

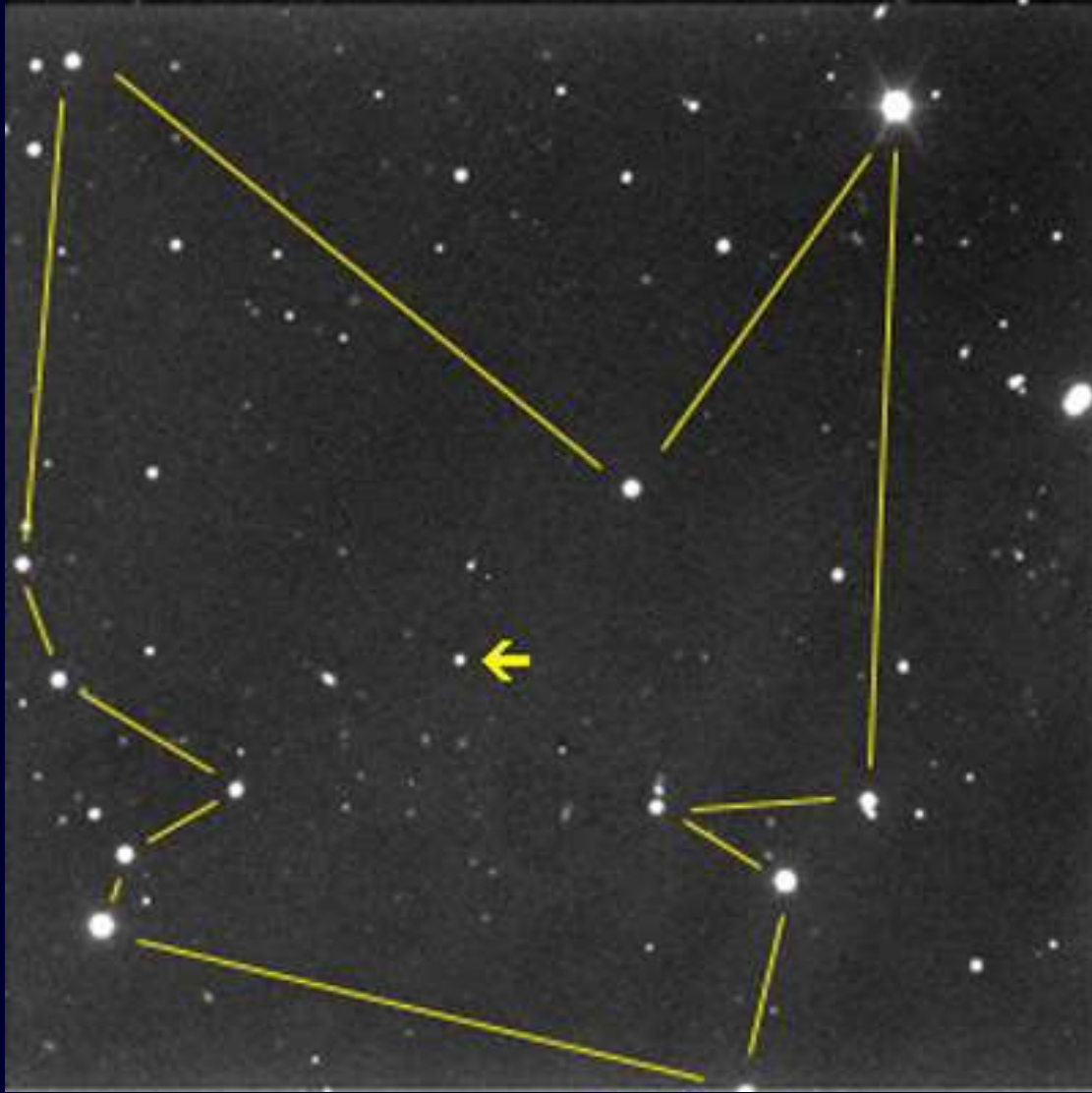


# Mesurer le temps? Le temps physique

Cours de J.E. Arlot  
SAPCB - juin 2023

# Rappel:

- Nous avons déterminé un système de référence pour repérer nos mesures de position
- Nos observations doivent être datées: quel référence de temps choisir?
- Le temps de la mécanique céleste est un paramètre uniforme, celui des observations est élastique: il faut pouvoir passer de l'un à l'autre.
- Nous allons construire des échelles de temps.



Une position mesurée dans quel repère temporel?

# Mesurer le temps

- Mesurer des durées avec le temps de la physique
- Construire une chronologie pour le temps social
- Etablir un temps universel accessible à tous
- Construire une échelle de temps uniforme

# Qu'est-ce que le temps?

- Le temps existe-t-il en lui-même ou bien n'est-ce qu'une modification de l'espace?
- Le temps est-il réversible?
- Peut-on voyager dans le temps?
- Le temps est-il lié à l'espace? ou à notre perception de l'espace par nos sens?
- Qu'est-ce que le temps physiologique?
- Le temps est-il absolu, indépendant et existait-il avant l'univers?
- Le temps est-il discret ou continu?

# Qu'est-ce que le temps?

La compréhension du temps est l'un des plus grands défis philosophiques et physiques de l'humanité

Si l'univers était immuable, le temps existerait-il? Et si non, pourrait-on dire: depuis quand le temps n'existe-t-il plus?

Le passé continue-t-il à exister et l'avenir pré-existe-t-il au présent? Le présent est-il un lien entre les deux?

# L'écoulement du temps

Comment définir le temps par rapport au passé, au présent et à l'avenir?

Qu'est-ce que l'écoulement du temps? Par rapport à quoi?



# La flèche du temps

Qu'est-ce que la flèche du temps: pourquoi ne pouvons-nous pas aller vers le passé?

Les lois physiques supposent toujours que les phénomènes naturels sont réversibles? Alors pourquoi le temps ne l'est-il pas?

*Les systèmes simples pris isolément le sont mais pas les systèmes complexes: exemple le moteur à explosion, la machine à vapeur ou tout organisme vivant. Pourquoi?*



# Les différents aspects du temps

- Le temps **physique**: durée et temps uniforme
- Le temps universel: une échelle de temps commune pour tous
- Le temps **social**: une chronologie avec les calendriers
- Le temps physiologique: comment ressentons-nous le temps?
- Le temps relativiste: le temps est-il absolu?
- Le temps du philosophe: le temps existe-t-il?

