

# Le temps; définition et réalisation de l'échelle de référence

Elisa Felicitas Arias

17 Septembre 2014  
Chateau d'Abbadia  
Hendaye



# Résumé

---

- ◆ La coordination internationale en métrologie; le BIPM
- ◆ Le Système international d'unités (SI)
- ◆ L'unité de temps
- ◆ Les échelles de temps
- ◆ Le temps atomique

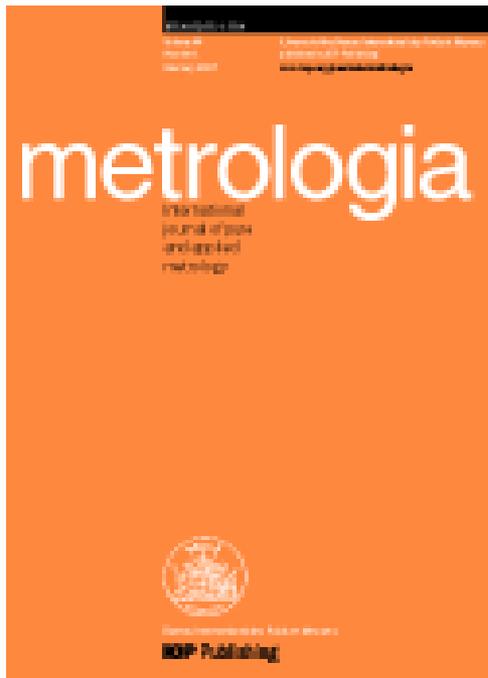
# La coordination internationale; le BIPM

---

- ◆ 1875
  - 20 mai, signature de la Convention du Mètre entre 17 états,
  - Création du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)
- ◆ Mission du BIPM est d'assurer l'unification mondiale des mesures:
  - d'établir les étalons fondamentaux et les échelles pour la mesure des principales grandeurs physiques et de conserver les prototypes internationaux ;
  - d'effectuer la comparaison des étalons nationaux et internationaux ;
  - d'assurer la coordination des techniques de mesure correspondantes ;
  - d'effectuer et de coordonner les mesures des constantes physiques fondamentales

# Publications

Revue internationale *Metrologia*

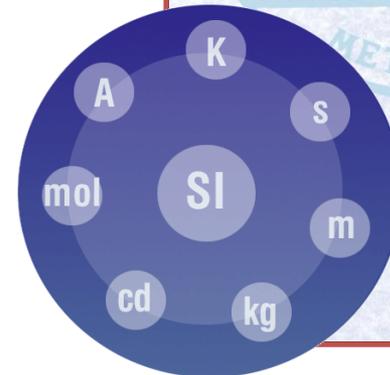


- 6 volumes,
- ~ 100 articles/an

Brochure du Système international d'unités (SI)

Le Système international d'unités  
The International System of Units

SI

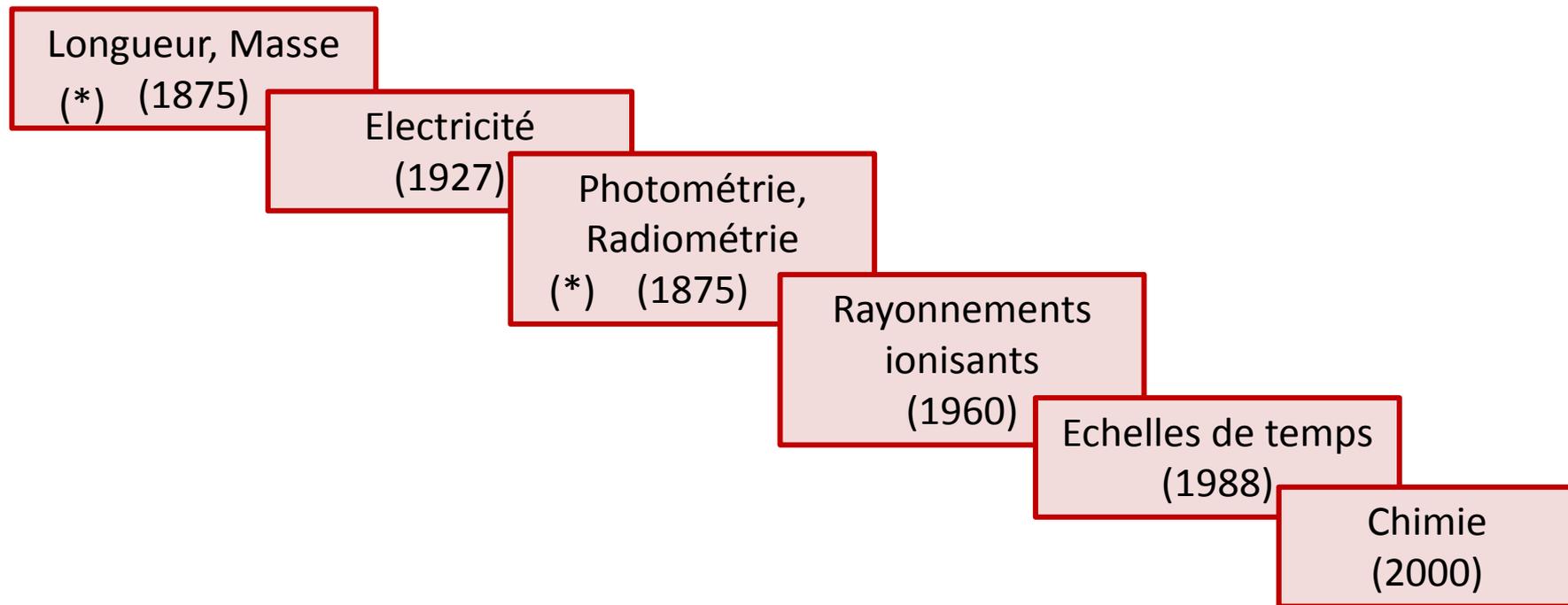


8<sup>e</sup> édition  
2006

Bureau international des poids et mesures

Organisation intergouvernementale de la Convention du Mètre

# Les activités au BIPM



(\*) interrompu

# Les Comités Consultatifs ...

---

- ◆ de l'électricité et magnétisme (CCE)
- ◆ de photométrie et radiométrie (CCPR)
- ◆ de thermométrie (CCT)
- ◆ de longueur (CCL)
- ◆ du temps et des fréquences (CCTF)
- ◆ des rayonnements ionisants (CCRI)
- ◆ des unités (CCU)
- ◆ pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM)
- ◆ pour la quantité de matière (CCQM)
- ◆ de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV)

# Les unités – Le système international d'unités (SI)

$$\text{GRANDEUR} = \text{NOMBRE} \times \text{UNITE}$$

- ◆ Unités de base, pour les grandeurs de base
- ◆ Unités dérivées, pour les grandeurs dérivées
  - Les unités dérivées découlent des équations définissant les grandeurs dérivées en fonction des grandeurs de base
- ◆ Le SI (11<sup>ème</sup> CGPM, 1960) est un ensemble d'unités bien définies, reconnues universellement et faciles à utiliser. Elles recouvrent toutes les mesures nécessaires à la société

# Grandeurs et unités de base du SI

**Tableau 1. Unités de base du SI**

Grandeur de base		Unité SI de base	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
longueur	$l, x, r, \text{etc.}$	mètre	m
masse	$m$	kilogramme	kg
temps, durée	$t$	seconde	s
courant électrique	$I, i$	ampère	A
température thermodynamique	$T$	kelvin	K
quantité de matière	$n$	mole	mol
intensité lumineuse	$I_v$	candela	cd

# Grandeurs et unités dérivées – Quelques exemples

**Tableau 2. Exemples d'unités SI dérivées cohérentes exprimées à partir des unités de base**

Grandeur dérivée		Unité SI dérivée cohérente	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
superficie	$A$	mètre carré	$m^2$
volume	$V$	mètre cube	$m^3$
vitesse	$v$	mètre par seconde	$m/s$
accélération	$a$	mètre par seconde carrée	$m/s^2$
nombre d'ondes	$\sigma, \tilde{\nu}$	mètre à la puissance moins un	$m^{-1}$
masse volumique	$\rho$	kilogramme par mètre cube	$kg/m^3$
masse surfacique	$\rho_A$	kilogramme par mètre carré	$kg/m^2$
volume massique	$v$	mètre cube par kilogramme	$m^3/kg$
densité de courant	$j$	ampère par mètre carré	$A/m^2$
champ magnétique	$H$	ampère par mètre	$A/m$
concentration de quantité de matière <sup>(a)</sup> , concentration	$c$	mole par mètre cube	$mol/m^3$
concentration massique	$\rho, \gamma$	kilogramme par mètre cube	$kg/m^3$
luminance lumineuse	$L_v$	candela par mètre carré	$cd/m^2$
indice de réfraction <sup>(b)</sup>	$n$	un	1
perméabilité relative <sup>(b)</sup>	$\mu_r$	un	1

# Préfixes – Noms et symboles

Tableau 5. Préfixes SI

Facteur	Nom	Symbole	Facteur	Nom	Symbole
$10^1$	déca	da	$10^{-1}$	déci	d
$10^2$	hecto	h	$10^{-2}$	centi	c
$10^3$	kilo	k	$10^{-3}$	milli	m
$10^6$	méga	M	$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^9$	giga	G	$10^{-9}$	nano	n
$10^{12}$	téra	T	$10^{-12}$	pico	p
$10^{15}$	péta	P	$10^{-15}$	femto	f
$10^{18}$	exa	E	$10^{-18}$	atto	a
$10^{21}$	zetta	Z	$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y	$10^{-24}$	yocto	y

Adoptés par des CGPMs

# Quelques unités en dehors du SI (usage accepté)

**Tableau 6. Unités en dehors du SI dont l'usage est accepté avec le SI**

Grandeur	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Valeur en unités SI
temps	minute	min	1 min = 60 s
	heure <sup>(a)</sup>	h	1 h = 60 min = 3600 s
	jour	d	1 d = 24 h = 86 400 s
angle plan	degré <sup>(b, c)</sup>	°	1° = (π/180) rad
	minute	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
	seconde <sup>(d)</sup>	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad
superficie	hectare <sup>(e)</sup>	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
volume	litre <sup>(f)</sup>	L, l	1 L = 1 l = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
masse	tonne <sup>(g)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg

# Définition et réalisation des unités

LES DEFINITIONS  
NE DONNENT PAS  
ACCES AUX UNITES

LES REALISATIONS  
DES UNITES  
PERMETTENT LEUR  
ACCEDER, LES  
UTILISER

REALISATION  
PRATIQUE DE LA  
DEFINITION DES  
UNITES

[http://www.bipm.org/fr/si/si\\_brochure/appendix2/](http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure/appendix2/)

Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299\,792\,458$  de seconde.

Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

La seconde est la durée de  $9\,192\,631\,770$  périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à  $2 \times 10^{-7}$  newton par mètre de longueur.

Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction  $1/273,16$  de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ; son symbole est « mol ».

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est  $1/683$  watt par stéradian.

