

Le temps : Sa fuite, sa flèche et ses gardiens

François Vernotte

UTINAM

Observatoire des Sciences de l'Univers
"THETA" de Franche-Comté/Bourgogne

Besançon

Le temps : sa fuite, sa flèche et ses gardiens

- ▣ Le temps, cette étrange dimension...
- ▣ Comment mesurer le temps ?
- ▣ Comment garder le temps ?
- ▣ Pourquoi maîtriser le temps ?
- ▣ Le futur du temps...

Le temps, cette étrange dimension...

Quatre coordonnées pour un rendez-vous

- Pour être sûr de se rencontrer, il faut :
 - La longitude
 - La latitude
 - L'altitude
 - La date (l'heure)
- Trois coordonnées d'espace
- Une coordonnée de temps
- Elles n'ont pas le même statut...



Le temps s'en va, le temps s'en va Madame
Las le temps ! non, mais nous nous en allons,
Et tôt serons étendus sous la lame.

Ronsard

Le temps fuit-il ?

- ▣ On peut se déplacer (presque) à volonté suivant les 3 dimensions d'espace
- ▣ Le temps nous emporte inexorablement dans sa course
- ▣ Tout déplacement à lieu suivant au moins une dimension d'espace et le temps
- ▣ Toute évolution se déroule dans le temps

La flèche du temps (I)

- ▣ Quelle différence y a-t-il entre le billard français...



- ▣ ... et le billard américain ?



- ▣ Réponse : la flèche du temps !

La flèche du temps (II)

- ▣ Beaucoup de phénomènes sont probables dans un sens et improbables dans l'autre...
 - Irréversibilité et forces non conservatives
 - Le désordre de l'univers ne fait qu'augmenter !
- ▣ En physique :
 - l'entropie est la grandeur qui mesure le désordre
 - L'entropie est toujours croissante !

La flèche du temps (III)

- ▣ L'autre expression de la flèche du temps : **la causalité**
 - La cause précède toujours l'effet !
 - On ne peut pas prédire l'avenir...
 - Aucune observation de la violation du principe de causalité
- ▣ Exemple : l'ampli audio à bande passante rectangulaire...

Un effet inattendu de la causalité... (I)

- ▣ Imaginons un système

micro

ampli

haut-parleur

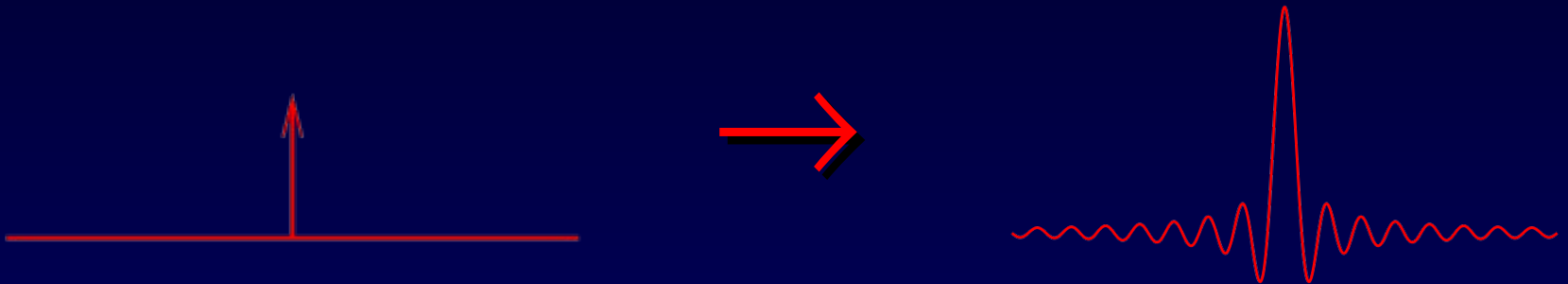


- ▣ Sa “bande passante” est telle que :
 - il laisse passer totalement toutes les fréquences audibles (< 20 kHz)
 - il coupe totalement toutes les autres

Un effet inattendu de la causalité... (II)



- ▣ Que se passe-t-il si on donne une tape sur le micro (impulsion) ?



- ▣ Le filtre n'est pas "causal" ...

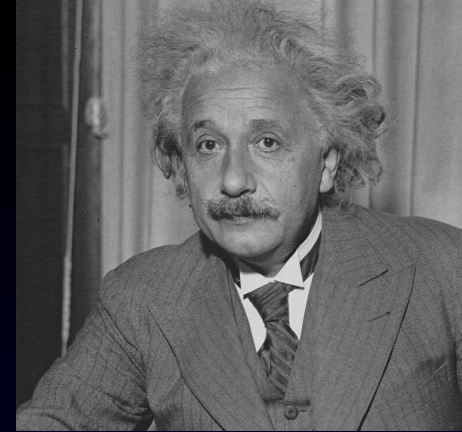
⇒ **Il ne peut pas être réalisé !**

La flèche du temps (fin)

La flèche du temps s'exprime par :

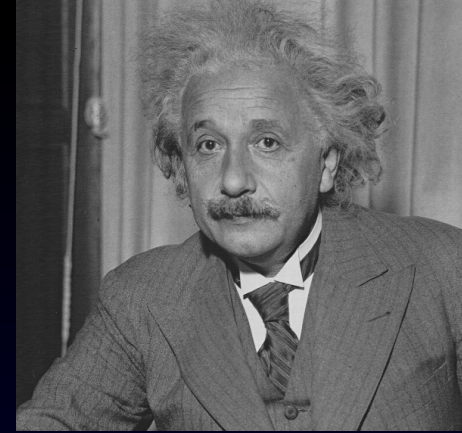
- ▣ **L'irréversibilité**
 - L'entropie ne cesse d'augmenter
- ▣ **La causalité**
 - On ne peut pas prédire l'avenir...

Le temps est relatif (I)



- ▣ En 1905, Einstein construit la relativité (restreinte) à partir de 2 postulats :
 - *Les résultats de toute expérience conduite à l'intérieur d'un système de référence sont indépendants de tout mouvement de translation uniforme de ce système de référence.*
 - *Dans tout système de référence, la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse de sa source.*

Le temps est relatif (II)



▣ La durée d'une expérience varie en fonction du système de référence dans lequel on la mesure !

⇒ Le temps (pas plus que l'espace) n'est pas un cadre absolu dans lequel évolue l'univers...



Le temps, cette étrange dimension...

- ▣ Le temps est très difficile à définir en dehors des tautologies et des lieux communs
- ▣ Le temps est-une coordonnée de l'espace-temps
- ▣ Nous ne pouvons nous déplacer que vers le futur...

Comment mesurer le temps ?

Des calendriers aux horloges atomiques

- ▣ Les **calendriers**, ou comment réconcilier
 - le rythme des jours,
 - le rythme des cycles lunaires (29,53 j),
 - le rythme des saisons (365,24 j) ?
- ▣ Des calendriers **solaires**
- ▣ Des calendriers **lunaires**
- ▣ Des calendriers **luni-solaires**

La durée de l'année

Quelle est la durée de l'année ?

- ▣ **Vers -5000** : Egypte → 365 jours
 - Cycles “sothiaque” de 1461 ans
- ▣ **- 46** : Jules César → 365,25 jours
 - Invention des années bissextiles
- ▣ **1582** : Grégoire XIII → 365,2422 jours
 - Le lendemain du jeudi 4 octobre 1582 fut le vendredi 15 octobre 1582 !
 - Les années multiples de 100 ne sont pas bissextiles sauf si elles sont multiples de 400...