# Comment concrétiser le temps?

- Existe-t-il un temps absolu qui s'écoule indépendamment de l'univers?
- Comment passer du temps ressenti (subjectif) au temps mesuré (physique) ?
- Nous allons chercher à construire une échelle de temps concrète puis nous verrons si la physique peut nous aider à comprendre ce qu'est le temps.
- Pour cela il faut bien séparer deux notions:
  - la durée (le temps physique mesurable)
  - la chronologie (le temps social prévisible)

# Un peu d'histoire

- « *temps* » vient du latin « *tempus* », et du grec *τεμνείν* « *temnein* », qui fait référence à un découpage du temps en éléments finis comme le mot « *atome* » qui vient du grec *ἄτομος* « *atomos* », découpage de la matière en éléments finis insécables.
- Temps « discret » ou « continu », la question est posée.



Chronos, dieu du temps compris comme durée.

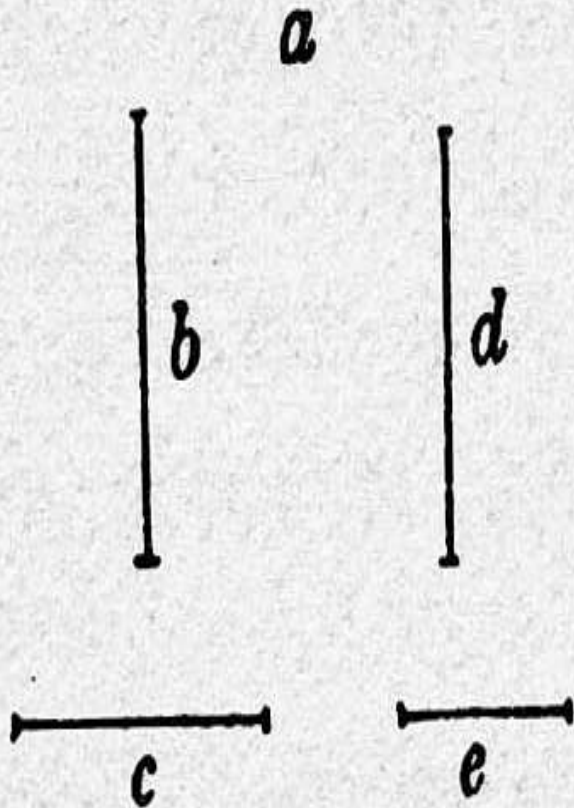
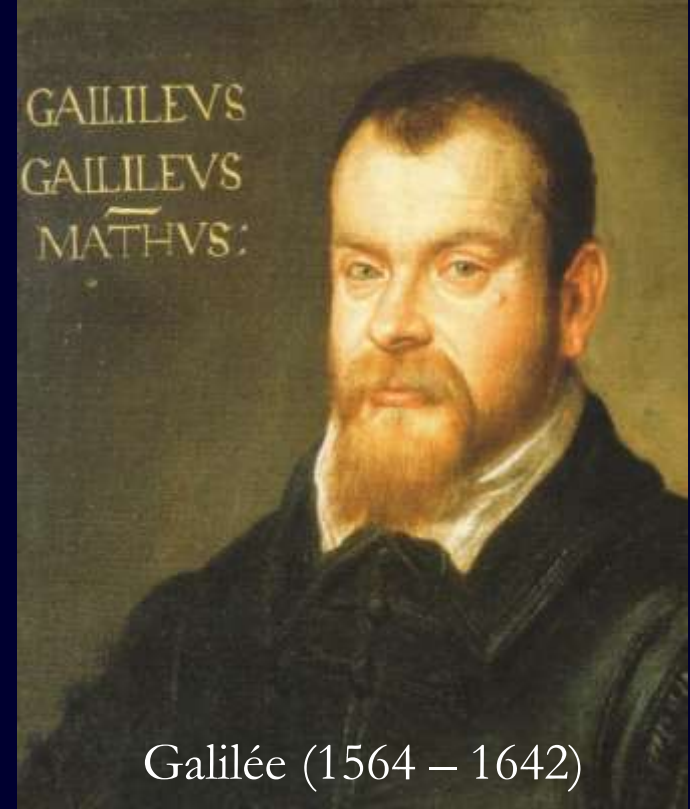
# Un peu d'histoire



Platon (~ -427, -347)

- Pour Platon, l'univers a été créé par un démiurge. Celui-ci voulait introduire dans son œuvre la nature de l'éternité elle-même mais il s'est rendu compte de l'impossibilité de cette entreprise. Il a alors décidé de créer une image mobile de l'éternité: le temps qui est créé en même temps que l'univers.

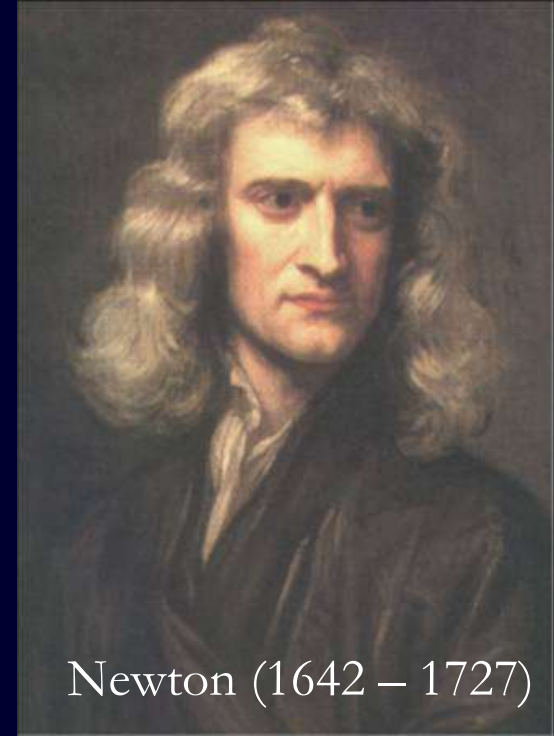
# Un peu d'histoire



- Pour Galilée, Dieu est géomètre: il va géométriser le temps.
- Il fait une représentation du temps par deux segments horizontaux le  $c$  et le  $e$  perpendiculaires aux distances  $b$  et  $d$  parcourues par le corps  $a$ .