# Evaluation de la qualité de la mesure

---

- ◆ Incertitude, variance
- ◆ Pondération des mesures
- ◆ Stabilité
- ◆ Exactitude
- ◆ Les outils statistiques

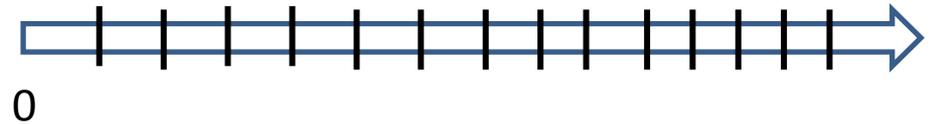
# L'incertitude de mesure ( $u$ )

---

- ◆ Une mesure n'est complète que si elle est accompagnée de son incertitude;
- ◆ En métrologie, on considère deux composantes dans l'incertitude:
  - Type A,  $u_A$ : incertitude de type « statistique », on peut la déterminer à partir d'un calcul, elle est susceptible d'améliorer avec des méthodes statistiques,
  - Type B,  $u_B$ : elle peut être assimilée à des systématismes dans la mesure ou l'équipement; elle n'est pas susceptible d'améliorer statistiquement. Elle est déterminée à partir de l'évaluation d'un étalon ou d'un instrument, de la connaissance des effets qui peuvent biaiser la mesure.
- ◆ Rappel: variance ( $u^2$ ), propagation ( $u^2 = u_A^2 + u_B^2$ )
  - Dans le cas des échelles de temps, on ajoute la Variance d'Allan

# Série temporelle de mesures, échelle de temps

- ◆ Système que permet de dater des événements de manière univoque
- ◆ Intervalle unitaire; unité
- ◆ Origine



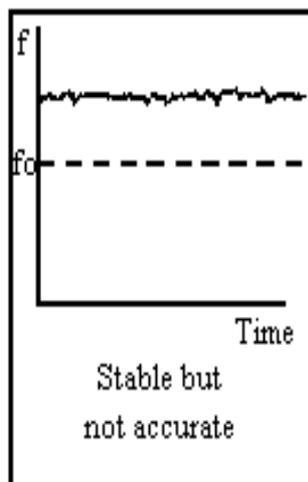
**STABILITE**

Capacité de maintenir un rapport constant entre l'unité de l'échelle et sa définition théorique sur un intervalle de temps

Quantifie la capacité de l'unité de l'échelle de reproduire sa définition théorique

**EXACTITUDE**

# Stabilité et exactitude d'une série



La stabilité en temps / fréquence  
est quantifié par la VARIANCE  
D'ALLAN

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (y_{n+1} - y_n)^2 \rangle,$$

L'exactitude se détermine par  
comparaison de le fréquence de  
l'échelle et celle d'un étalon  
primaire

# L'unité de temps – Sa définition

---

**La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.**

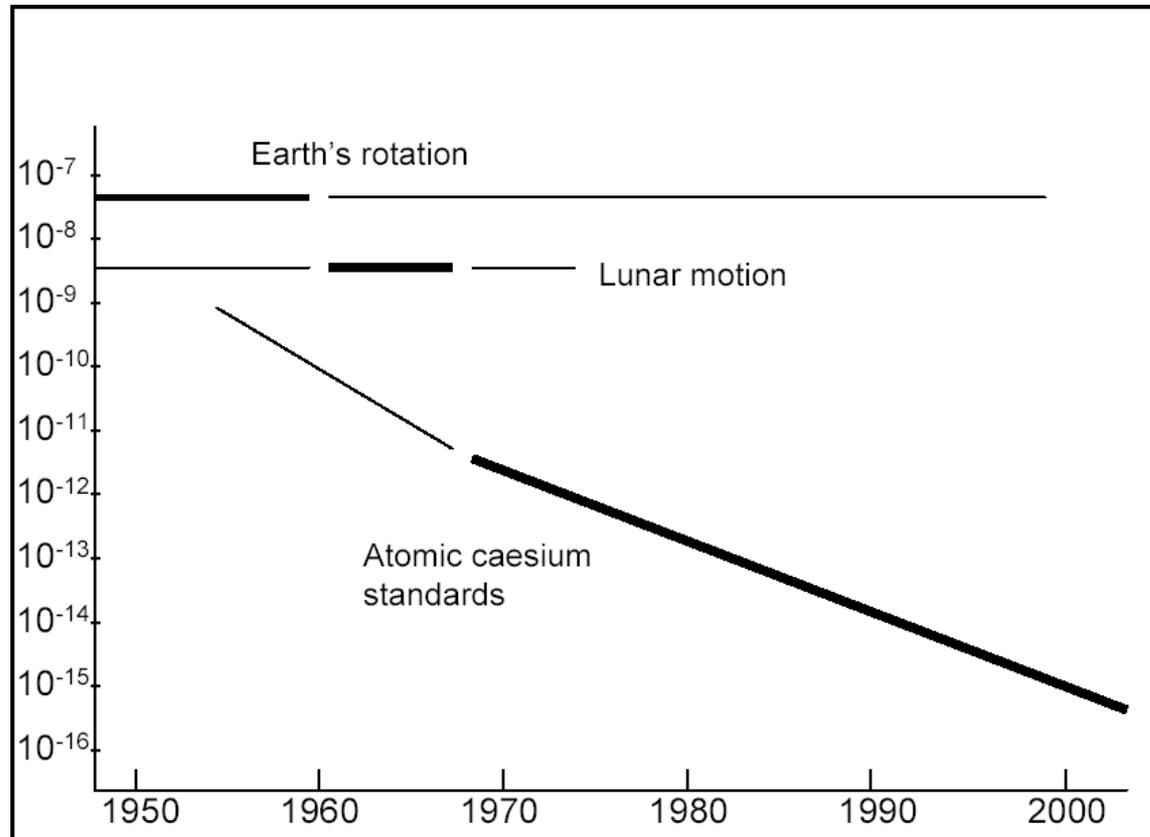
Cette définition se réfère à un atome de césium au repos, à une température de 0 K.

Cette note a pour objet de préciser que la définition de la seconde du SI est fondée sur un atome de césium non perturbé par le rayonnement du corps noir, c'est-à-dire dans un environnement maintenu à une température thermodynamique de 0 K. Les fréquences de tous les étalons primaires de fréquence doivent donc être corrigées pour tenir compte du décalage dû au rayonnement ambiant, comme l'a précisé le Comité consultatif du temps et des fréquences en 1999.

# L'unité de temps – Sa réalisation

- ◆ La seconde est réalisée par des étalons primaires de fréquence avec la plus grande exactitude;
- ◆ Ces étalons utilisent la transition du césium 133 qui définit la seconde;
- ◆ L'incertitude des meilleurs étalons primaires de fréquence est de quelques  $10^{-16}$ , ce qui exige de les traiter dans le cadre de la relativité générale;
- ◆ Représentations secondaires de la seconde, dont l'incertitude intrinsèque est de l'ordre  $10^{-18}$ . Mais elles doivent être liées à l'étalon primaire, limitant leurs incertitudes à  $10^{-14}/10^{-15}$ .

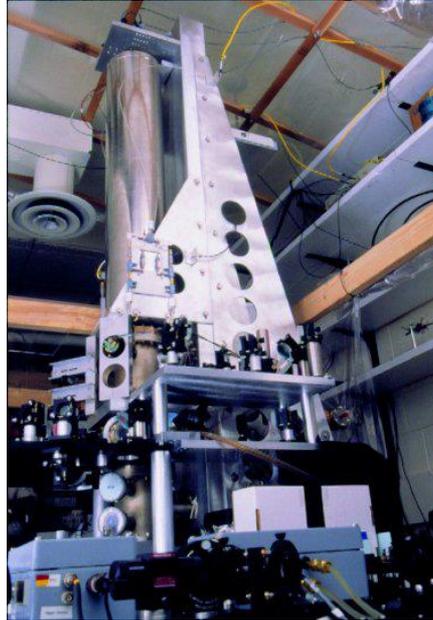
# Evolution et incertitude relative des étalons primaires de fréquence



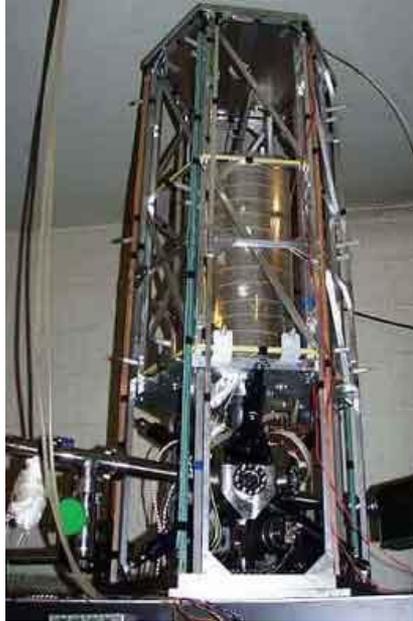
# Les étalons primaires de fréquence

2013-2014:

- 10 fontaines à césium [Allemagne, France, Italie, Chine, Grande Bretagne, Etats Unis, Fédération Russe]  
Incertitude: ordre  $10^{-16}$
- 2 horloges à faisceau [Allemagne]  
Incertitude: ordre  $10^{-15}$



# Les représentations secondaires de la seconde

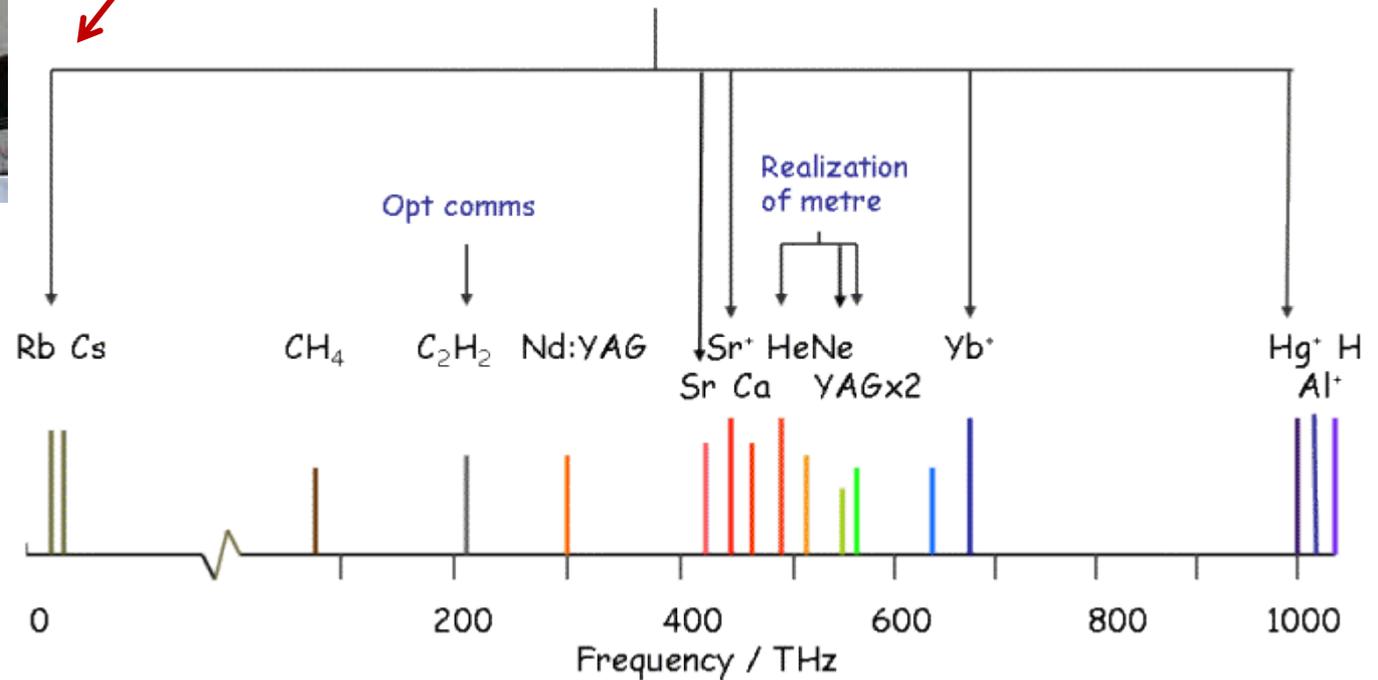


Depuis 2012

- Fontaine à rubidium [France]  
Incertitude ordre  $10^{-16}$



Secondary representations of second



# Les horloges atomiques

- On appelle « horloge » au dispositif qui donne le temps en continu
- On les trouve de deux types:
  - Horloges à césium  
Exactitude  $10^{-12}/10^{-13}$   
Stabilité  $10^{-14}$  @ 5 jours
  - Horloges à maser d'hydrogène  
Dérive  $5 \times 10^{-16}$ /jour  
Exactitude  $5 \times 10^{-13}$   
Stabilité  $10^{-16}$  /jour
- Elles sont moins exactes que les étalons primaires



# L'échelle de temps atomique, une échelle « intégrée »

- ◆ Elle est construite par une succession ininterrompue de secondes;
- ◆ Les secondes réalisées sont « différentes » de la définition;
  - Faire une moyenne sur un intervalle de temps
  - Faire une moyenne entre des réalisations dans des laboratoires différents
- ◆ Les secondes se cumulent, leurs erreurs aussi;
- ◆ Il faut des algorithmes pour:
  - Calculer des moyennes
  - Faire une pondération des données
  - Minimiser des différences

# Éléments dans une échelle de temps

Horloges (étalons de fréquence)

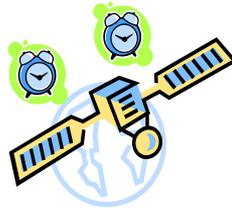
un?