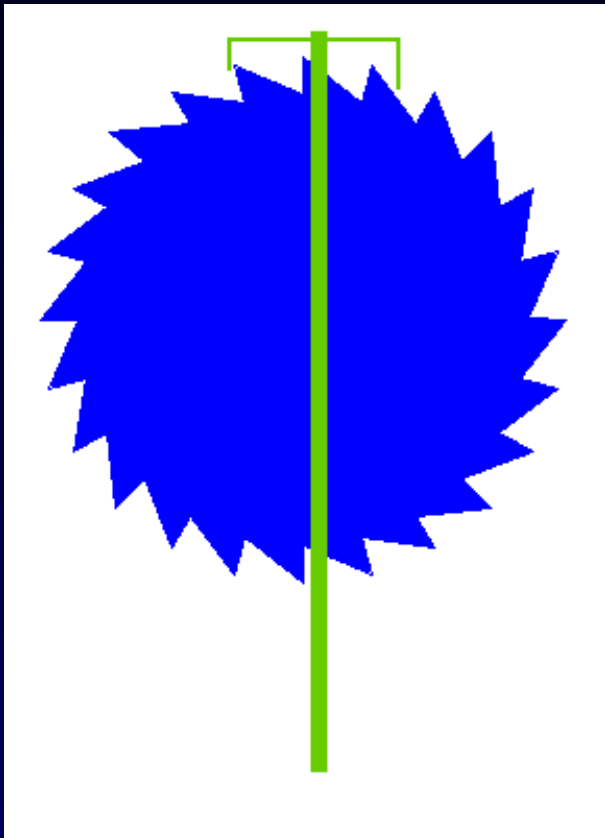


L'heure et l'horloge mécanique

Comment subdiviser le jour ?

- ▣ L'**heure** des romains est « élastique »
 - 12 heures de jour et 12 heures de nuit !
- ▣ L'invention de l'**horloge mécanique** (XIII^{ème} siècle) stabilise sa durée
- ▣ Il faut attendre la fin du XVII^{ème} siècle pour avoir les horloges à **balancier** (pendule) et à **échappement à ancre**

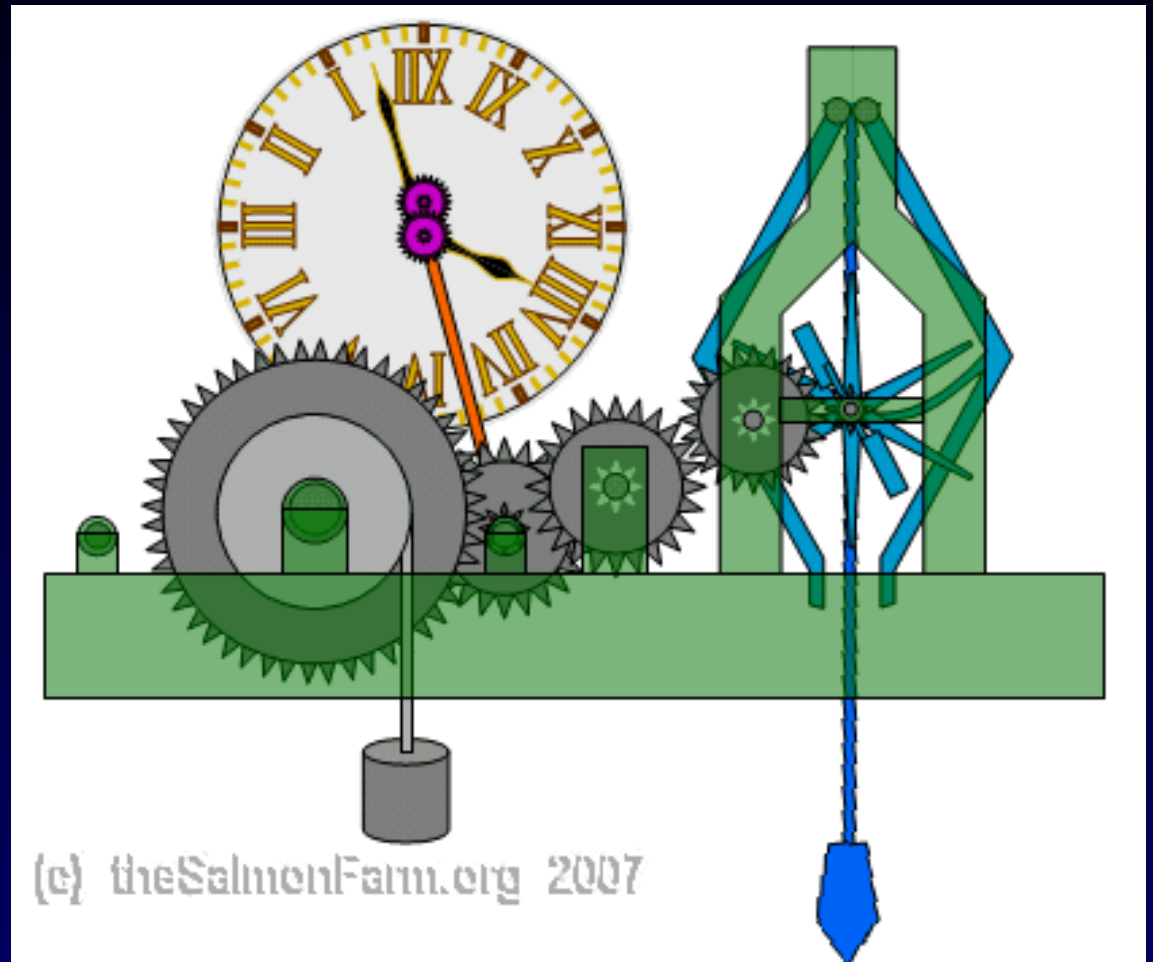
De l'heure à la minute...



L'échappement à ancre
(fin du XVII^{ème} siècle)

De la minute à la seconde...

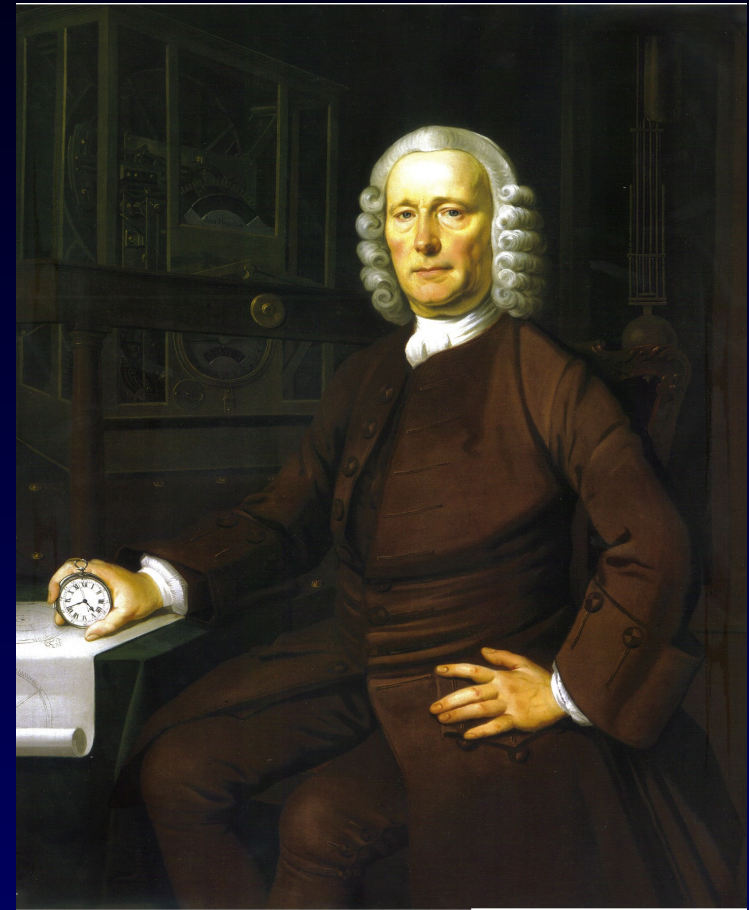
L'horloge à
pendule et à
échappement
à ancre