# Un peu d'histoire

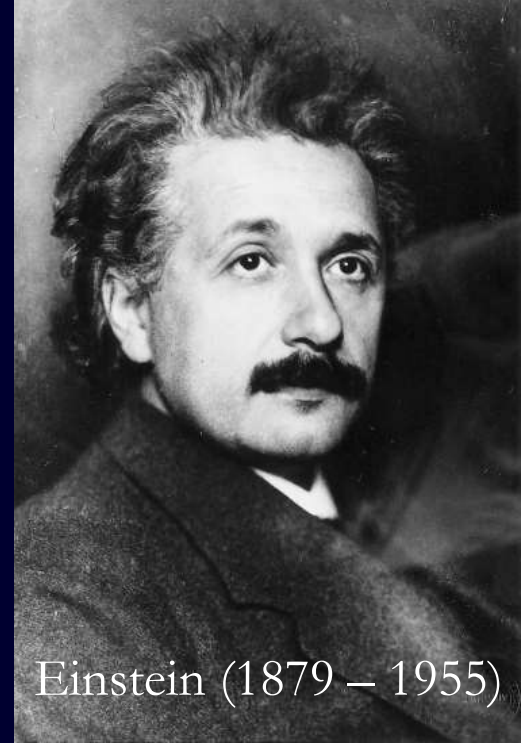
- Pour Newton, le temps est absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur. Il coule uniformément, et s'appelle durée (→ temps physique).
- Le temps relatif, apparent et vulgaire, est cette mesure sensible et externe d'une partie de durée quelconque (égale ou inégale) prise du mouvement : telles sont les mesures d'heures, de jours, de mois, et c'est ce dont on se sert ordinairement à la place du temps vrai » (→ temps social)



Newton (1642 – 1727)

# Un peu d'histoire

- Pour Einstein, le temps n'est pas une constante universelle. Par conséquent, passé, présent et futur ne sont plus absolus. Le temps est purement local lié à l'espace avec lequel il se mélange et est intimement lié.



Einstein (1879 – 1955)

# Concrétiser le temps

- Pour concrétiser la notion de temps, il faut l'identifier à un phénomène naturel régulier, uniforme et présentant une périodicité simple.

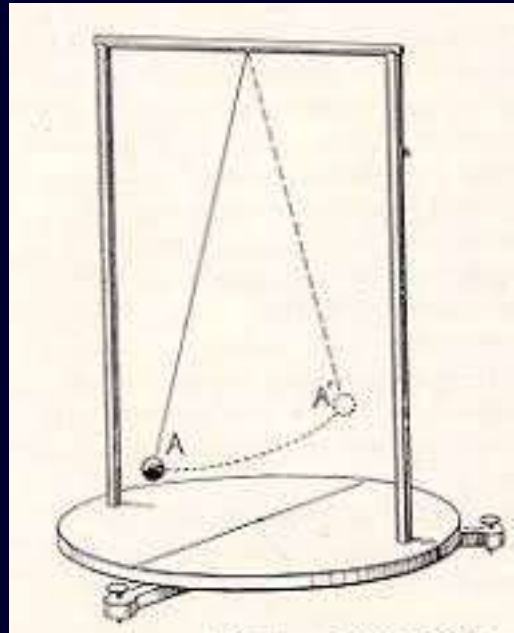
- Exemple 1:  
l'alternance jour/nuit définit un cycle et une unité de temps, le jour





# Mesurer le temps

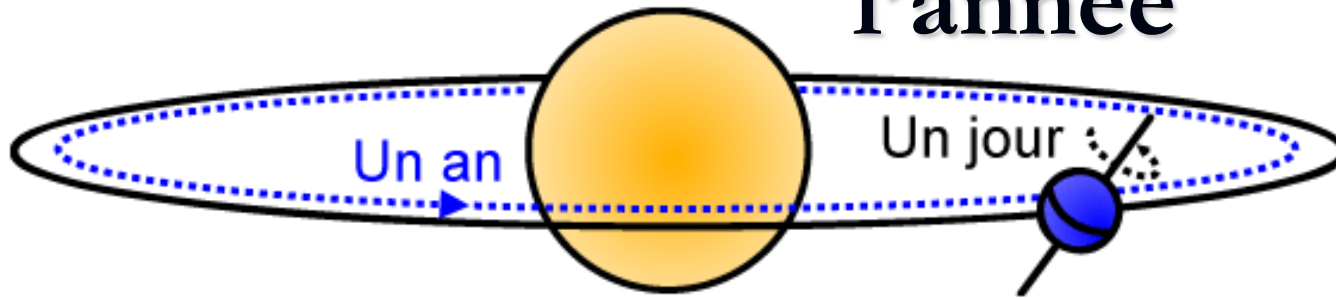
- Exemple 2:
- Le battement du pendule (la première définition de la seconde fut la demi-période d'un pendule d'un mètre de long) définit une unité de temps



# Une échelle de temps

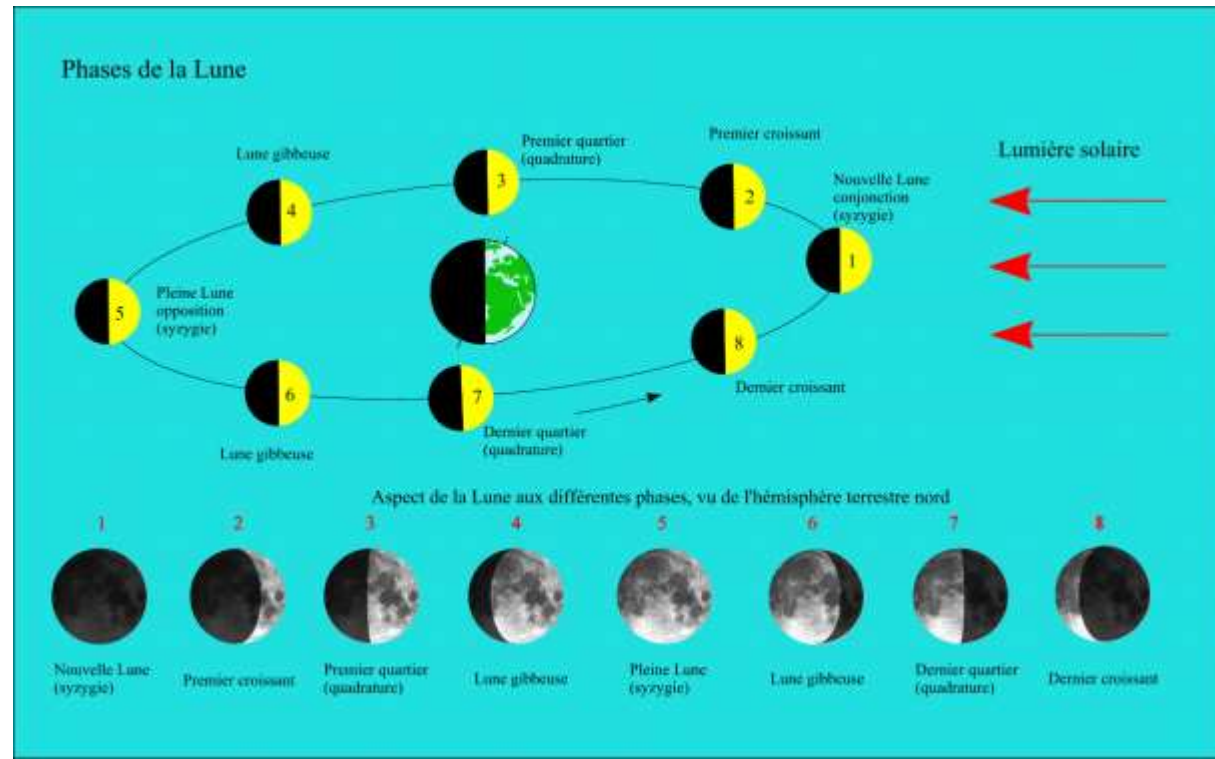
- C'est :
  - soit la mise bout à bout de petites unités (seconde)
  - soit le découpage en morceaux d'une unité longue (jour, année)
- Chaque unité doit être définie avec précision