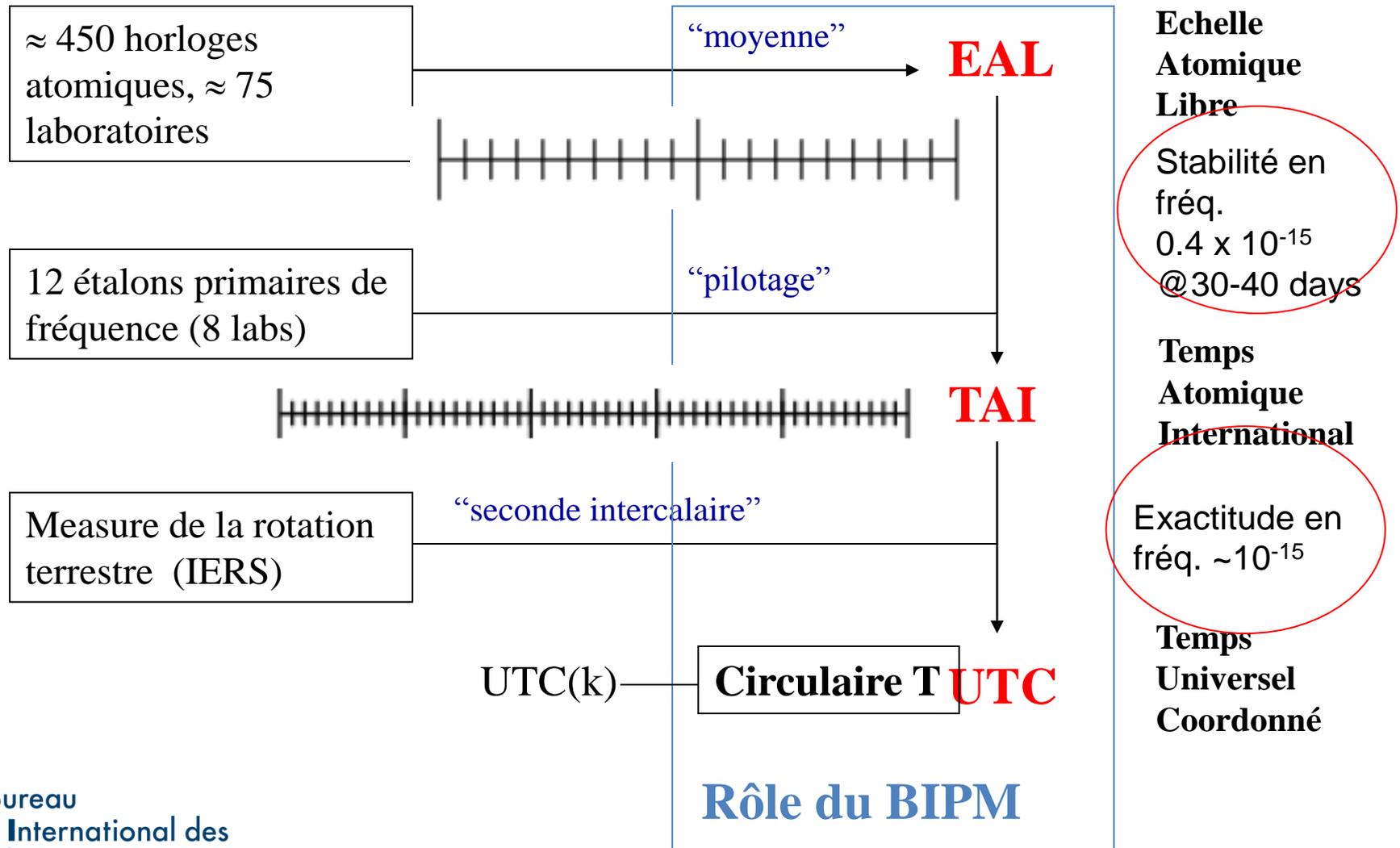
plusieurs?



un grand nombre?



# EAL, TAI et UTC



# UTC

Coordinated

Universal

Time



Emission  
coordonnée des  
signaux  
(ITU-R)



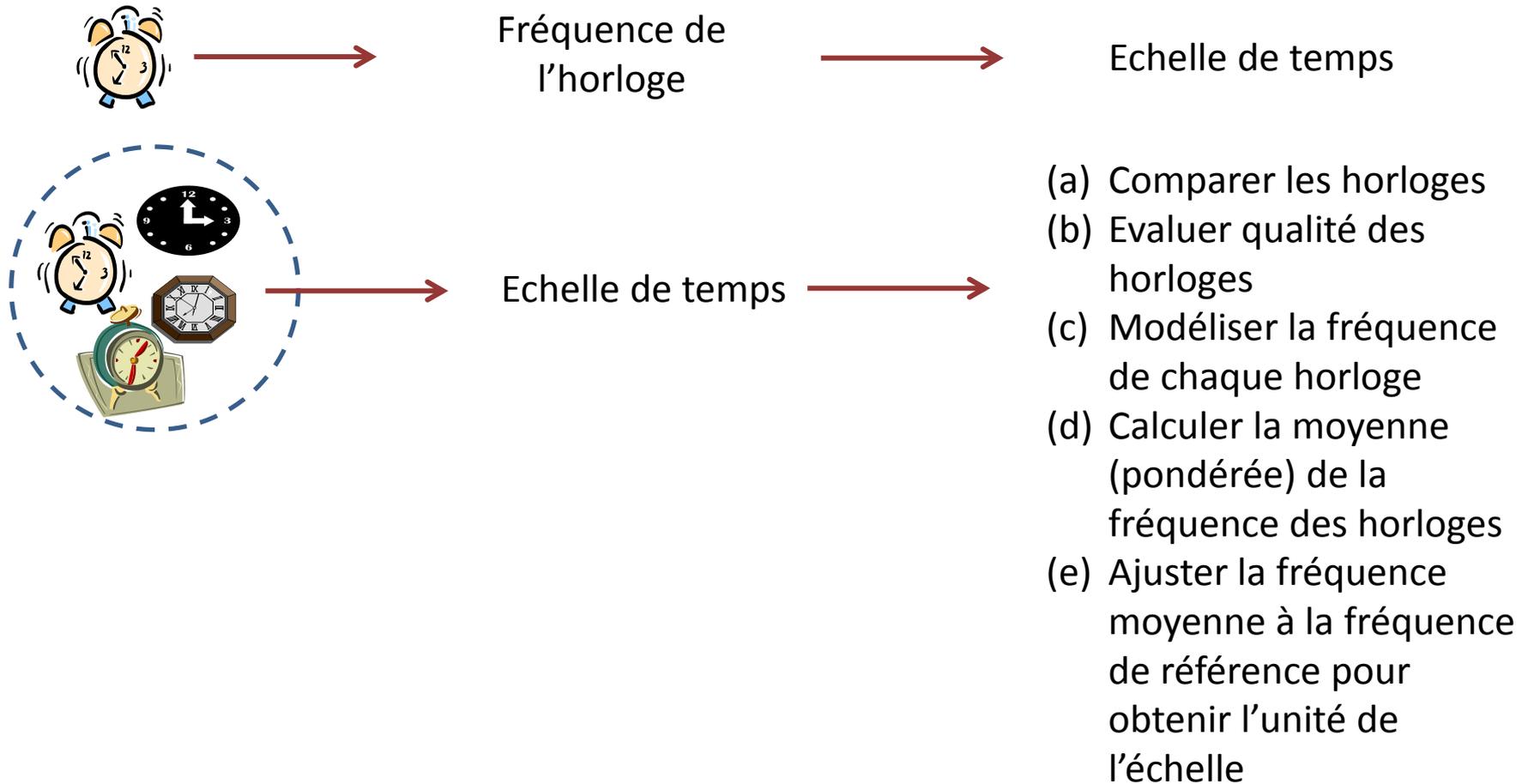
Le temps pour tous, indique l'universalité du temps

Temps Atomique International TAI est la base de  
l'UTC

La différence entre TAI et UTC est un nombre entier de secondes  
(qui change à l'insertion d'une seconde intercalaire)

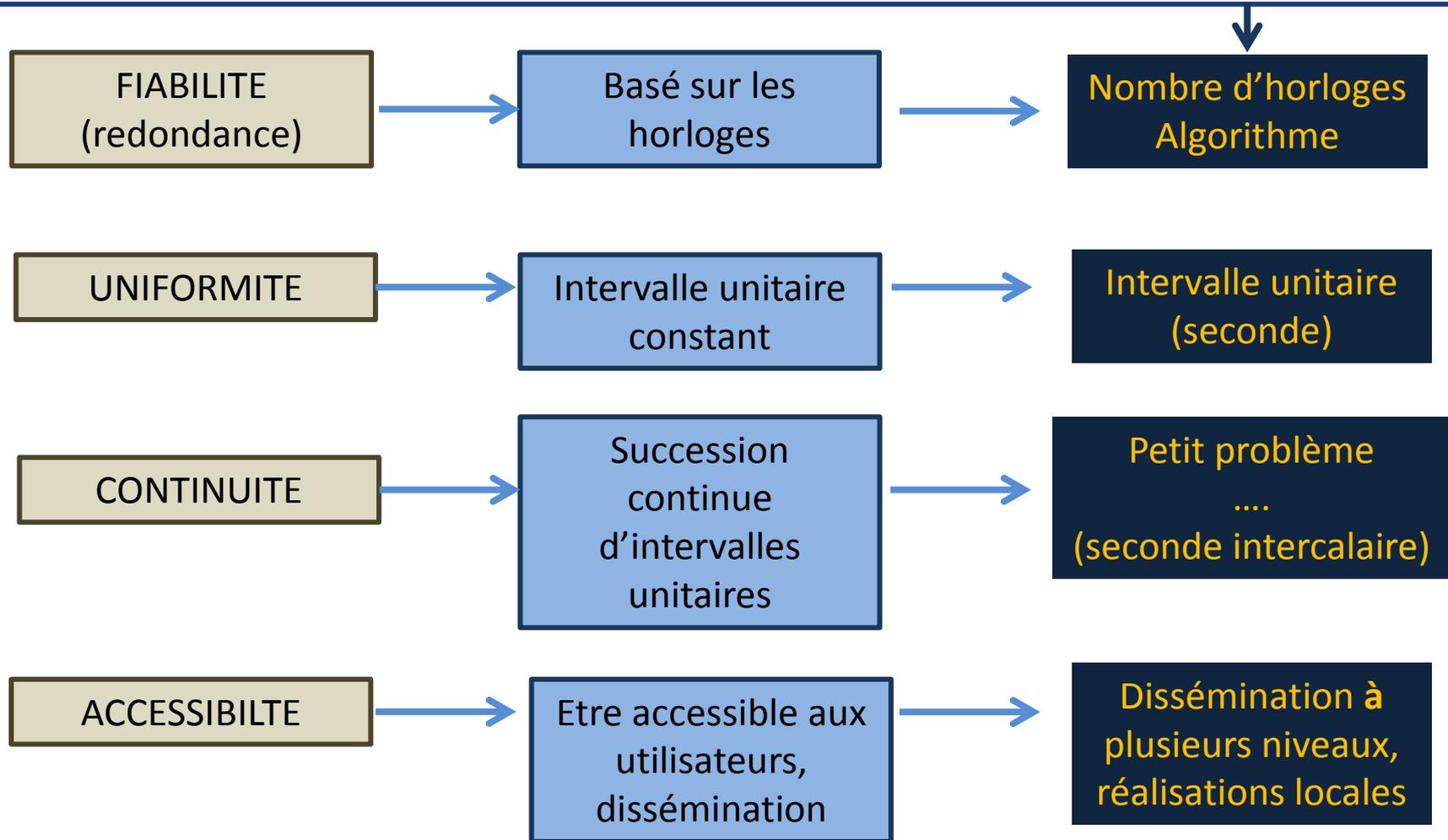
- GMT (Greenwich Mean Time) fut remplacé par UT en 1948 (UAI)
- UT fut remplacé par UTC en 1972 (CGPM)