L'apprivoisement de la seconde

La navigation a besoin de la **seconde**

- 1714 : le « **Longitude Act** » offre 20 000 £ pour déterminer la longitude en mer
- 1760 : **Harrison** gagne le prix avec son chronomètre « **H4** »



L'horloge mécanique d'observatoire

- ▣ Au XVIII^{ème} puis au XIX^{ème} siècle les horlogers perfectionnent les horloges à pendule
- ▣ Stabilité :
~ 0,1 sec/jour



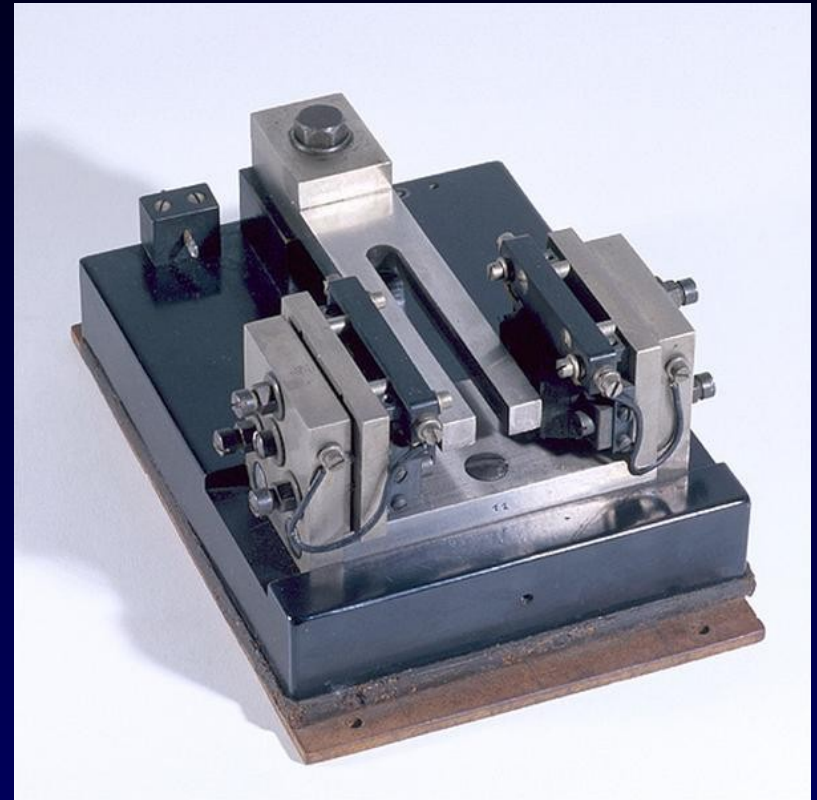
L'horloge à pression constante



- ▣ Début XX^{ème} siècle : elle s'affranchit (presque) des variations de température et de pression
- ▣ Stabilité :
~ 0,01 sec/jour

L'horloge électrique à diapason

- ▣ 1915-1945
- ▣ Fréquence :
1000 Hz (cycles
par seconde)
- ▣ Stabilité :
~ 0,001 sec/jour



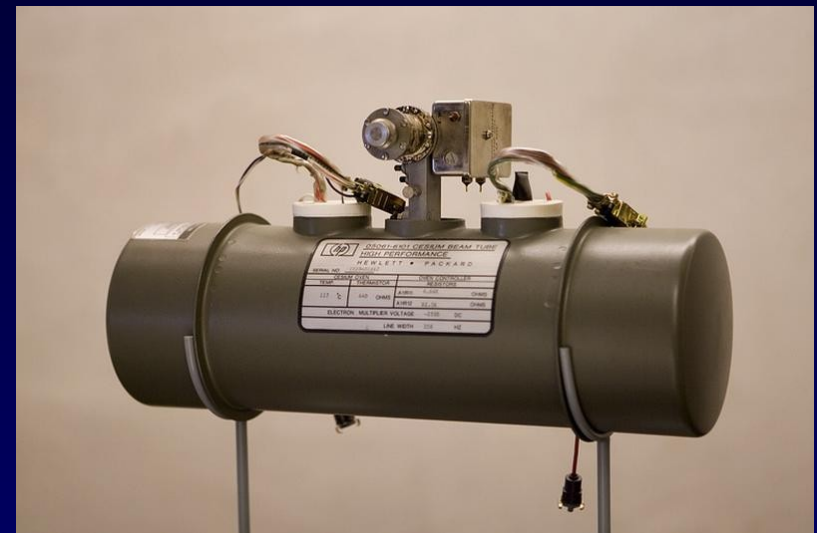
L'horloge à quartz



- ▣ 1930-1970
- ▣ Fréquence :
100 000 Hz
- ▣ Stabilité :
~ 0,0001 sec/jour

L'horloge atomique

- 1960 – aujourd'hui
- Fréquence :
9 192 631 770 Hz
- Stabilité :
 $\sim 10^{-9}$ sec/jour
- Exactitude
intrinsèque de la
transition atomique



