Universität Hannover

Co-chair **Marcelo Santos**, UNB

QuGe Working Groups

- WG Q.1: Quantum gravimetry in space and on ground
- WG Q.2: Laser interferometry for gravity field missions
- WG Q.3: Relativistic geodesy with clocks

The new WGs will closely collaborate with other components of IAG such as IAG SC 2.3/2.6, IERS, ICCT, ICCG, WG on IHRF, JWG on IGRF, etc.

“Ongoing”

WG Q.3: Relativistic geodesy with clocks

Chair: Gerard Petit, Paris, France

Vice-Chair: Jakob Flury, Hannover, Germany

Consultant from Physics: Christian Lisdat, PTB, Germany

Objectives

- Clock networks for unification of height systems
- Gravity field recovery on ground
- Application to realize reference systems, including dedicated space clocks
- Further applications (height/potential variations)
- Potential satellite missions for long-wavelength gravity field recovery, including optical links for comparing the space clocks

QuGe Progress and Ongoing Activities

- Website has been created: <https://quge.iag-aig.org/>
- Members of the 3 WGs consolidated
- (Internal) exchange mainly via digital media
- Organization of conference sessions and workshops in preparation (IAG SA 2021, COSPAR 2021, EGU 2021,...)
- Contribution of QuGe members to various research projects on using novel technology for geodetic applications

Work under way

<https://quge.iag-aig.org/>



International Association of Geodesy
Novel Sensors and Quantum Technology for Geodesy

QUANTUM GEODESY ▾

IAG ▾

LINKS ▾

Image by NASA WFO/NASA Visible Earth/UF S. Danne

© QOM, HU Berlin

© IFE, LUH

IAG Project - Novel Sensors and Quantum Technology for Geodesy

Welcome message

IAG Project – Novel Sensors and Quantum Technology for Geodesy (QuGe)

Current developments in quantum physics and the application of general relativity will open up enhanced prospects for satellite geodesy, gravimetric Earth observation and reference systems.

IAG Events

Next events

2021-10-13 - 2021-10-25
13 International School

Add to Calendar

Conclusions

- ◆ Les meilleures horloges optiques sont tellement exactes qu'on ne connaît pas assez bien le potentiel de pesanteur pour calculer leur décalage relativiste de fréquence avec la même exactitude.
- ◆ Quand on pourra comparer leurs fréquences à longue distance, elles permettront de définir une référence et de mesurer le potentiel de pesanteur en tout point.
- ◆ Cette géodésie chronométrique (relativiste) aidera à mieux connaître la Terre en général et le niveau des mers en particulier.