# « Basique » d'une échelle de temps

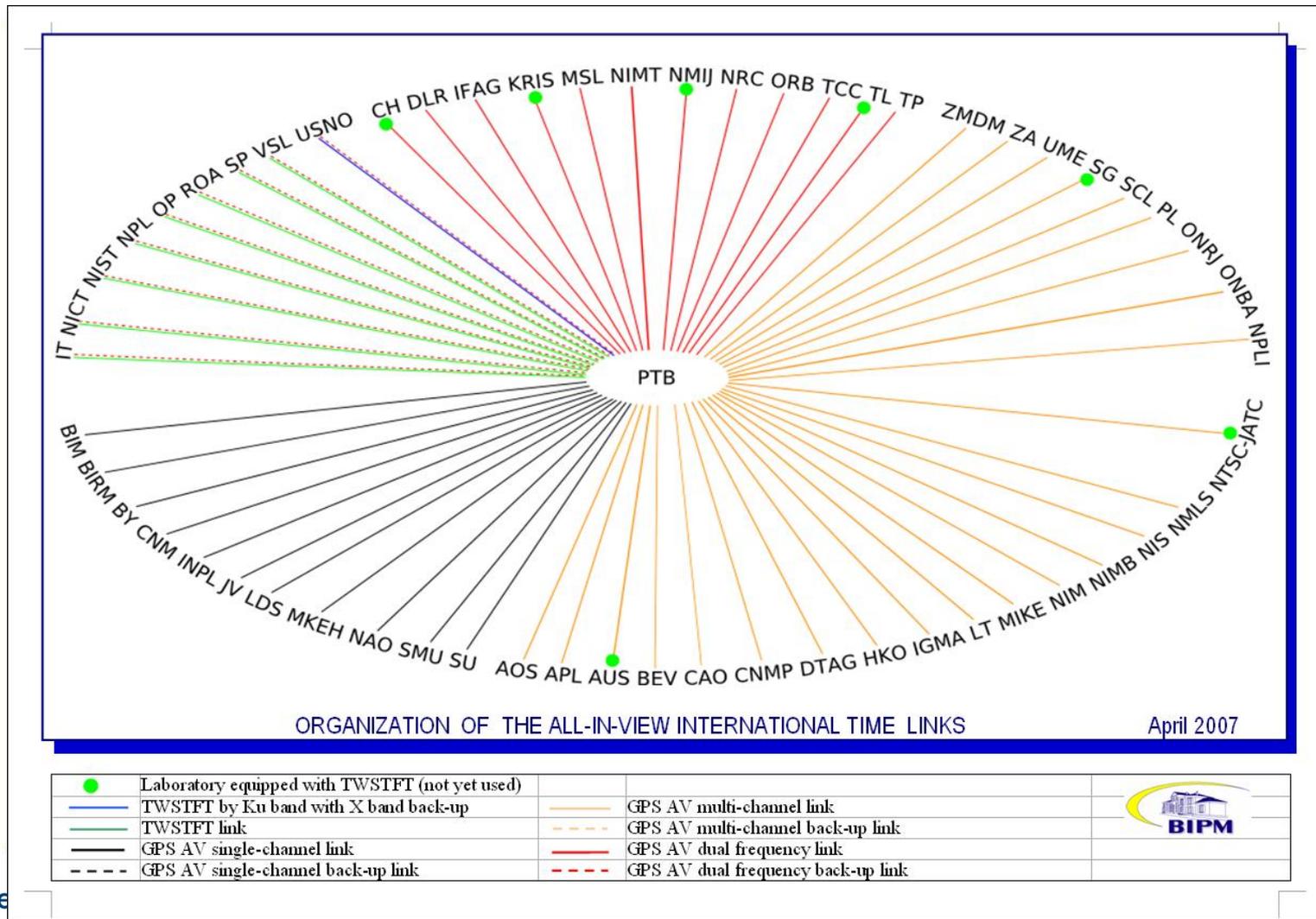


# Qualité métrologique d'une échelle de temps

## Exemple de l'échelle de référence UTC



# Laboratoires participant à l'UTC et leur équipement



# (a) Comparaison d'horloges (transfert de temps)

## I. Dans un laboratoire (échelle locale)

- Comparaison à très courte distance
- Incertitude due aux instruments de mesure (petite)

## II. Horloges dans des emplacements distants

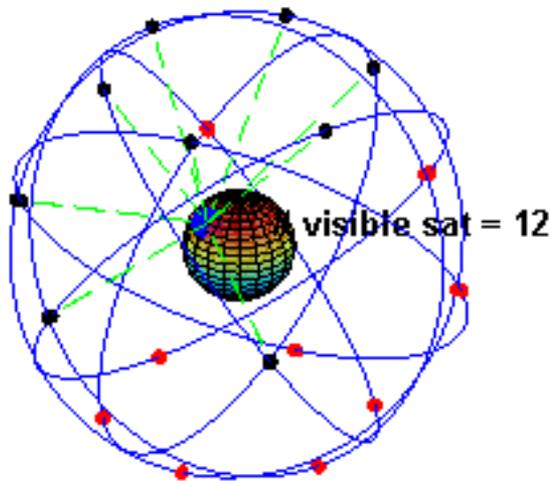
- Laboratoires (sur la Terre)
- En orbite (satellites)
- Comparaison distance (liaison horaire)
- Incertitude fixe des limites à la qualité de la comparaison, cas spécifiques

(\*) GNSS: Global Navigation Satellite System  
TWSTFT: Two-way satellite time and frequency transfer

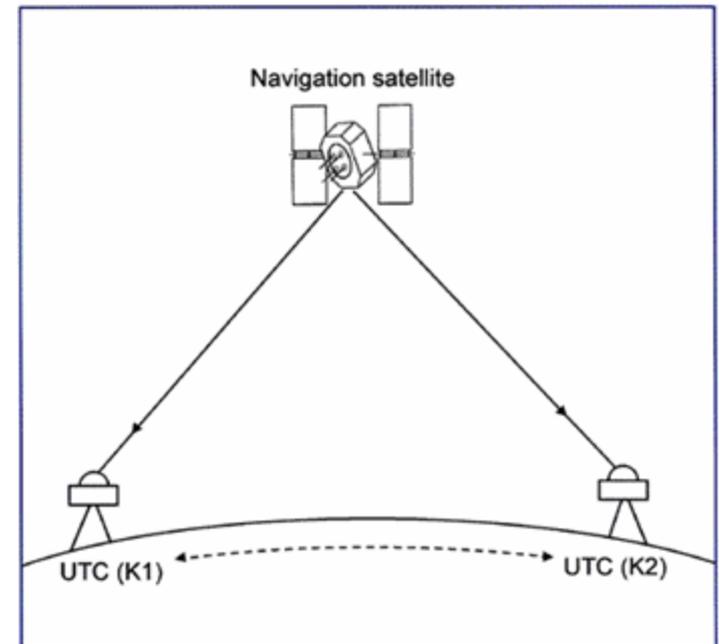
- Transfert des signaux électromagnétiques. Incertitudes associées à la trajectoire du signal à travers un milieu (atmosphère), aux mouvements relatifs laboratoire-satellite, etc.
  - Aller simple du signal, cas des GNSS \*
  - Aller-retour du signal, cas du TWSTFT\*
- Transfert des signaux par fibres optiques. Incertitudes associées à la technique.
  - Liens à échelle national, régional
  - Intercontinental impossible

# Transfert du temps avec GNSS

- GPS (Global Positioning System (USA) utilisé dans tous les laboratoires de temps
- GLONASS (Russe), utilisé dans quelques laboratoires
- GALILEO (Europe), BeiDou (Chine); en développement (2020?)



Le plus simple: vues communes (CV)



- Pas d'influence de l'horloge du satellite
- Retard ionosphérique assez bien caractérisé pour des courtes distances

# GNSS: comparer une horloge avec un signal externe

Dans chaque laboratoire:

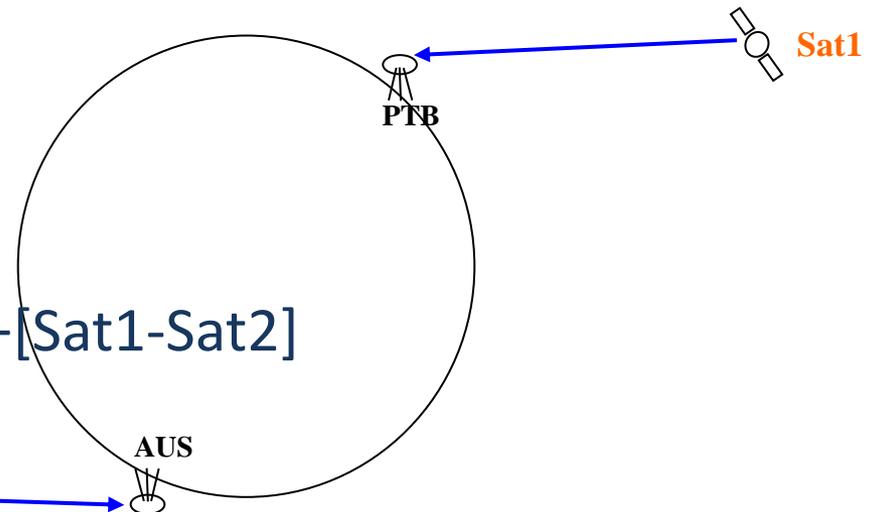
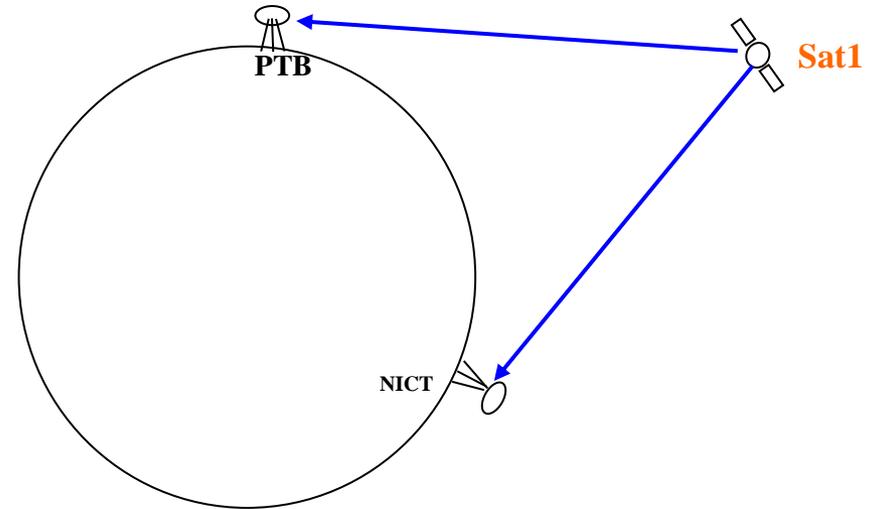
- Hor. Locale – Hor. Satellite

- Vue commune (CV)

$$\text{UTC}(\text{PTB}) - \text{UTC}(\text{NICT}) = [\text{UTC}(\text{PTB}) - \text{Sat1}] - [\text{UTC}(\text{NICT}) - \text{Sat1}]$$

- All-in-view (AV)

$$\text{UTC}(\text{PTB}) - \text{UTC}(\text{AUS}) = [\text{UTC}(\text{PTB}) - \text{Sat1}] - [\text{UTC}(\text{AUS}) - \text{Sat2}] + [\text{Sat1} - \text{Sat2}]$$

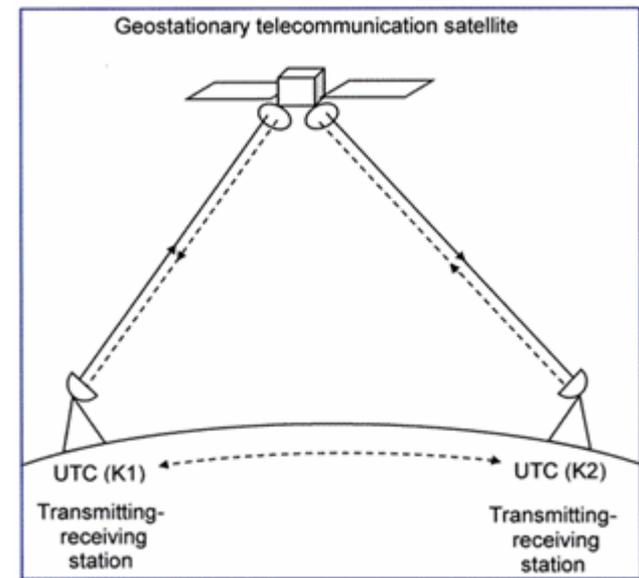


# Comparaison par aller-retour du signal: TWSTFT

- Comparaison directe des horloges
- Pas d'horloge à bord du satellite
- Calcul (relativement) simple
- Effets ionosphériques (presque) annulés

MAIS.....