L'horloge atomique

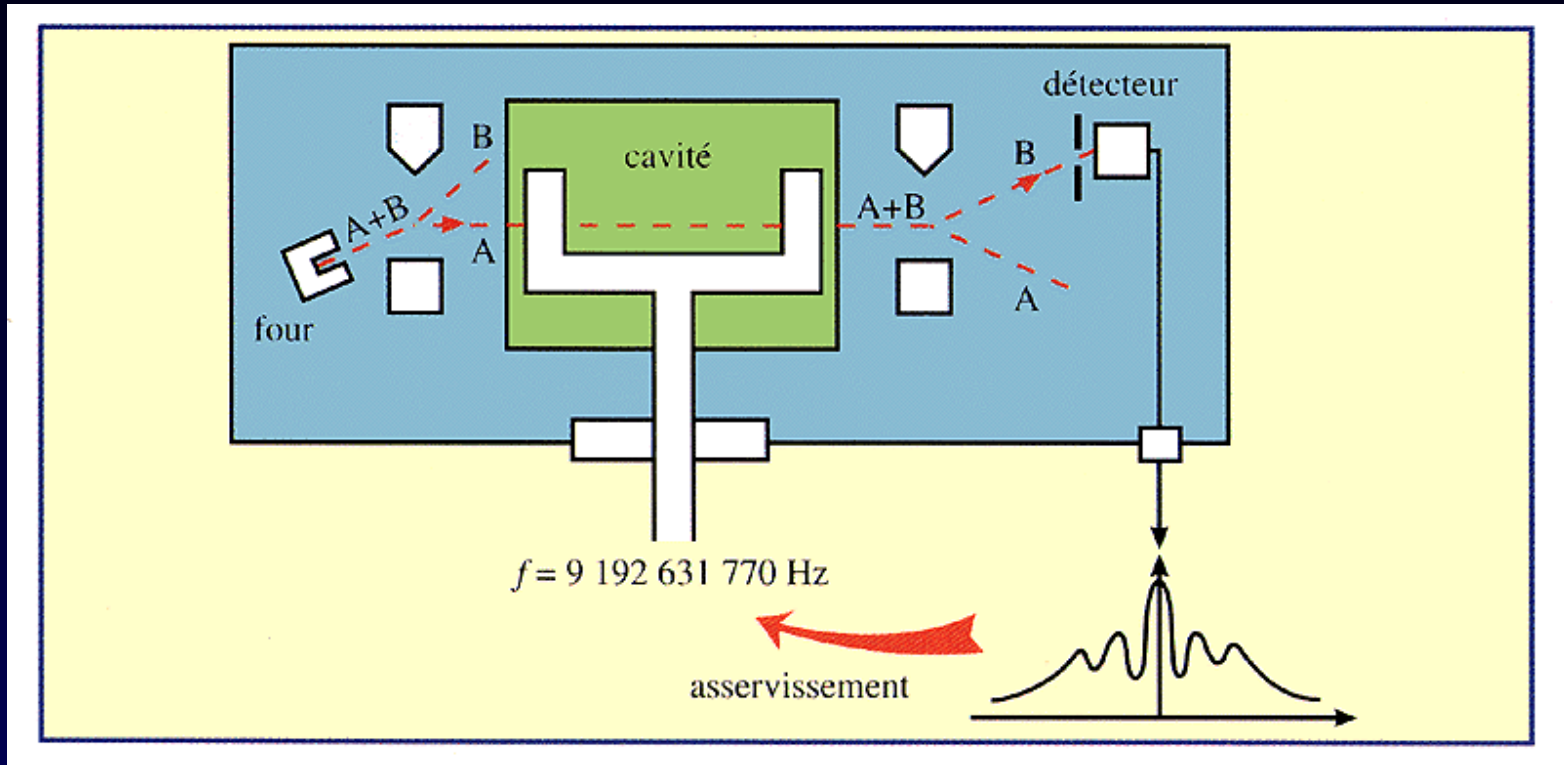


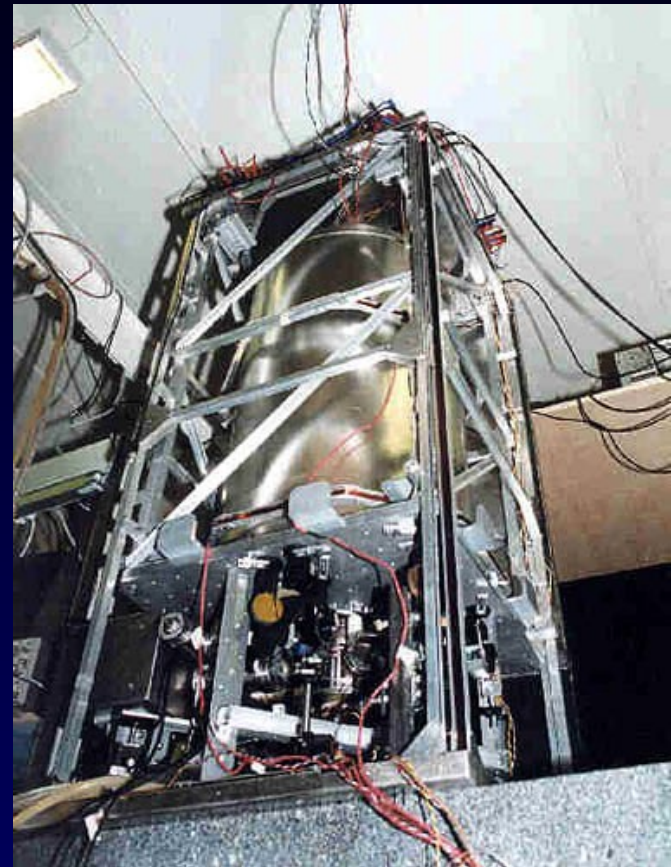
Schéma d'une horloge atomique à jet de Césium

Les horloges atomiques à atomes « froids »

La fontaine atomique
de l'Observatoire de
Paris :

une horloge à atomes
froids.

Hauteur : 1,20 mètres



Comment garder le temps ?

Les quatre qualités d'une échelle de temps

- ▣ **Pérennité** : une échelle de temps doit pouvoir continuer à dater tous les événements futurs
- ▣ **Accessibilité - Universalité** : une échelle de temps doit être accessible à tous les utilisateurs potentiels
- ▣ **Stabilité** : la durée de l'unité d'une échelle de temps doit être constante dans le temps
- ▣ **Exactitude** : la durée de l'unité d'une échelle de temps doit être égale à la définition de l'unité

Les Anciennes Échelles de Temps

- Première définition de la seconde (définition officielle de la seconde du Système International d'unité jusqu'en 1960) :

La seconde est la 1/86400^{ème} partie du jour solaire moyen.

- L'échelle de temps qui lui correspond est le Temps Universel (UT) :

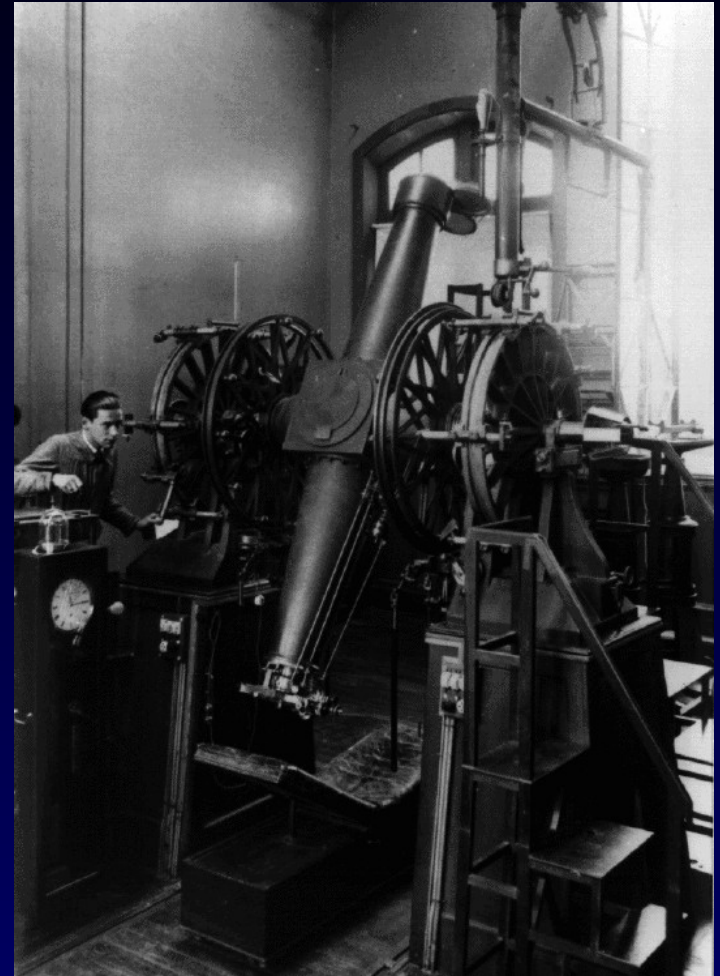
Le Temps Universel UT est le temps solaire moyen pour le méridien origine augmenté de 12 heures.