# Mesurer le temps=choisir des unités: la seconde, l'heure, le jour, le mois, l'année



Trouver des  
phénomènes naturels  
périodiques

Un mois →



Le jour est l'unité la plus naturelle et facilement observable.

Il repose sur

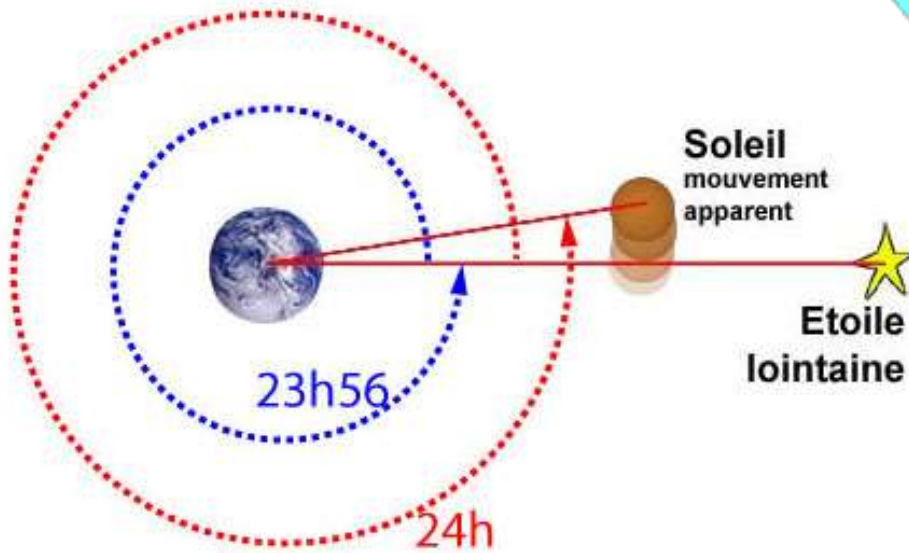
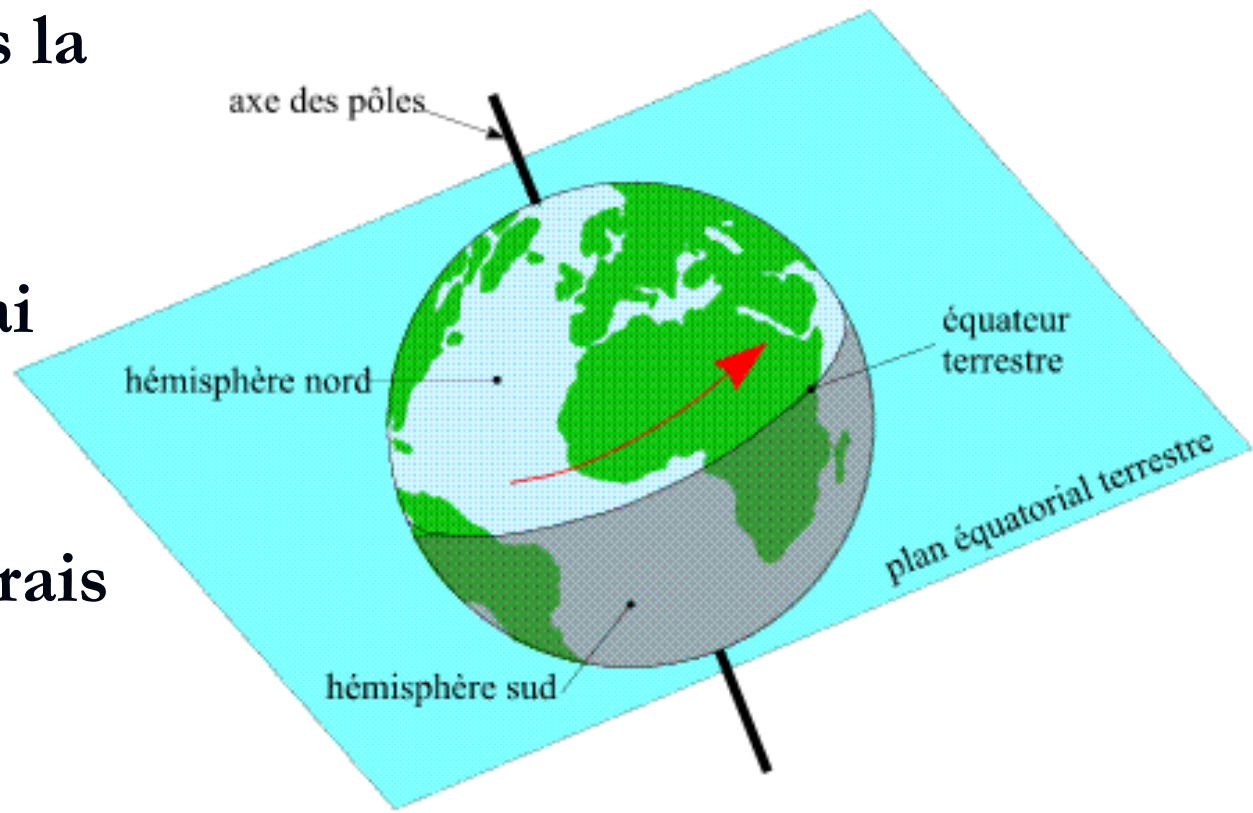
- la rotation de la Terre autour de son axe
- l'alternance jour/nuit

Vues depuis la Terre, les étoiles tournent en 23 heures 56 minutes autour d'un axe dirigé vers un point fixe du ciel, le pôle céleste proche de l'étoile "polaire".