- Equipement très couteux comparé au GNSS
- Location du satellite couteuse
- Forte coordination entre laboratoires



# Parlons d'incertitudes.....

---

## ◆ GNSS (GPS en particulier)

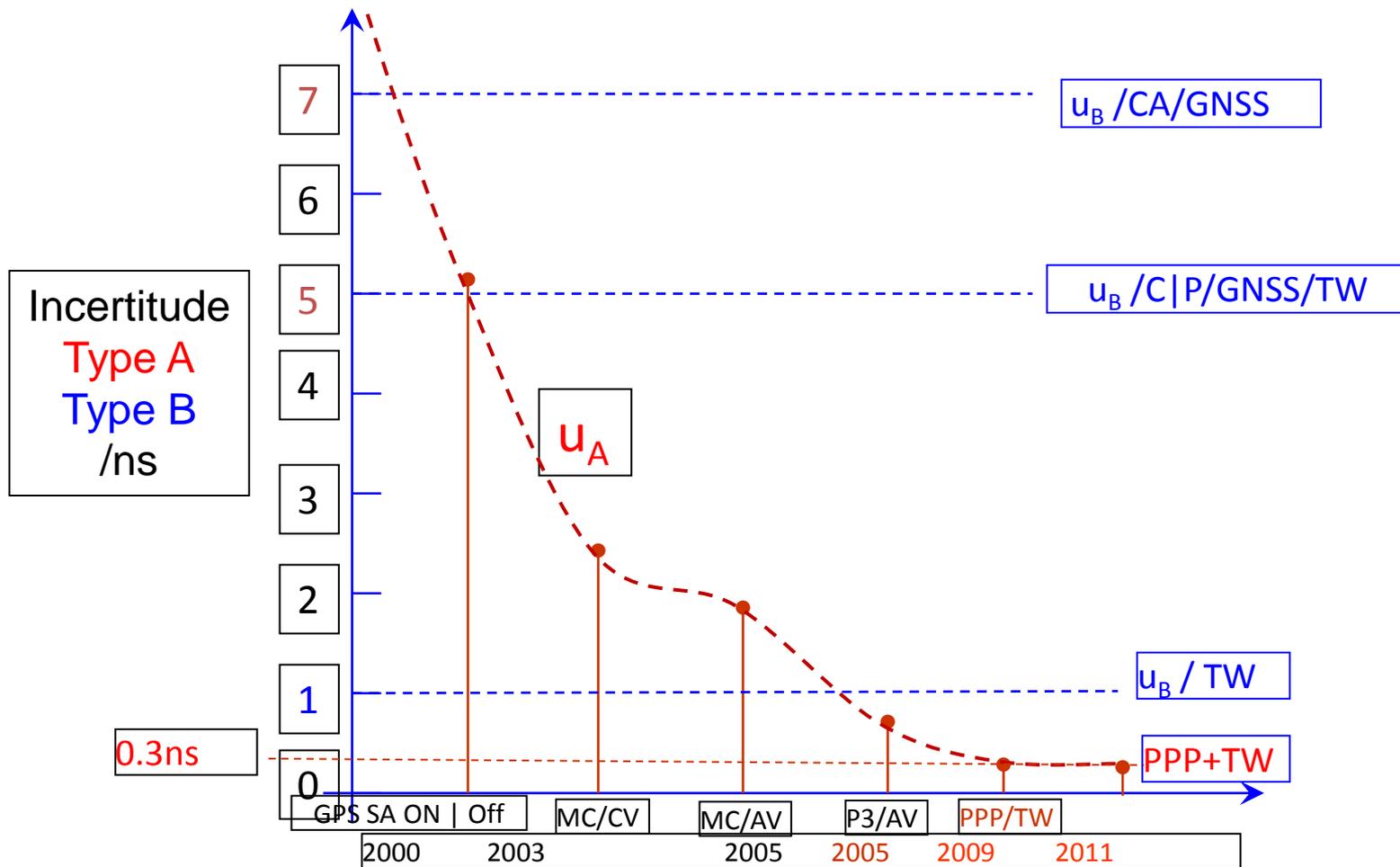
- $u_A$  de l'ordre de 0.1 ns et quelques ns en fonction de équipement/méthode
- $u_B = 5$  ns dans les meilleures conditions, sinon jusqu'à 20 ns

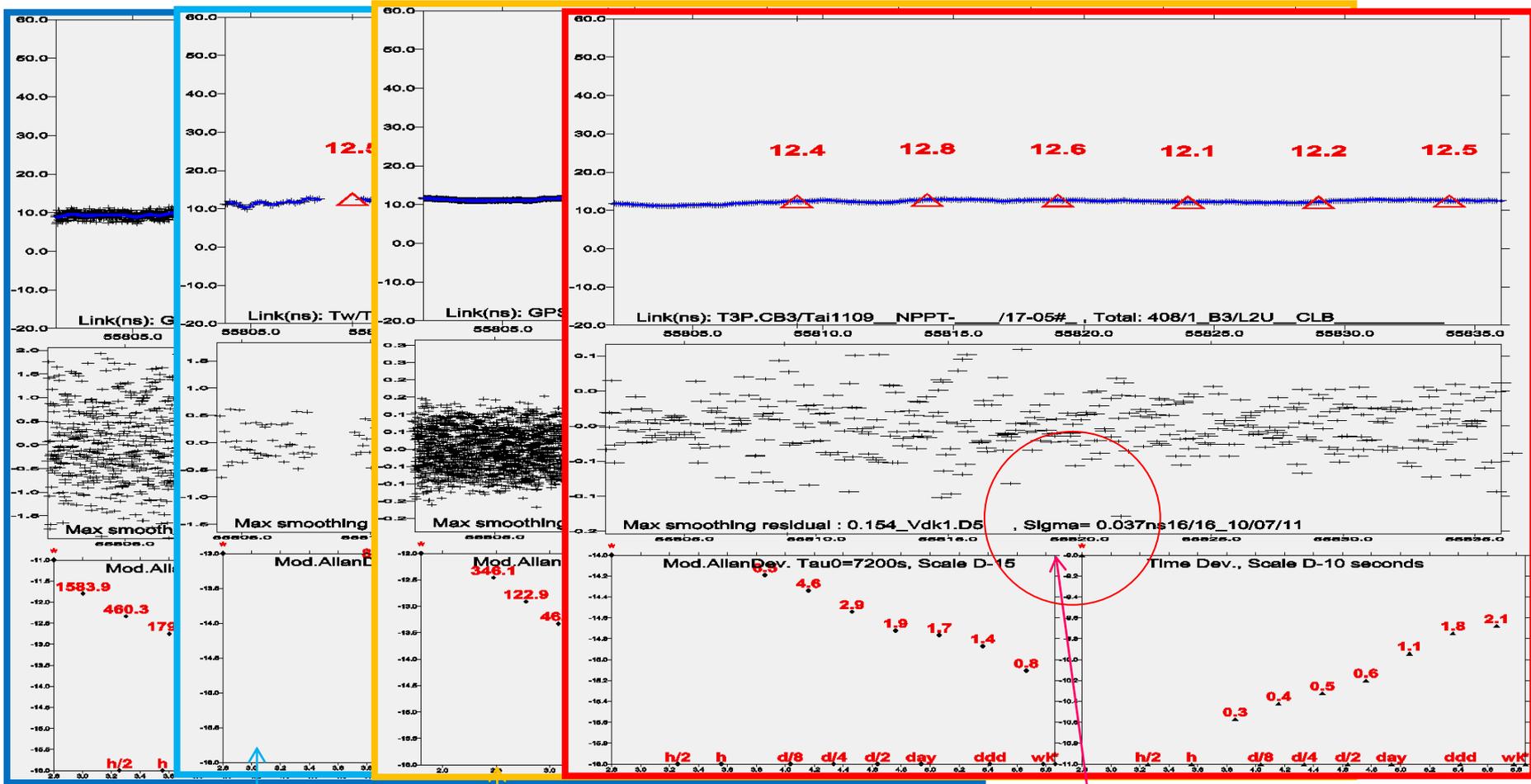
## ◆ TWSTFT

- $u_A$  de l'ordre de 0.1 ns
- $u_B = 1$  ns dans les meilleurs conditions

## ◆ $u_B$ est dominé par l'étalonnage, que caractérise le retard du signal entre le point de son arrivée (antenne) et le point où la mesure se fait

# Incertitude du transfert de temps





$\sigma = 0.43 \text{ ns}$   
TWSTFT

$\sigma = 0.06 \text{ ns}$   
GPS PPP

$\sigma = 0.04 \text{ ns}$   
TW PPP

$\sigma = 0.84 \text{ ns}$   
GPS P3

↑ Poids et  
↓ Mesures

## (b) L'algorithme

- ◆ Idéalement:
  - Lectures simultanées d'horloge  $x_i$ ,
  - Ensemble fixe d'horloges,
  - Contribution ininterrompue des horloges;
- ◆ Dans ces conditions idéales,  $EAL(t) = \{x_i\}(t)$  (moyenne)
- ◆ Dans la situation réelle,
  - Horloges de qualité différente, changeant dans le temps,
  - Interruptions dans la contribution des horloges, changements dans la fréquence des horloges,
  - Arrivée des nouvelles horloges
- ◆  $EAL(t) = \{x_i\}(t) + A + B(t-t_0) + C(t-t_0)^2$

# Les algorithmes dans UTC

- ◆ **EAL** : Echelle Atomique Libre, moyenne pondérée des horloges participant à UTC (environ 450)

Algorithme des poids

Algorithme de prédiction de fréquence

$$EAL(t) = \sum_{i=1}^N w_i [h_i(t) + h'_i(t)]$$

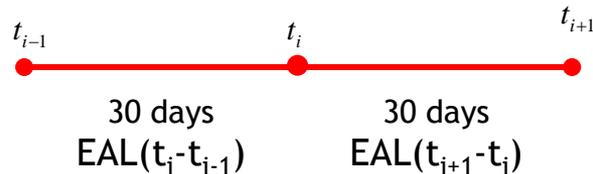
- ◆ **TAI**: la fréquence de EAL est corrigée (si nécessaire) pour qu'elle soit en accord avec celle des étalons primaires de fréquence,

$$f(\text{TAI}) = f(\text{EAL}) + \text{steering frequency}$$

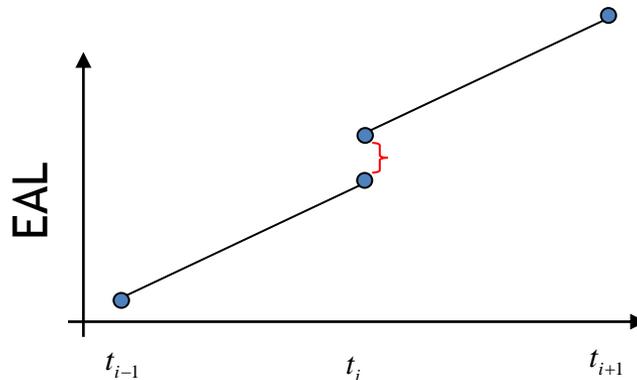
- ◆ **UTC** : Les secondes intercalaires sont ajoutées à TAI (35 en 2014)