Le temps solaire moyen est un angle.

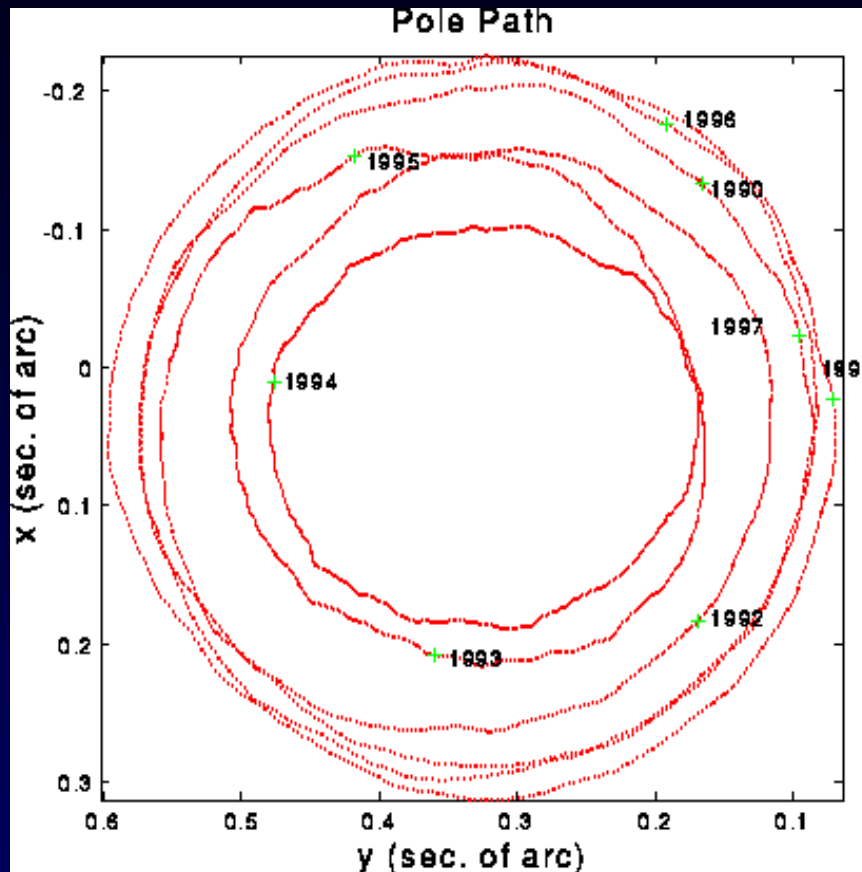
Les Anciennes Échelles de Temps

Comment
déterminer le temps
universel ?

En notant l'instant
de passage au
méridien (plan
Nord-Sud) d'étoiles
de coordonnées
connues.



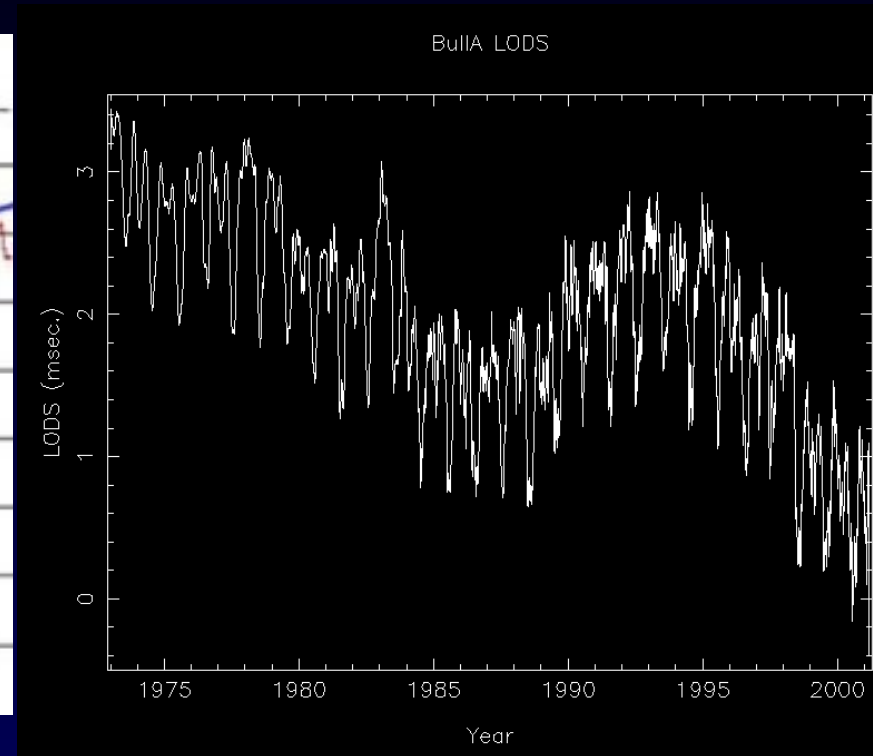
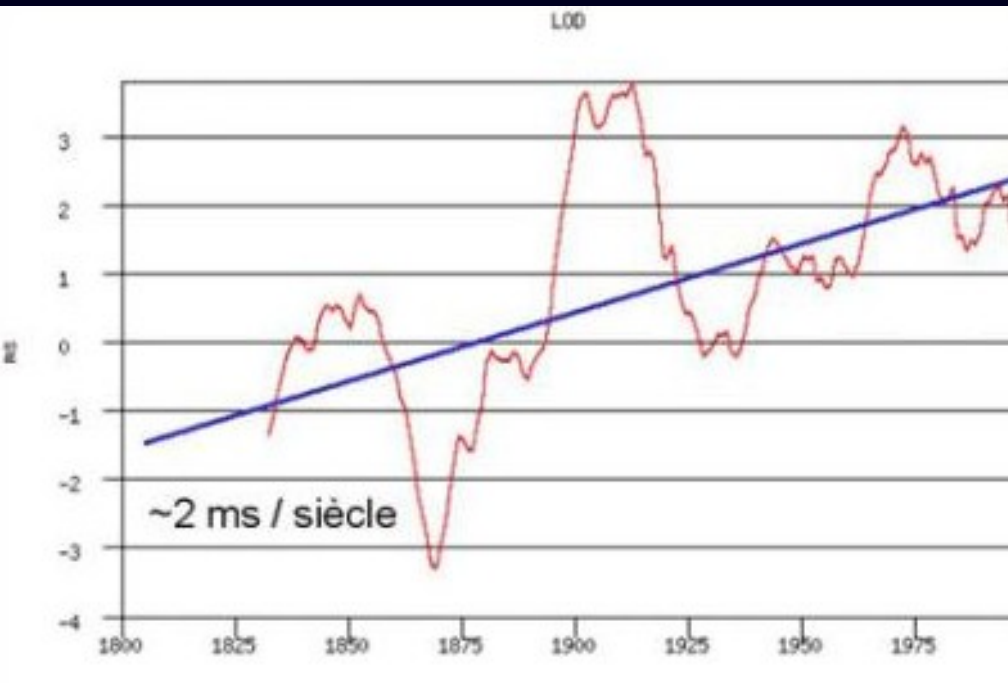
Les Anciennes Échelles de Temps



Evolution de la
position du pôle
Nord
géographique

*0,1 seconde d'arc
représente 30
mètres sur le terrain*

Les Anciennes Échelles de Temps



Evolution de la durée du jour solaire moyen

La terre ralentit !