Quant au Soleil, il faut 4 minutes de plus pour le voir accomplir la rotation diurne parce qu'il se déplace sur la sphère céleste. Son retour nécessite donc 24 heures.

Les jours ont-ils tous la même durée?

Non, il y a le jour vrai qui varie et le jour moyen qui est la moyenne des jours vrais



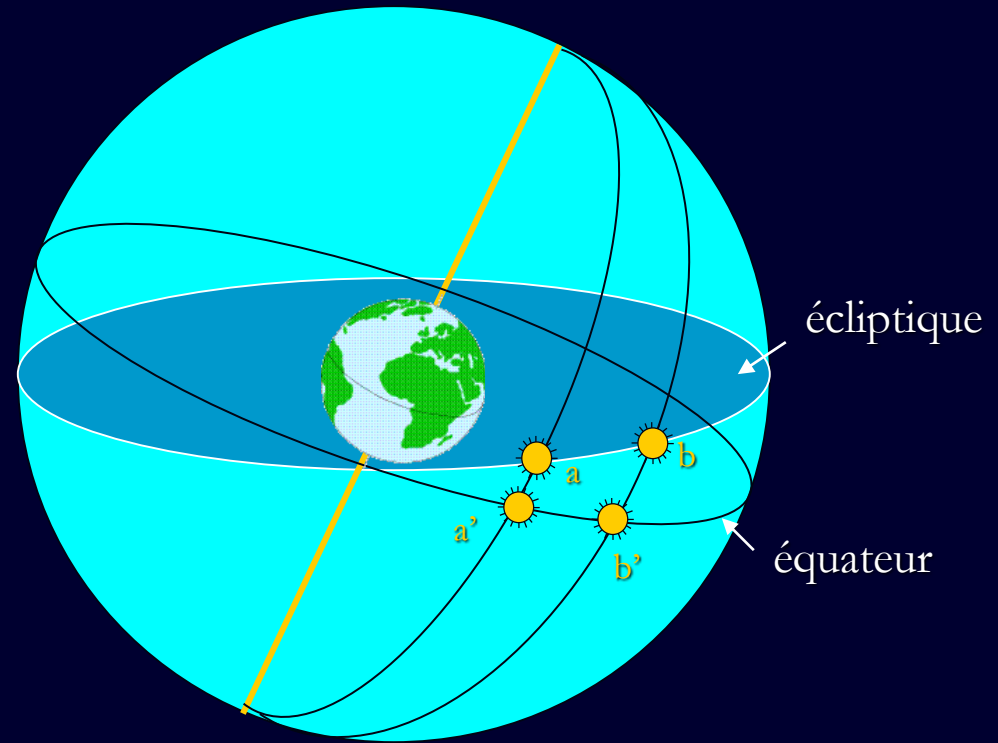
Jour vrai → Temps vrai  
Jour moyen → Temps moyen

# Le Soleil « vrai »

Le soleil n'avance pas uniformément:

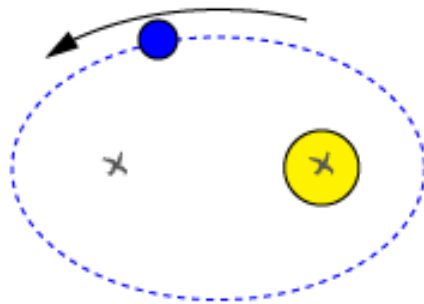
- il n'est pas dans l'équateur et
- il décrit une ellipse et suit la « loi des aires »

Les jours solaires sont inégaux!

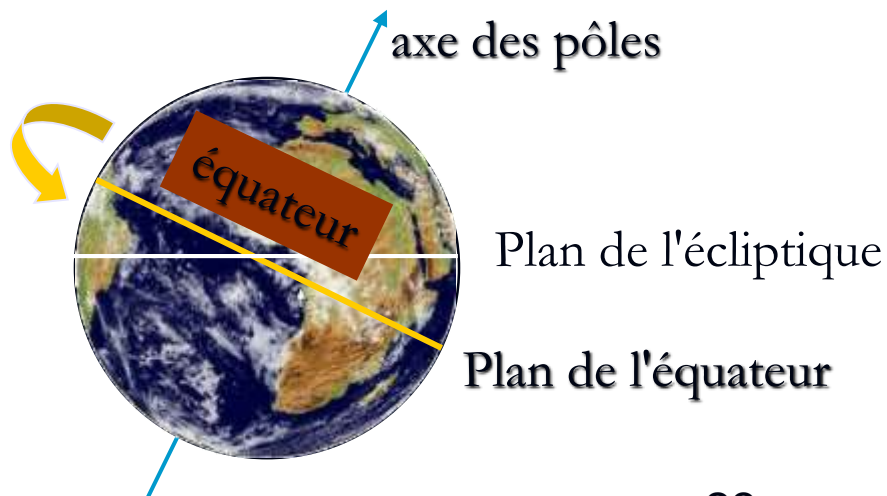


Le mouvement du Soleil apparent est dû à la combinaison de ces deux mouvements.