# La prédiction de la fréquence

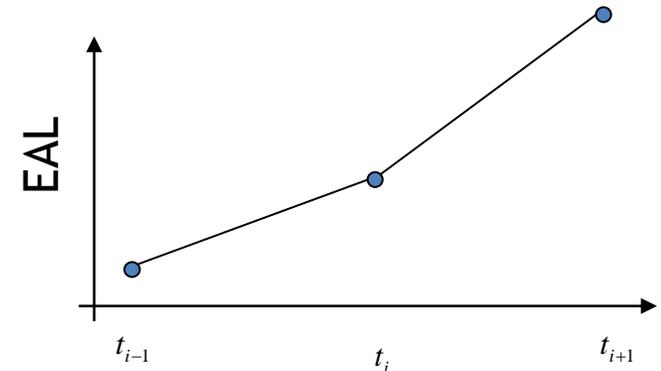
L'ensemble d'horloges change entre deux intervalles de calcul de TAI



La conséquence,



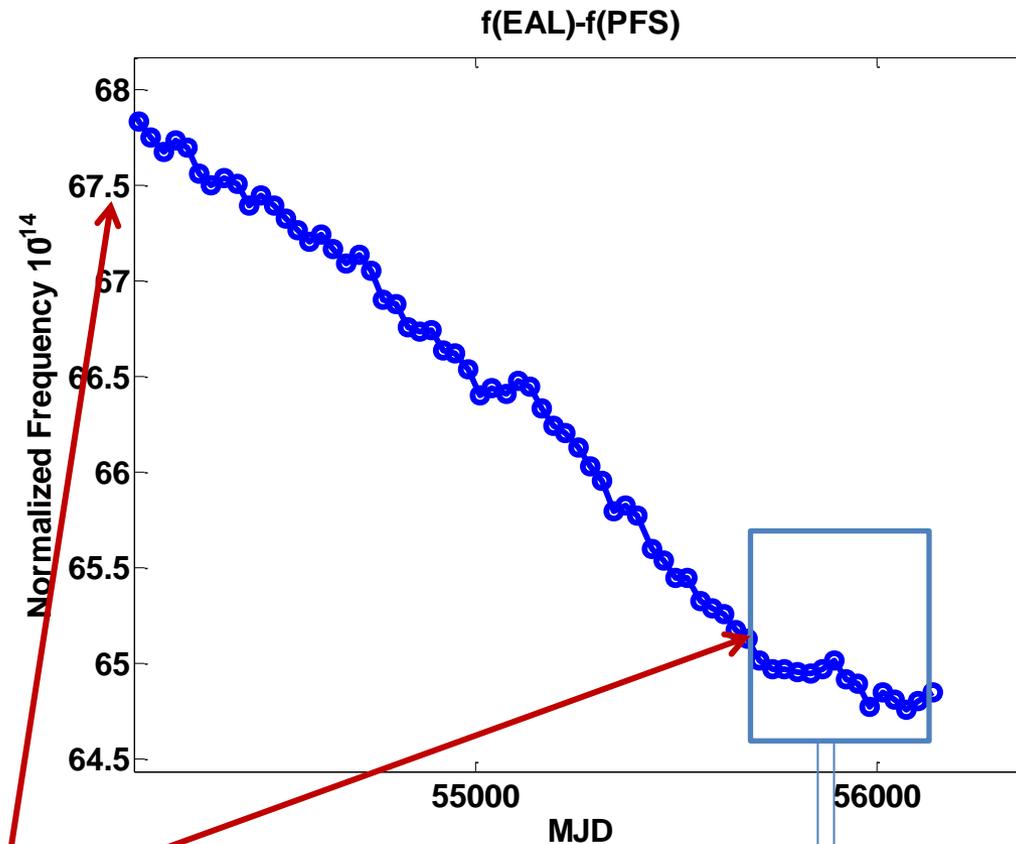
Saut de temps



Saut de fréquence

$$h'_i(t) = \hat{a}_{i,I_k} + \hat{B}_{ip,I_k} (t - t_k) + \frac{1}{2} \hat{C}_{i,I_{k-1}} (t_k - t_{k-1})(t - t_k) + \frac{1}{2} \hat{C}_{ip,I_k} (t - t_k)^2$$

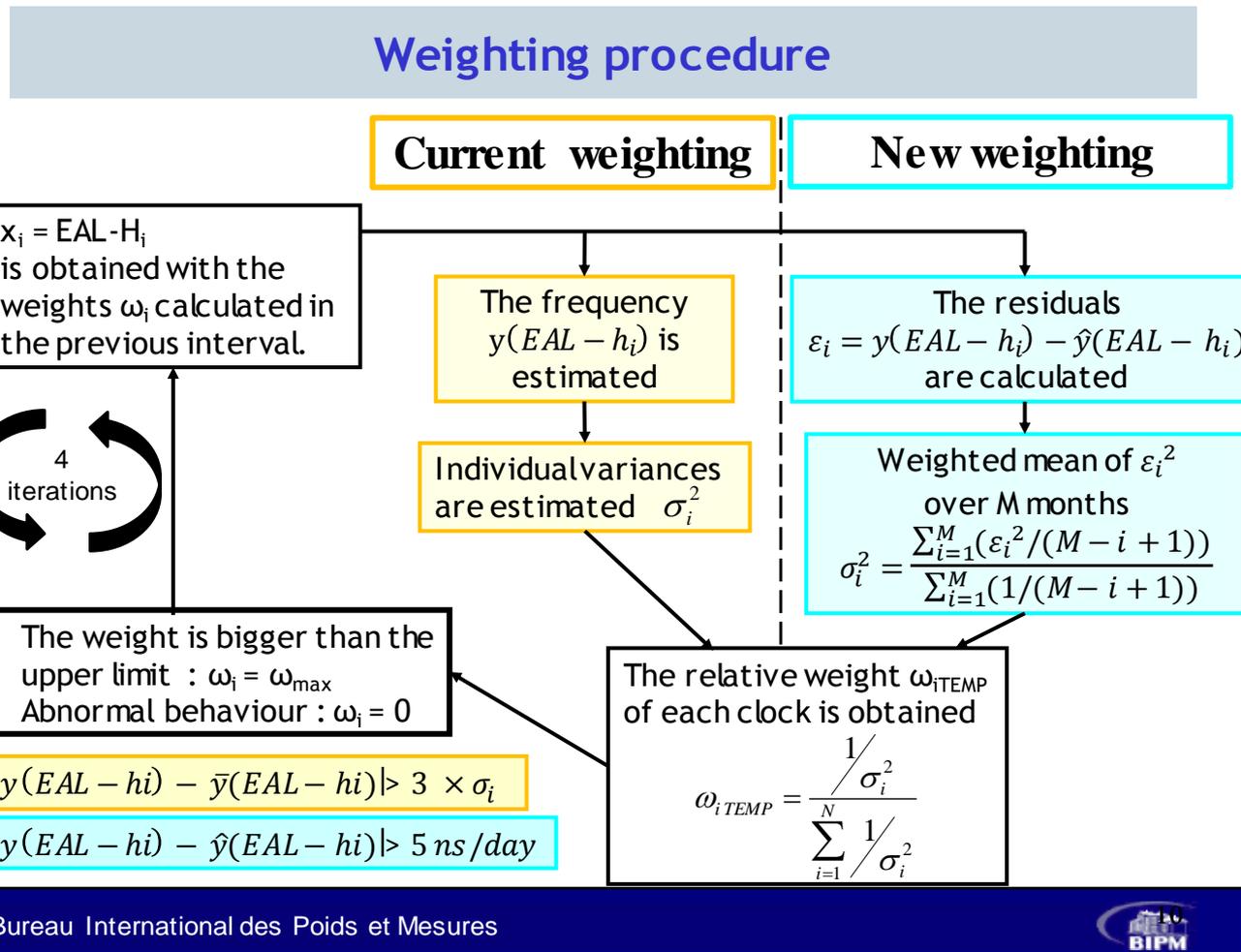
# De prédiction linéaire à modèle quadratique:



$-1.3 \times 10^{-17} / \text{jour}$

Effet du changement  
du modèle

# L'algorithme des poids



# L'algorithme des poids

Le poids de l'horloge  $H_i$  est la réciproque de la variance  $\sigma_i^2$

$$\omega_i = \frac{1/\sigma_i^2}{\sum_{i=1}^N 1/\sigma_i^2}$$

$$\text{Upper Limit} \Rightarrow \omega_{MAX} = \frac{A}{N}$$

Le poids de chaque horloge est limitée  
 $A=4$  (constante empirique)

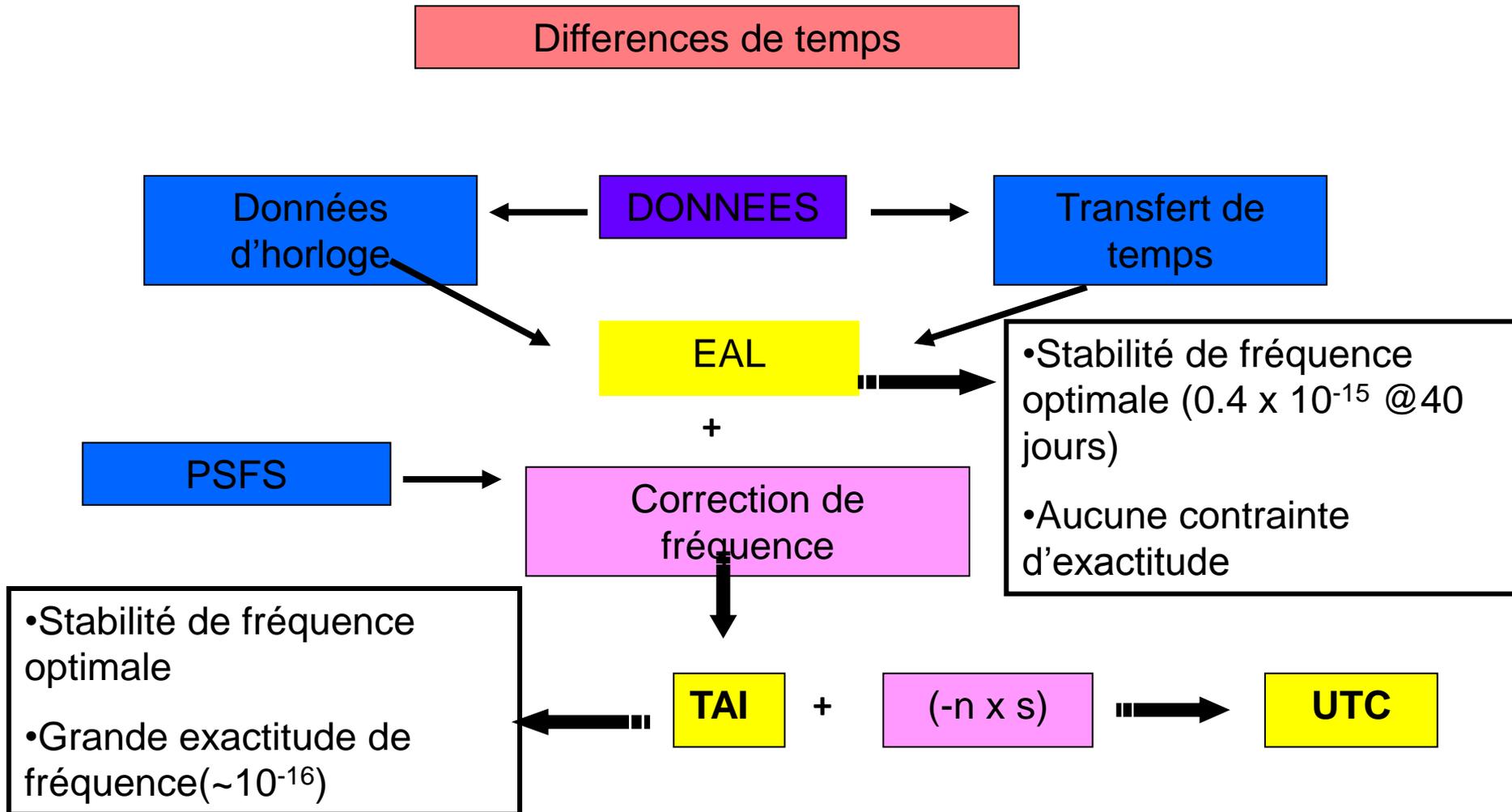
Deux situations particulières sont considérées:

1. Horloge  $H_i$  présente comportement anormale
2. Le poids est supérieure à la valeur limite

Le poids de chaque horloge est calculée en fonction des différences entre la prédiction de sa fréquence et la valeur réelle, le long de l'intervalle de 30 jours plus cinq périodes consécutives de 30 jours dans le passé.