Les Anciennes Échelles de Temps

Incertitudes sur la détermination du temps universel :

- ▣ En temps réel (UT0) : 0,1 seconde
- ▣ Après correction (UT1) : 1 milliseconde

La correction est connue au bout d'environ 2 mois.

Les Anciennes Échelles de Temps

- ▣ Deuxième définition de la seconde (1960-67) :

La seconde est la fraction 1/31.556.925,9747 de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides.

- ▣ L'échelle de temps qui lui correspond est le Temps des Éphémérides (TE) :

Le Temps des Éphémérides TE est obtenu comme solution de l'équation qui donne la longitude moyenne géométrique du Soleil :

$$L = 279^{\circ}41'48,04'' + 129.602.768,13'' T + 1,089'' T^2$$

T est compté en siècles juliens de 36525 jours des éphémérides.

L'origine de T est datée le 0 janvier 1900 à 12h TE, à l'instant où la longitude moyenne du Soleil a pris la valeur 279°41'48,04".

Les Anciennes Échelles de Temps

Comment déterminer le temps des éphémérides ?

- ▣ Théoriquement, en mesurant la position du Soleil par rapport à des étoiles de coordonnées connues.
- ▣ Pratiquement, en mesurant la position de la Lune par rapport à des étoiles de coordonnées connues.
(après avoir étalonné cette horloge secondaire par rapport au mouvement en longitude du Soleil)

Les Anciennes Échelles de Temps

Incertitudes sur la détermination
du temps des éphémérides :

- ▣ A court terme : nettement moins
bonnes que UT
- ▣ A long terme (au delà d'un an) : de
l'ordre d'un milliardième (10^{-9})
soit environ 1 seconde sur 10 ans

Le Temps Atomique

- ▣ Troisième définition de la seconde (depuis 1967) :

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'échelle de temps qui en découle est le Temps Atomique International (TAI) :

Le Temps Atomique International TAI est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau International des Poids et Mesures sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système International d'unités.

Le TAI est la référence officielle pour dater les événements.

Le Temps Atomique

Comment déterminer le TAI ?

1. Chaque laboratoire doit réaliser une échelle de temps atomique locale (*accessibilité*) grâce à plusieurs étalons atomiques (*pérennité*).
2. Les échelles de temps atomique local doivent être intercomparées (*universalité*).
3. Le TAI est calculé par une moyenne pondérée des diverses échelles de temps atomique locale : le coefficient de pondération est déterminé par les performances (*stabilité, exactitude*) de chaque échelle locale.
4. Chaque laboratoire reçoit la correspondance entre son échelle locale et le TAI pour la période écoulée (*universalité*) : tous les événements peuvent être « redatés » par rapport au TAI.

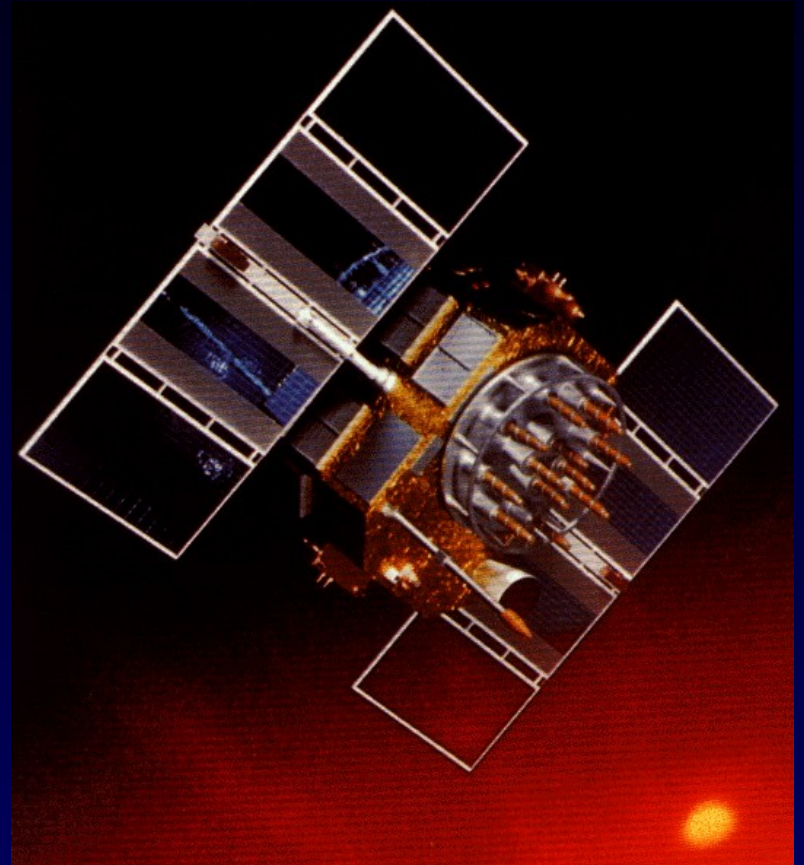
Le Temps Atomique

Intercomparaison des échelles de temps locales :

surtout grâce à GPS (Global Positioning System)

Exactitude :

environ 3 nanosecondes
(1 ns = 1 milliardième de seconde)



Le Temps Atomique

Instabilités du TAI

Estimées à partir de :

- ▣ l'écart de chaque horloge participant au TAI avec le TAI
- ▣ les incertitudes de raccordement.

Maintenant (2015) : $\sim 10^{-15}$

soit 1 seconde pour 30.000.000 ans !

Du TAI à UTC

- ▮ Le TAI se décale par rapport au Temps Universel à cause des irrégularités de rotation de la Terre
- ▮ On définit le **Temps Universel Coordonné (UTC)** :