# Soleil « vrai » et Soleil « moyen »

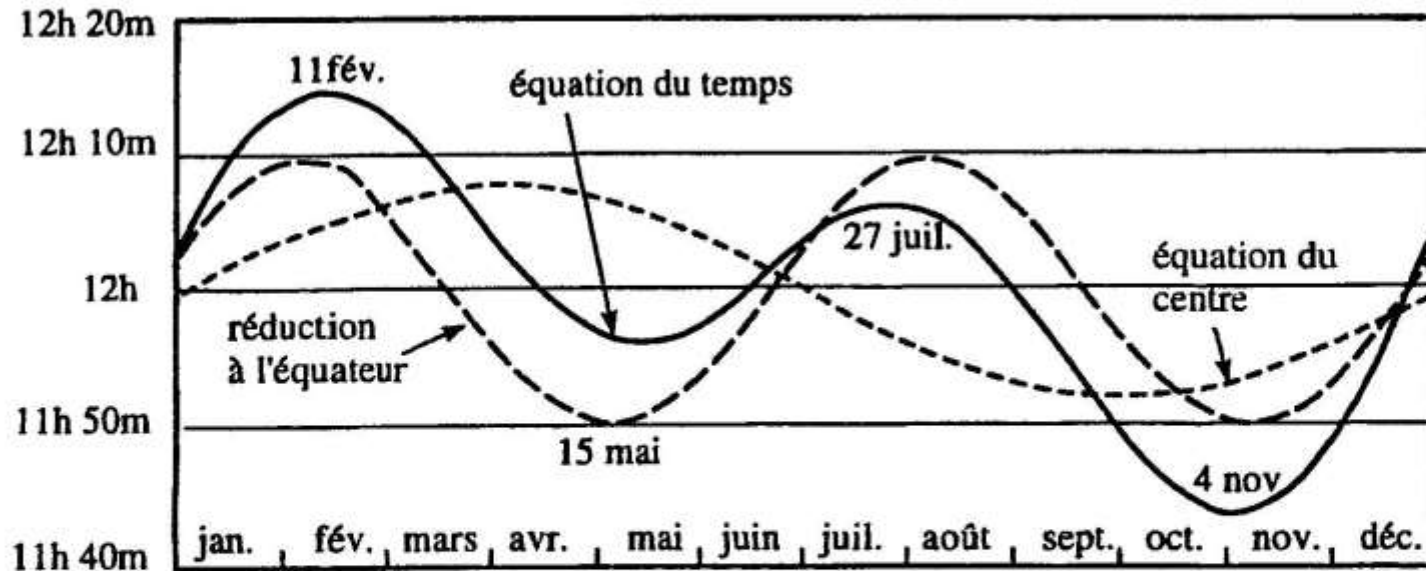


La Terre a une orbite elliptique et sa vitesse varie au cours du temps: le mouvement apparent du Soleil n'est pas uniforme et les jours vrais sont inégaux.



L'équateur de la Terre est incliné de  $23^\circ$  sur son plan orbital. Le Soleil « monte » et « descend » dans le ciel.

# Écart entre le mouvement du Soleil et un mouvement uniforme

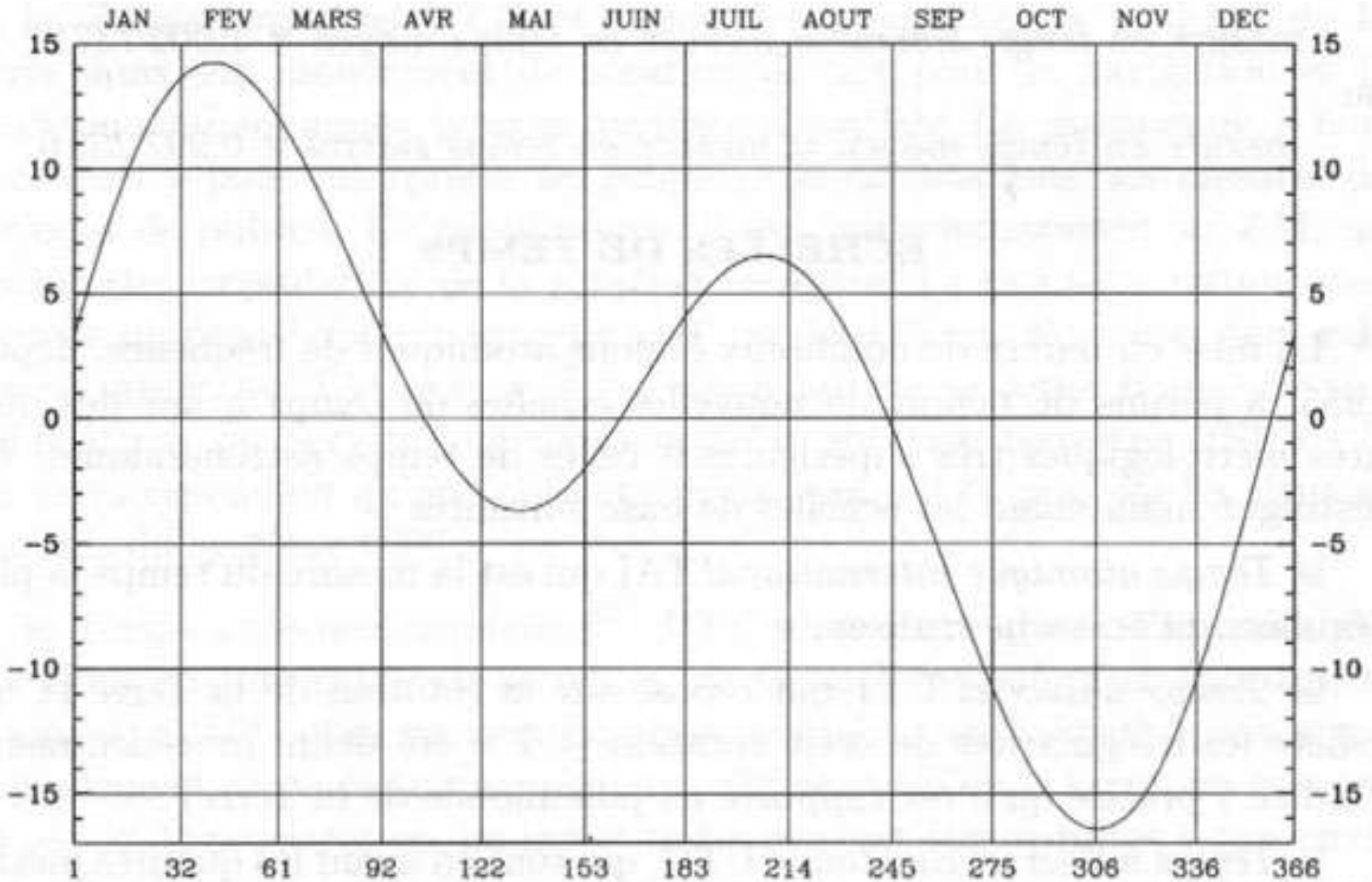


Équation du Temps = équation du centre + réduction à l'équateur

Temps solaire vrai = temps solaire moyen + équation du temps



# « Equation du temps » : du temps vrai au temps moyen



# Une unité de temps

- L'équation du temps permet de passer du temps vrai, observable, au temps moyen réputé uniforme et plus facilement utilisable (le jour moyen est la moyenne des jours vrais sur un an).
- L'unité de temps sera la « seconde » soit  $1/86400$  du jour moyen.

# La mesure des durées

- Pour les longues durées: compter les jours ou les années
- Pour les courtes durées: définir une unité plus petite que les jours: les heures, les minutes et les secondes

# Le jour et l'heure

- Quand faire débiter le « jour »:
  - Au crépuscule en Mésopotamie
  - À l'aube en Inde
  - À minuit en Chine
  - À midi pour les astronomes

# Comment définir les heures?

La variation de la durée jour/nuit a amené les égyptiens à créer des heures inégales ou temporaires. « horae inequales, horae temporales, naturales, ou artificiales »

- De jour, l'intervalle de temps entre le lever et le coucher du Soleil est divisé par douze. La longueur de l'heure diurne varie avec la latitude du lieu et avec la saison.
- De nuit, l'intervalle de temps entre le coucher et le lever du Soleil est divisé par douze. La longueur de l'heure nocturne varie avec la latitude du lieu et avec la saison.