# Processus de construction de UTC



# Le résultat: la Circulaire T du BIPM

CIRCULAR T 320  
2014 SEPTEMBER 10, 10h UTC

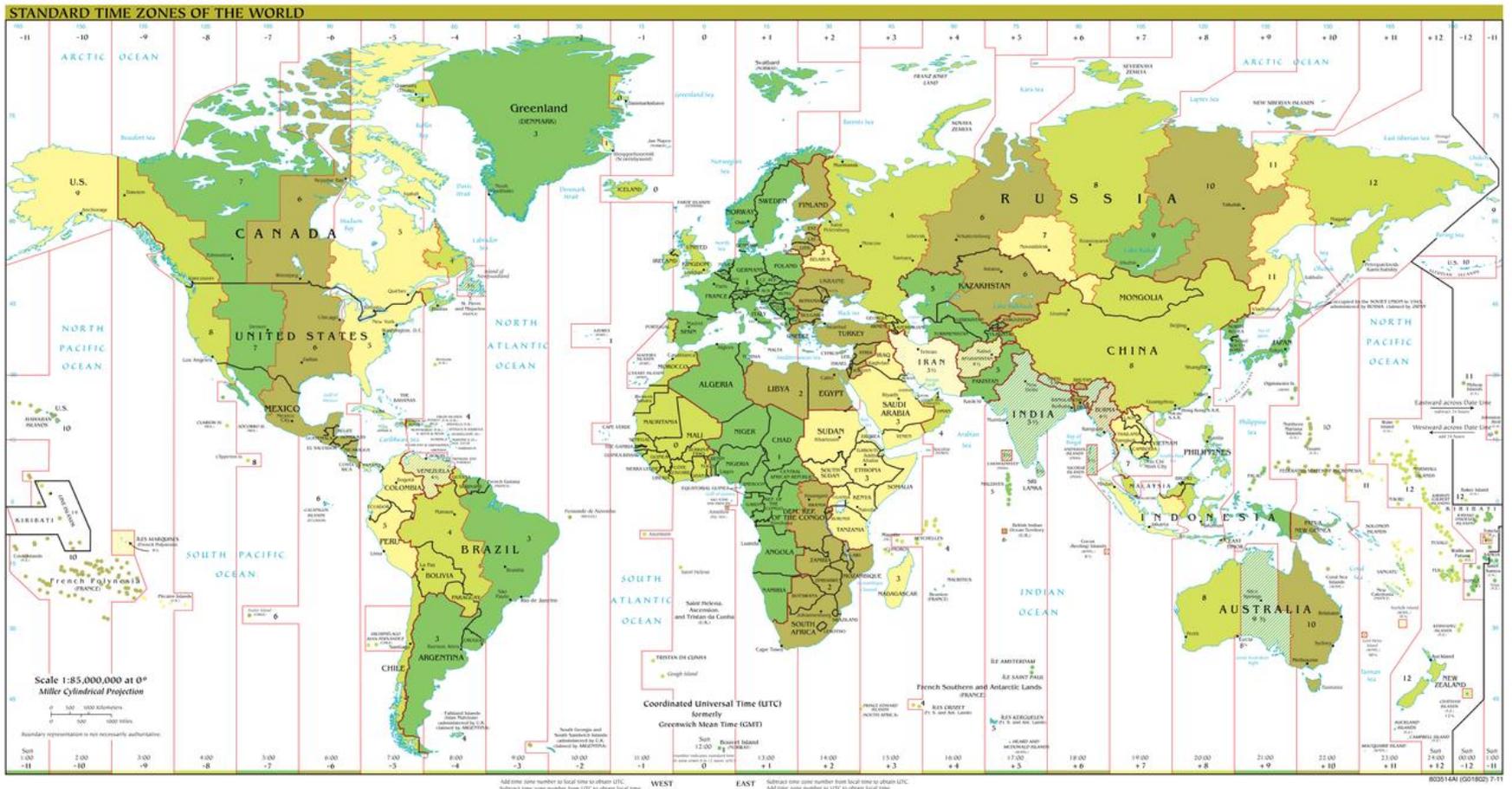
ISSN 1143-1393

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
ORGANISATION INTERGOUVERNEMENTALE DE LA CONVENTION DU METRE  
PAVILLON DE BRETEUIL F-92312 SEVRES CEDEX TEL. +33 1 45 07 70 70 FAX. +33 1 45 34 20 21 tai@bipm.org

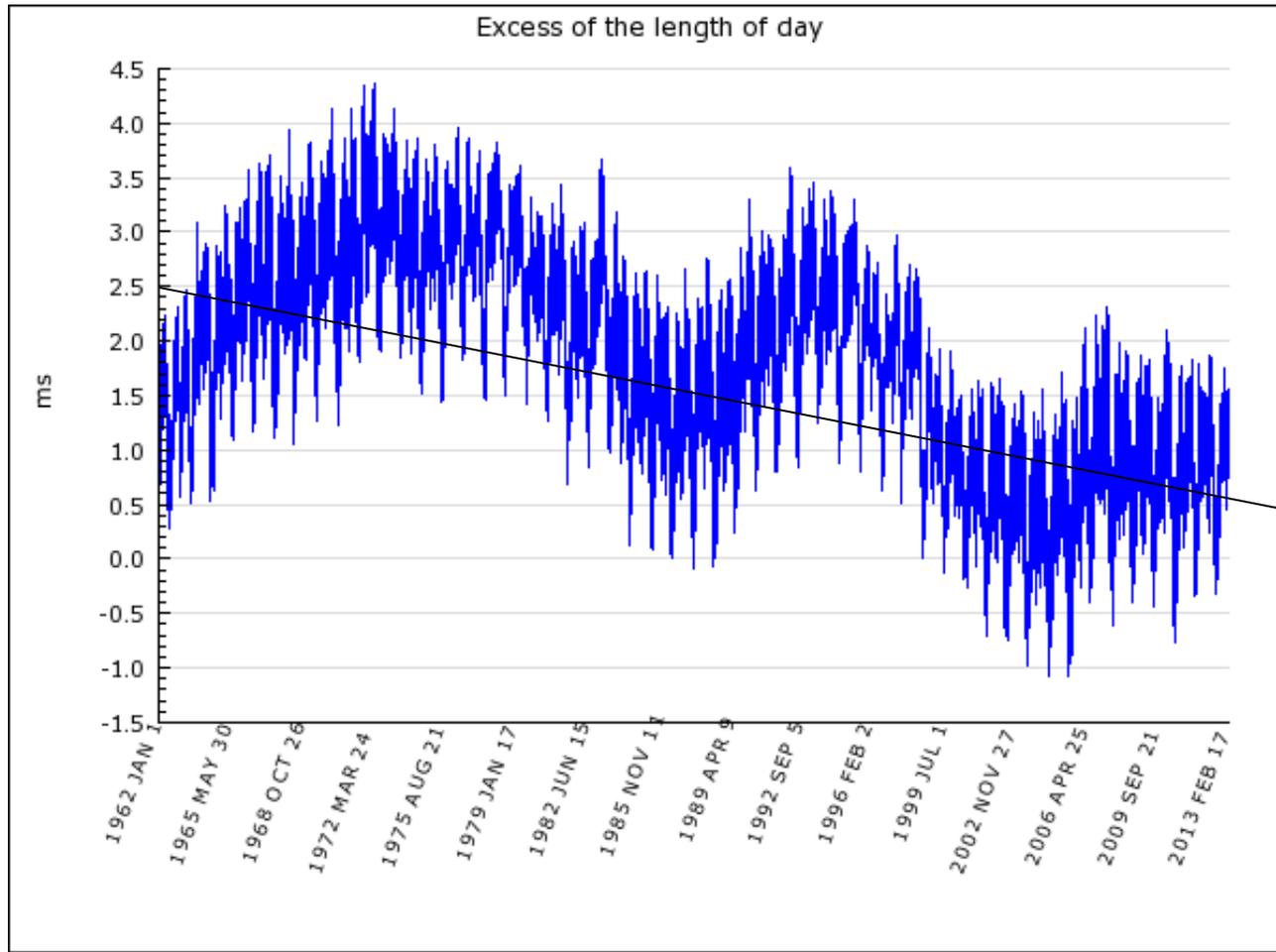
1 - Coordinated Universal Time UTC and its local realizations UTC(k). Computed values of  $[UTC-UTC(k)]$  and uncertainties valid for the period of this Circular. From 2012 July 1, 0h UTC,  $TAI-UTC = 35$  s.