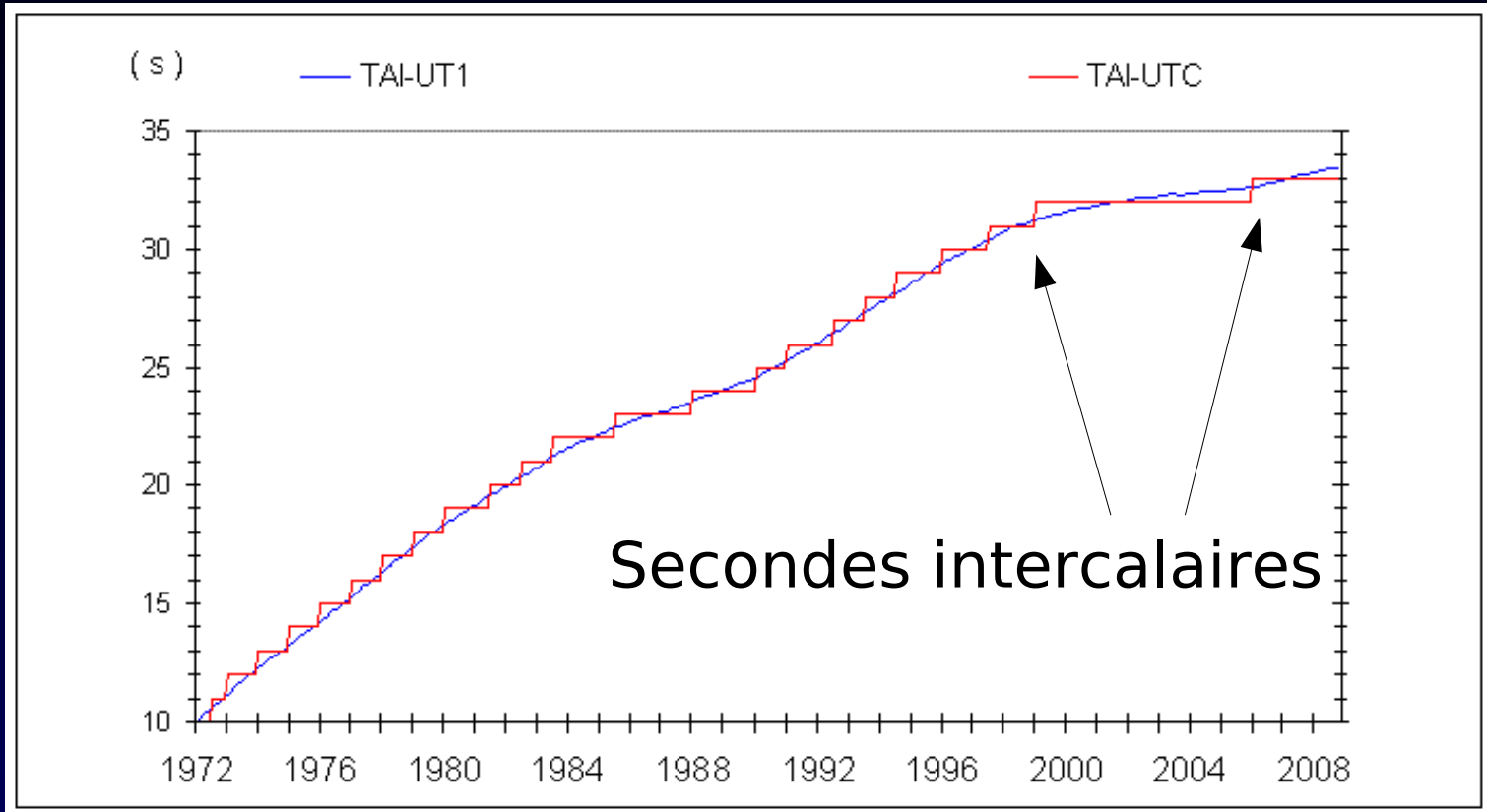
$$|UTC-UT| < 0,9 \text{ seconde}$$

$$|UTC-TAI| = n \text{ secondes}$$

(n entier)

- ▮ On augmente n en ajoutant une **seconde intercalaire**

Le Temps Universel Coordonné



Ecart entre le TAI, UT1 et UTC

Les secondes intercalaires

ou comment compenser le ralentissement de la Terre

- En 1958 : $\text{TAI-UT1} = 0$
- En 1972 :
 - $\text{TAI-UT1} \approx 10$ secondes
 - création d'UTC : $\text{TAI-UTC} = 10$ s
- Depuis 1972 : 26 sec. Intercalaires
(26 s en 41 ans $\Rightarrow +0,0017$ s/jour)
- Dernière seconde intercalaire :
 - 23h59m60s le 30 juin 2015
- Aujourd'hui : $\text{TAI-UTC} = 36$ s

Des secondes intercalaires aux heures intercalaires ?

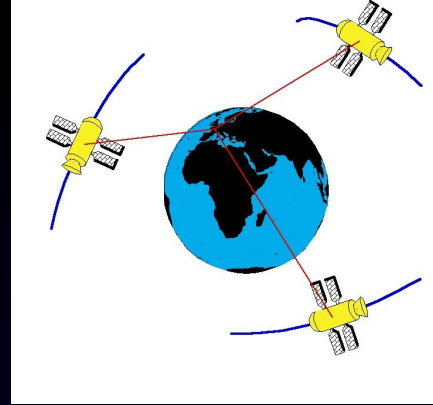
- ▣ Depuis 1999 : proposition d'abandonner les secondes intercalaires au profit des heures intercalaires (prochaine : ~2600 !)
- ▣ Vaut-il mieux :
 - Une échelle de temps déconnectée de la rotation de la Terre (et GMT ?)
 - Une échelle de temps présentant des discontinuités (risques de « bugs »)
- ▣ Décision reportée à 2015 puis à 2023...

Pourquoi maîtriser le temps ?

Télécommunications

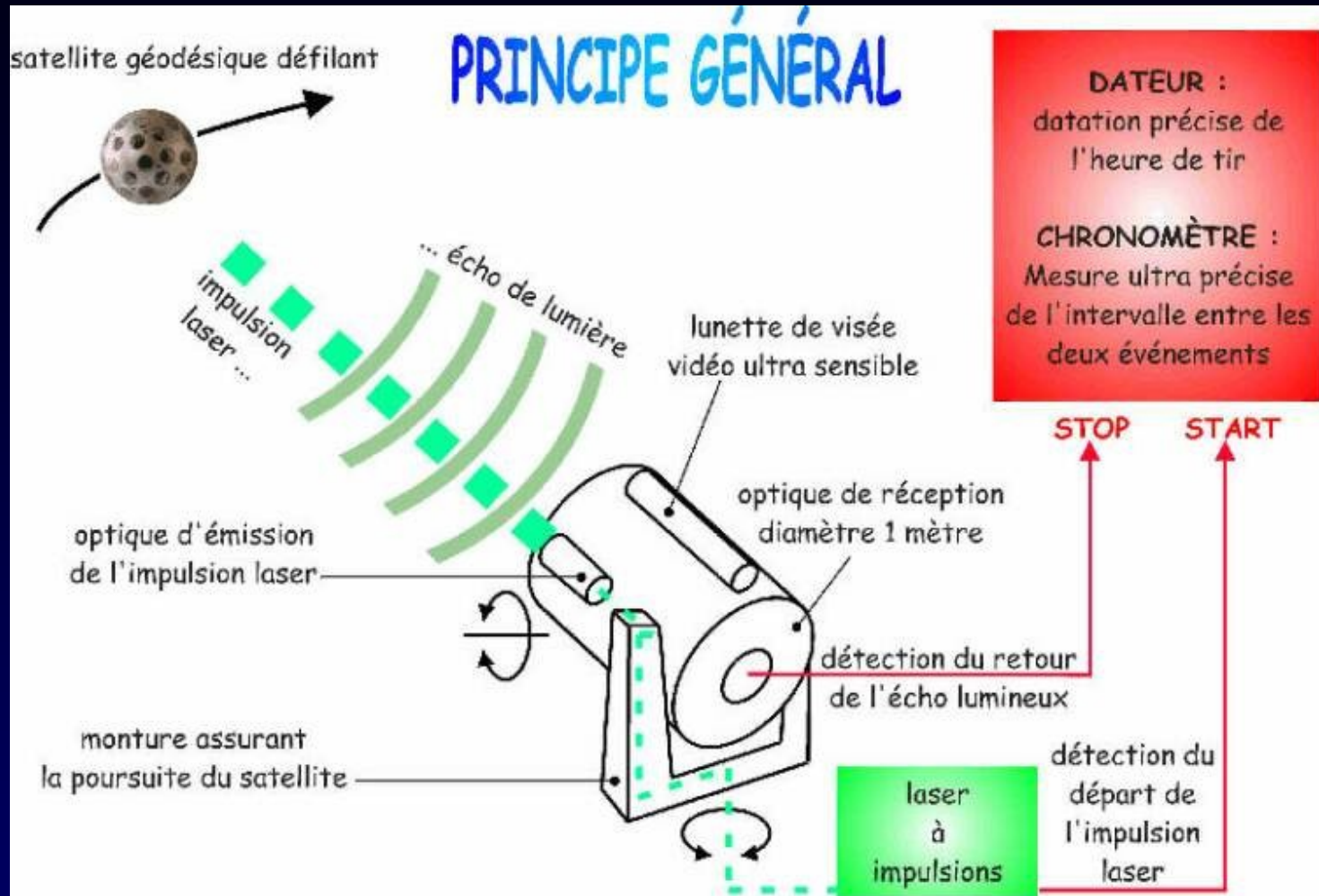
- La téléphonie mobile 2G nécessite des synchronisations de l'ordre de $1 \mu\text{s}$ ($1/1\,000\,000^{\text{ème}}$ de s) pour préserver les « slots » de temps
- La téléphonie 3G et 4G sont plus exigeantes (débits supérieurs)
- La généralisation de l'internet mobile de dernière génération nécessitera des synchronisations $\sim 100 \text{ ns}$