La prise en compte de la durée « jour+nuit » - le nycthémère - divisée en 24 heures égales a amené des heures égales ou équinoxiales.

Les heures inégales sont identiques aux heures égales uniquement les jours des équinoxes.

Le passage des heures inégales aux heures égales débute au XIII<sup>e</sup> siècle avec l'apparition des horloges mécaniques. Avant seuls les astronomes utilisent les heures égales. Le dernier pays à utiliser les heures inégales est le Japon (jusqu'en 1873).

# La lecture des heures

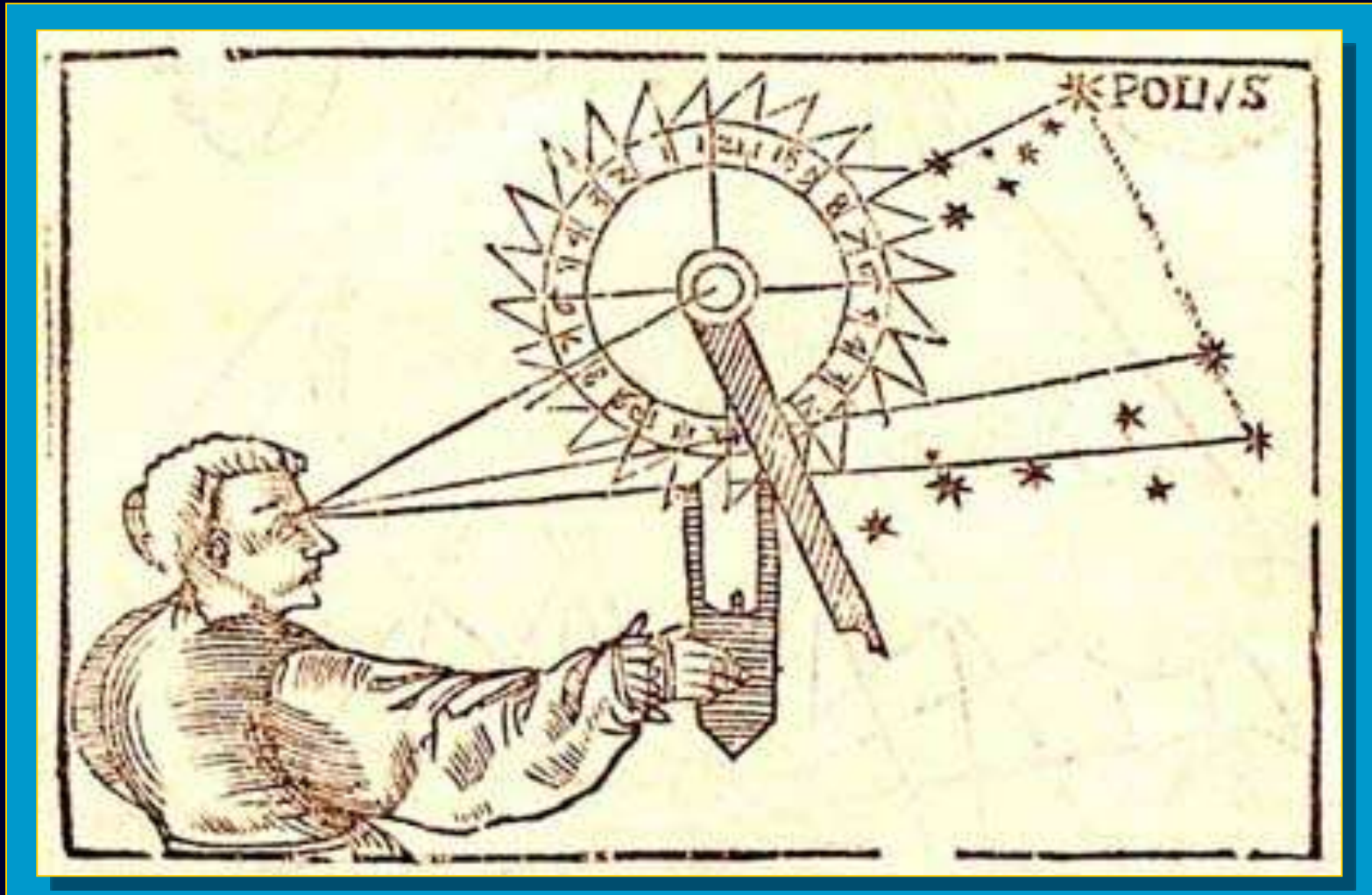
- **Le jour**

- L'heure solaire est donnée par un cadran solaire.
- Les heures peuvent être comptées à partir du lever du Soleil, elles portent alors le nom d'heures babyloniennes, si elles sont comptées à partir du coucher du Soleil, elles portent le nom d'heures italiennes.
- Les astronomes comptent les heures à partir du passage du Soleil au méridien (midi au Soleil).

- **La nuit**

L'heure est donnée par un nocturlabe (en réalité le nocturlabe donne l'heure sidérale).

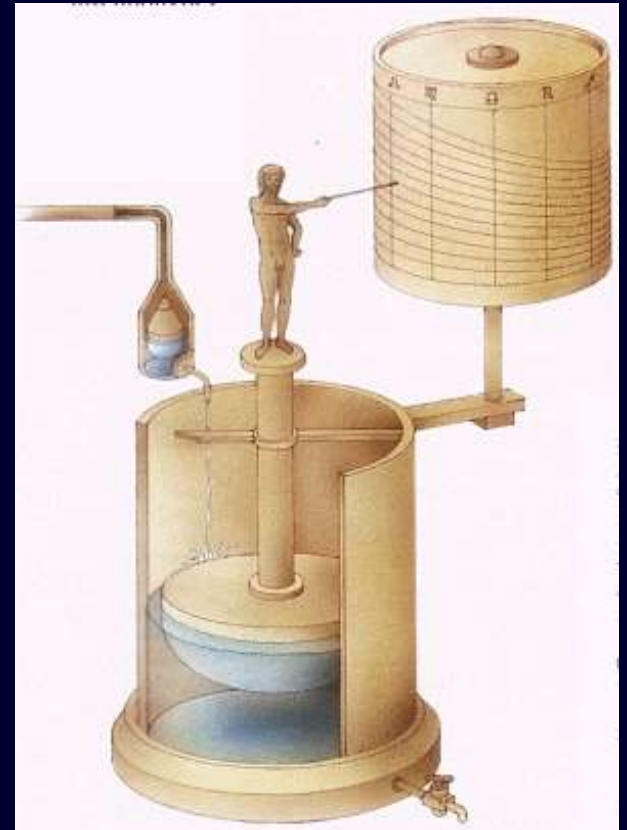
# Lecture des heures



Ce dessin d'Apianus (1539) montre l'utilisation d'un nocturlabe primitif. Il suit les étoiles et le jour ne fait donc que 23h 56 min.