Date 2014	0h UTC	JUL 31	AUG 5	AUG 10	AUG 15	AUG 20	AUG 25	AUG 30	Uncertainty/ns Notes		
MJD		56869	56874	56879	56884	56889	56894	56899	$u_A$	$u_B$	$u$
Laboratory <i>k</i>		$[UTC-UTC(k)]/ns$									
AOS (Borowiec)		-3.9	-5.0	-6.0	-7.6	-9.8	-10.5	-9.3	0.3	5.3	5.3
APL (Laurel)		-2.8	-3.1	-2.6	0.4	1.5	2.0	2.1	0.3	5.3	5.3
AUS (Sydney)		-98.2	-98.6	-110.3	-124.5	-134.3	-150.1	-153.4	0.3	5.3	5.3
BEV (Wien)		-21.9	-14.7	-13.9	-9.2	-13.5	-16.0	-5.8	1.5	3.5	3.8
BIM (Sofiya)		1427.6	1472.7	1486.6	1520.2	1551.8	1580.9	1605.4	1.5	7.2	7.4
BIRM (Beijing)		5.2	9.7	18.4	27.8	23.9	28.8	-	1.5	20.1	20.1
BY (Minsk)		-2.7	-2.1	5.0	2.8	2.7	6.3	9.3	1.5	7.2	7.4
CAO (Cagliari)		-6240.4	-6222.8	-6217.6	-6218.1	-6237.9	-6241.0	-	8.0	7.2	10.8
CH (Bern-Wabern)		-11.4	-8.9	-3.1	-3.8	-2.7	-4.0	-5.6	0.3	2.0	2.0
CNM (Queretaro)		4.4	34.3	29.9	12.1	-2.8	-6.8	7.6	2.0	5.3	5.7
CNMP (Panama)		-21.8	-36.4	-37.4	-25.7	-32.8	-16.5	-11.1	3.5	5.3	6.4
DLR (Oberpfaffenhofen)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DMDM (Belgrade)		-7.3	-4.2	-12.3	-16.9	-18.5	-14.6	-8.5	0.3	7.2	7.2
DTAG (Frankfurt/M)		24.4	23.8	24.1	22.8	17.9	13.0	17.8	0.3	10.2	10.2
EIM (Thessaloniki)		-	-	-	-	-	-	-8.2	7.5	5.3	9.2
ESTC (Noordwijk)		-0.2	-1.0	-1.8	-2.7	-3.5	-3.7	-1.6	0.3	5.2	5.3
HKO (Hong Kong)		871.8	880.5	891.6	903.1	915.7	927.1	942.3	0.3	5.3	5.3
IFAG (Wetzell)		-1233.7	-1235.1	-1234.3	-1230.9	-1221.1	-1211.4	-1213.2	0.3	5.2	5.2
IGNA (Buenos Aires)		-	2766.4	2855.0	2933.6	3020.2	3096.8	3192.9	2.0	5.3	5.7
INPL (Jerusalem)		-86.6	-62.5	11.4	9.8	5.0	4.9	8.7	0.7	7.2	7.2 (1)
INTI (Buenos Aires)		-22.0	-10.7	-7.1	-3.2	-18.8	-19.2	-17.6	2.5	20.1	20.2
INXE (Rio de Janeiro)		32.1	18.0	-2.5	-7.8	-8.0	-1.0	-1.7	0.3	20.1	20.1
IPO (Caparica)		-4.2	6.2	-4.2	-2.6	-4.9	-7.4	2.5	0.4	7.2	7.2
IT (Torino)		1.6	1.3	0.0	-1.4	-2.0	-3.2	-3.8	0.3	2.1	2.1
JATC (Lintong)		4.1	3.1	5.4	1.6	1.7	1.9	2.7	0.5	5.2	5.2
JV (Kjeller)		30.7	40.7	58.2	50.4	61.3	48.6	62.7	5.0	20.1	20.7
KEBS (Nairobi)		-91083.9	-	-	-	641.4	301.9	30.6	1.5	20.1	20.1
KIM (Serpong-Tangerang)		-	1388.7	1357.7	1349.6	1361.4	1356.2	1348.2	2.0	20.1	20.2
KRIS (Daejeon)		2.1	-2.2	-7.6	-11.5	-12.5	-11.6	-8.5	0.3	5.2	5.2
KZ (Astana)		-1199.0	-1217.7	-1236.8	-1269.8	-1297.3	-1314.5	-1308.4	2.5	20.1	20.2

# Les fuseaux horaires



- “Rotational” second defined as a fraction of the day



Before adoption of TAI and UTC

Limits of validity (at 0 h UTC)

$[TAI - UTC] / s$

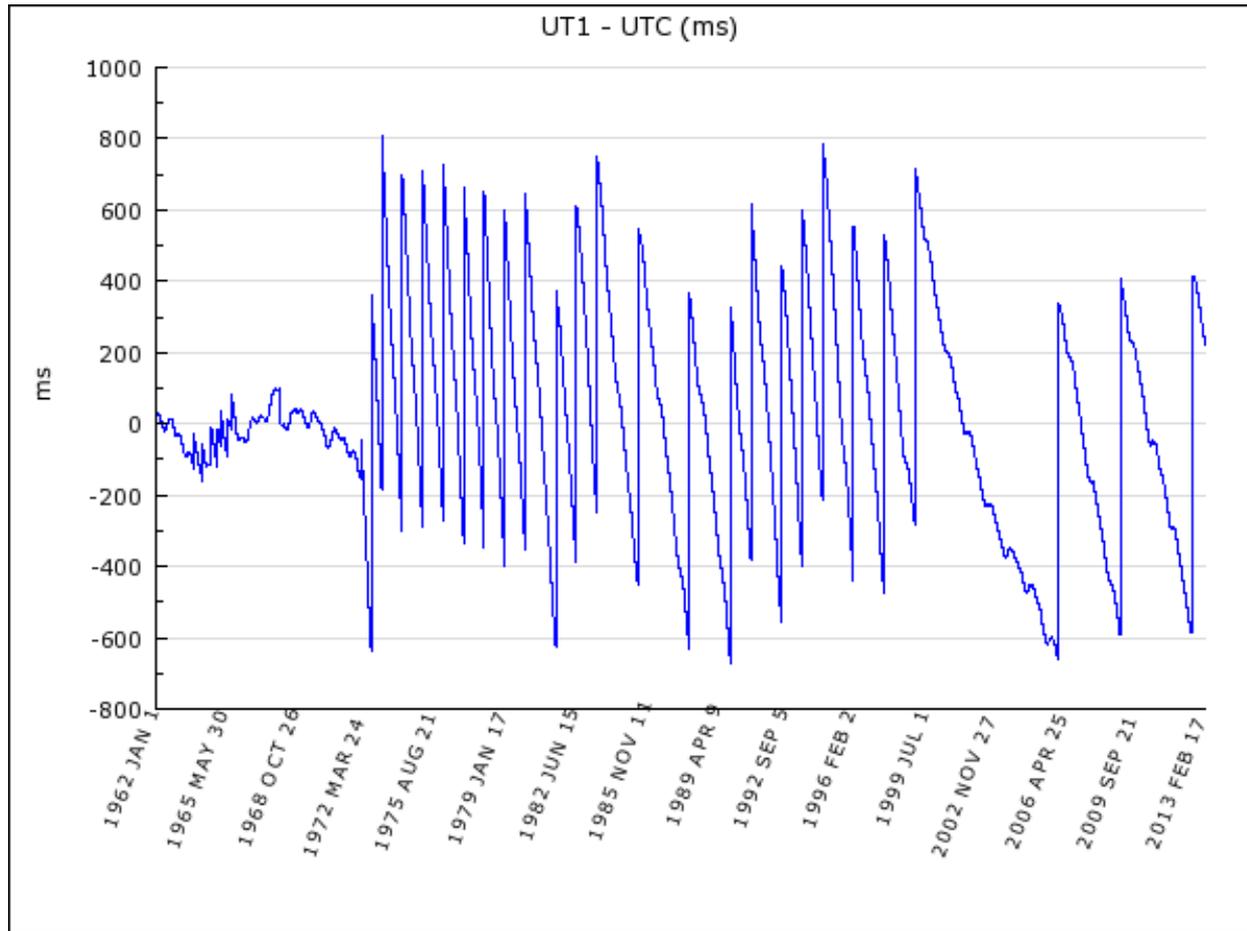
1961	Jan. 1 - 1961	Aug. 1	1.422 8180 + (MJD - 37300) x 0.001 296
1961	Aug. 1 - 1962	Jan. 1	1.372 8180 + " "
1962	Jan. 1 - 1963	Nov. 1	1.845 8580 + (MJD - 37665) x 0.001 1232
1963	Nov. 1 - 1964	Jan. 1	1.945 8580 + " "
1964	Jan. 1 - 1964	Apr. 1	3.240 1300 + (MJD - 38761) x 0.001 296
1964	Apr. 1 - 1964	Sep. 1	3.340 1300 + " "
1964	Sep. 1 - 1965	Jan. 1	3.440 1300 + " "
1965	Jan. 1 - 1965	Mar. 1	3.540 1300 + " "
1965	Mar. 1 - 1965	Jul. 1	3.640 1300 + " "
1965	Jul. 1 - 1965	Sep. 1	3.740 1300 + " "
1965	Sep. 1 - 1966	Jan. 1	3.840 1300 + " "
1966	Jan. 1 - 1968	Feb. 1	4.313 1700 + (MJD - 39126) x 0.002 592
1968	Feb. 1 - 1972	Jan. 1	4.213 1700 + " "

1972	Jan. 1 - 1972	Jul. 1	10	(integral number of seconds)
1972	Jul. 1 - 1973	Jan. 1	11	
1973	Jan. 1 - 1974	Jan. 1	12	
1974	Jan. 1 - 1975	Jan. 1	13	
1975	Jan. 1 - 1976	Jan. 1	14	

After adoption of TAI and UTC, following the ITU recommendation

# UT1-UTC

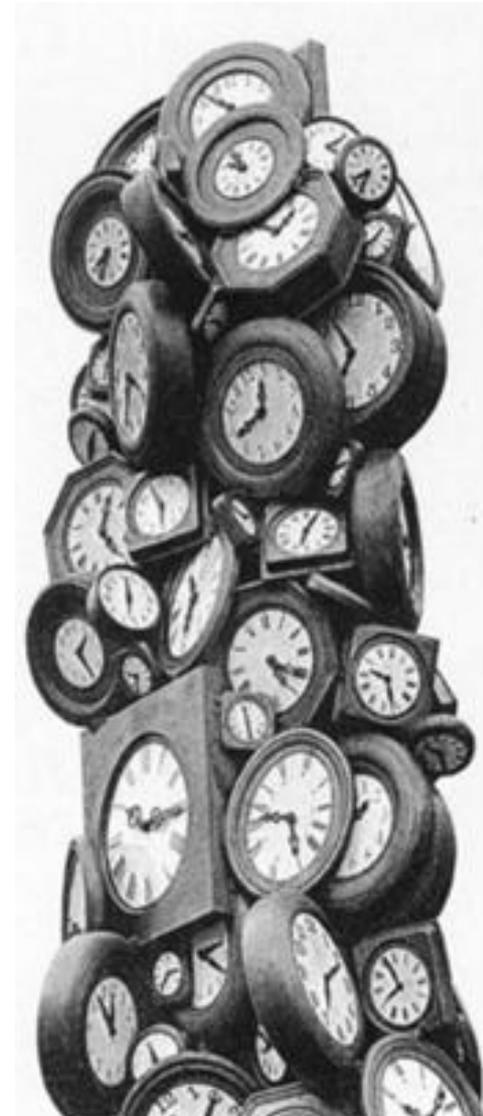
International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)



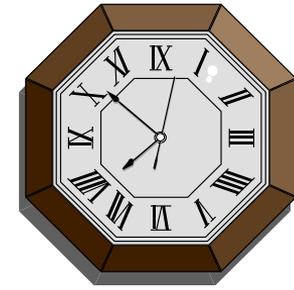
UT1 – TAI  
35 leap  
seconds



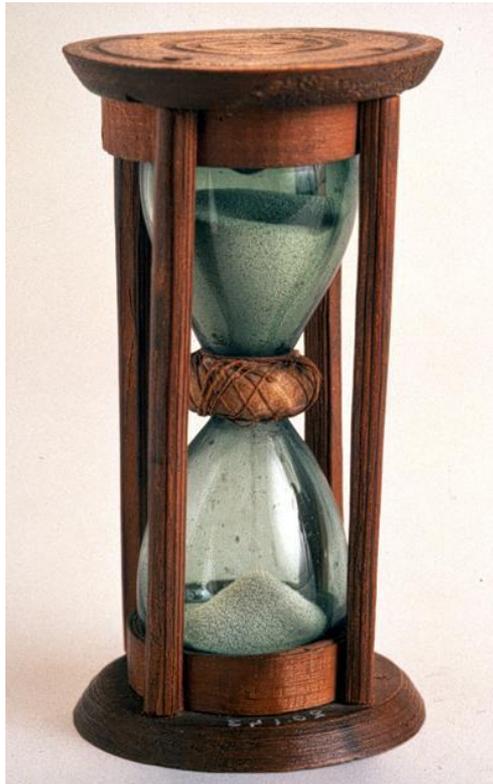
Felicitas Arias  
Directeur Département de Temps  
Bureau International des Poids et Mesures  
E-mail: [farias@bipm.org](mailto:farias@bipm.org)  
[www.bipm.org](http://www.bipm.org)



# What is a clock (1)?



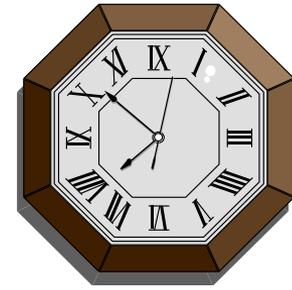
- ◆ Apparently (read a dictionary):
  - "a synchronizing device that produces pulses at regular intervals"
  - Sometime directly realized



June 7, 2010



## What is a clock (2)?



- ◆ More generally:
  - A device providing a periodic signal
  - From the periodic signal, another device generates regular pulses