Positionnement par satellites



- ▣ Chaque satellite connaît très exactement sa position ($< 1\text{m}$) et l'heure ($< \text{qq ns}$)
- ▣ Les délais de réception des signaux provenant de 4 satellites permettent d'établir un système de 4 équations à 4 inconnues :
longitude, latitude, altitude et temps
- ▣ À $300\,000\text{ km/s}$, une incertitude de 3 ns entraîne une incertitude de $\sim 1\text{ m}$

Télémétrie et vélocimétrie spatiales (laser ou micro-onde)

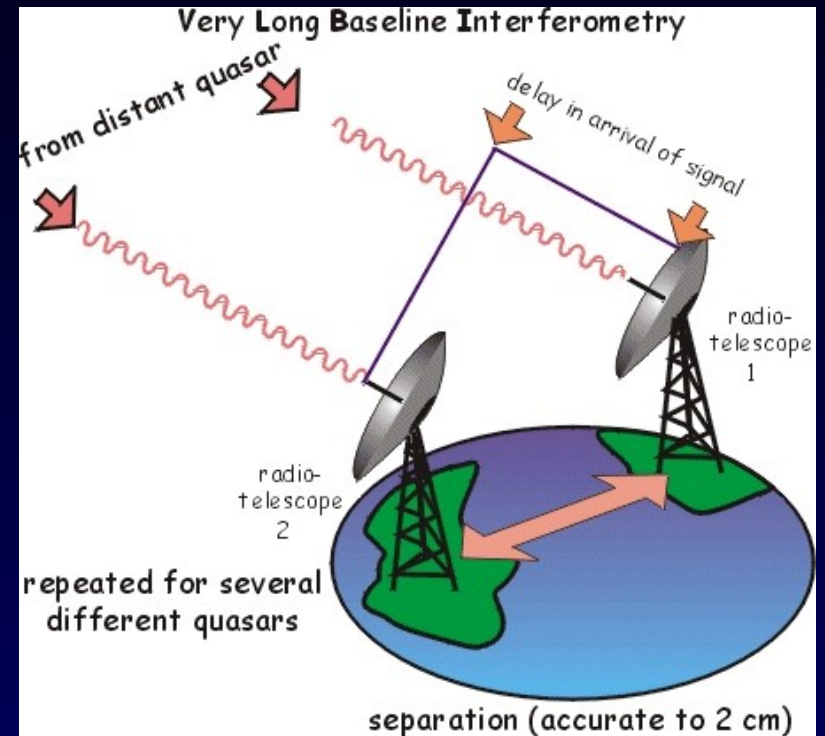


Définition des unités du SI

- ▮ 1^{ère} définition du mètre (1791) :
1/10 millionième du 1/4 du méridien terrestre
- ▮ 2^{ème} définition du mètre (1889) :
mètre-étalon en platine irridié du pavillon de Breteuil à Sèvres
- ▮ 3^{ème} définition du mètre (1960) :
1.650.763,73 longueurs d 'onde dans le vide de la radiation de la transition $2p_{10}$ - $5d_5$ de l 'atome de Krypton 86
- ▮ 4^{ème} définition du mètre (1983) :
trajet parcouru par la lumière pendant $1/299.792.458^{\text{ème}}$ de seconde

Very Long Base Interferometry

- ▣ Distances entre télescopes : qq milliers de km
- ▣ Résolution : qq μ arc secondes
- ▣ Radioastronomie haute résolution
- ▣ Détermination de directions de référence
- ▣ Mesure de la dérive des continents



Applications en physique fondamentales

- ▣ Étude des pulsars millisecondes
- ▣ Vérification de la théorie de la relativité
- ▣ Mesure de constantes de la physique
- ▣ ...

Le futur du temps...

Etat de l'art

- ▣ La fontaine atomique de l'observatoire de Paris fonctionne depuis 1994.
- ▣ PHARAO (horloge spatiale) fonctionne déjà en attendant l'ISS ...
- ▣ Plusieurs projets sont en cours (USA, Suisse, Japon, etc.)
- ▣ D'autres atomes et ions sont aussi étudiés
- ▣ D'autres gammes de fréquences sont explorées (optique notamment)...

Vers une nouvelle définition de la seconde et une nouvelle échelle de temps ?

- ▣ La fontaine atomique à Rubidium est plus stable que la fontaine atomique à Césium...
- ▣ D'autres atomes et ions piégés sont potentiellement plus stables que la fontaine à Césium
- ▣ Le passage à des fréquences optiques permet d'augmenter la stabilité (dans le rapport des fréquences ?)
- ▣ Une nouvelle définition de la seconde et une nouvelle échelle de temps devraient être définies dans les 10 ans à venir...

Des surprises à venir ?

- ▣ Et si la fuite du temps n'était pas continue mais quantifiée par des “**chronons**” ($\theta \sim 5 \cdot 10^{-44}$ s) ?
- ▣ Et si la flèche du temps s'inversait quand l'univers s'approcherait du “**Big Crunch**” (le contraire du Big Bang) ?

Bibliographie

- E. Klein. **Les Tactiques de Chronos**. Flammarion, Paris, 2004
- F. Vernotte. **Les échelles de temps modernes**. Annales françaises de chronométrie, vol. 48, Besançon, 1999.
http://perso.utinam.cnrs.fr/~vernotte/echelles_de_temps.html
- C. Audoin and B. Guinot. **Les fondements de la mesure du temps**. Masson, Paris, 1998.
- J. Vanier and C. Audoin. **The quantum physics of atomic frequency standards**, volume 1-2. IOP Publishing Ltd, Bristol Philadelphie, 1989.
- M. Granveaud. **Échelles de temps atomique**. Collection des monographies BNM, Paris, 1986.
- A. Danjon. **Astronomie générale**. J. et R. Sennac Éditeurs, Paris, 2ème édition, 1959.