# Compter les heures, les minutes, les secondes

- Cadran solaire
- Clepsydre, le sablier
- Horloge mécanique





# Compter les heures, les minutes, les secondes

- Les unités physiologiques
  - pouls
  - récitation, chanson, prière



# Le temps physiologique

- C'est notre capacité à :
  - Mesurer des durées
  - Dater des évènements
- Comme les scientifiques, le cerveau utilise des phénomènes naturels pour mesurer le temps

# Le temps physiologique

- Nous disposons de deux (au moins) horloges internes:
  - Le rythme circadien qui se cale sur l'alternance jour/nuit
  - La boucle neuronale qui passe par le cortex préfrontal

# Le temps physiologique

- Le rythme circadien:
  - L'hypothalamus fait sécréter par l'hypophyse de la mélatonine qui provoque le sommeil. Pour savoir s'il fait nuit, l'hypothalamus pirate le nerf optique!
  - En l'absence de nuit, le cycle continue sur sa lancée.

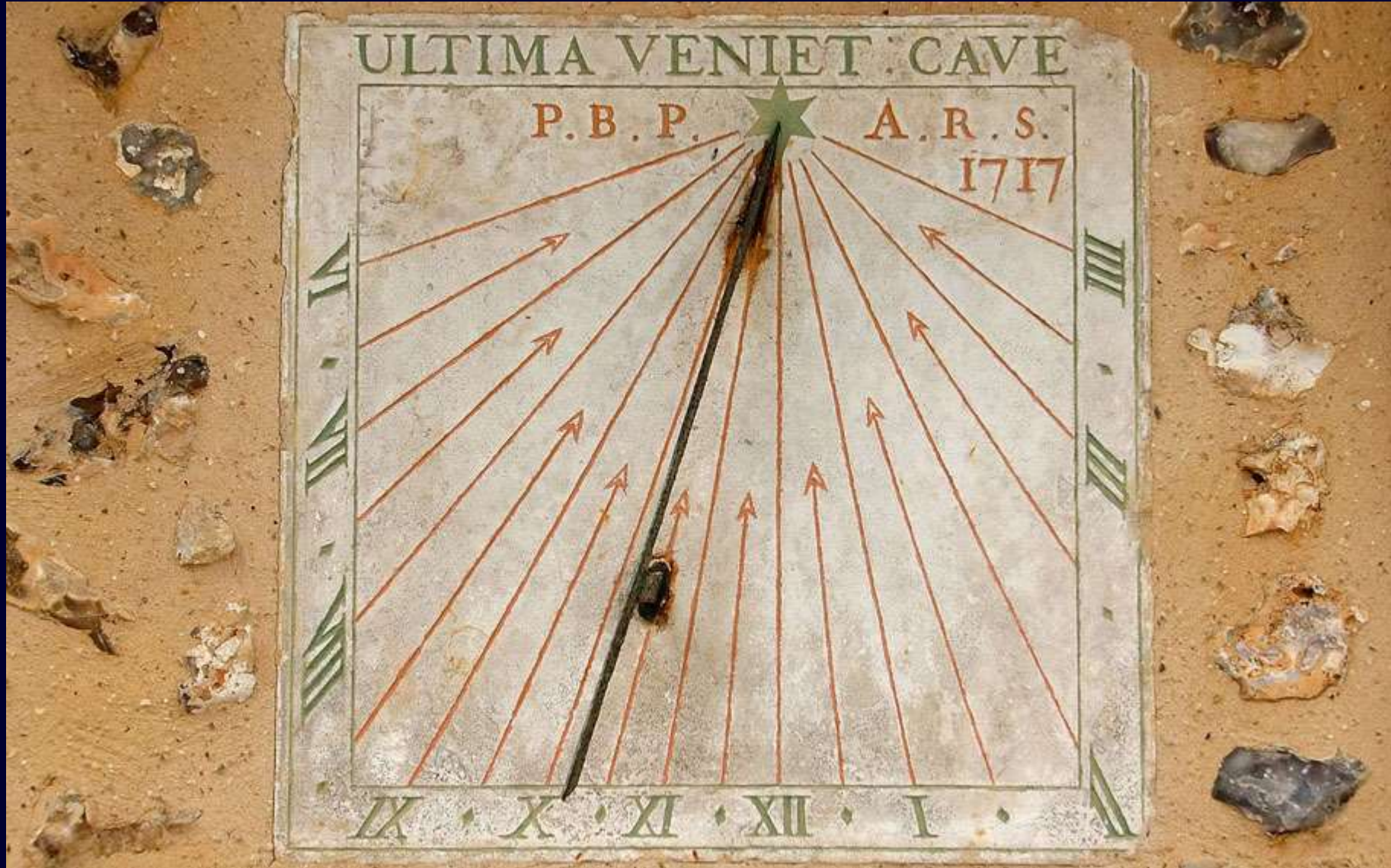
# Le temps physiologique

- La boucle neuronale
  - Elle intègre une unité de temps correspondant au temps mis par l'influx nerveux pour parcourir cette boucle soit 0.1 seconde environ
  - Elle permet d'agir rapidement en coordonnant des actions au dixième de seconde près
  - Elle accélère pour nous permettre de faire plus d'actions rapides dans un minimum de temps: le temps extérieur semble ralentir.

# Le temps physiologique

- La vitesse de l'influx nerveux dans la boucle neuronale peut varier:
  - L'adrénaline l'accélère pour nous permettre de réagir très vite mais alors, le temps paraît long!
  - La satisfaction et la tranquillité le ralentissent et alors le temps nous paraît trop court!
- Le temps physiologique est propre à chacun, qu'en est-il du temps physique?

# Un temps universel pour tous?



Le cadran solaire donne une heure locale

# Comment définir un temps « universel »

- Un temps accessible à tous en tout lieu
- Une interpolation entre deux phénomènes naturels?
- Une intégration d'une unité de temps disponible?
- Le cadran solaire traduit un phénomène naturel
- Une horloge additionne des petites unités de temps mais quand on la remet « à l'heure » grâce à un phénomène naturel, on lui fait interpoler le temps entre deux phénomènes naturels

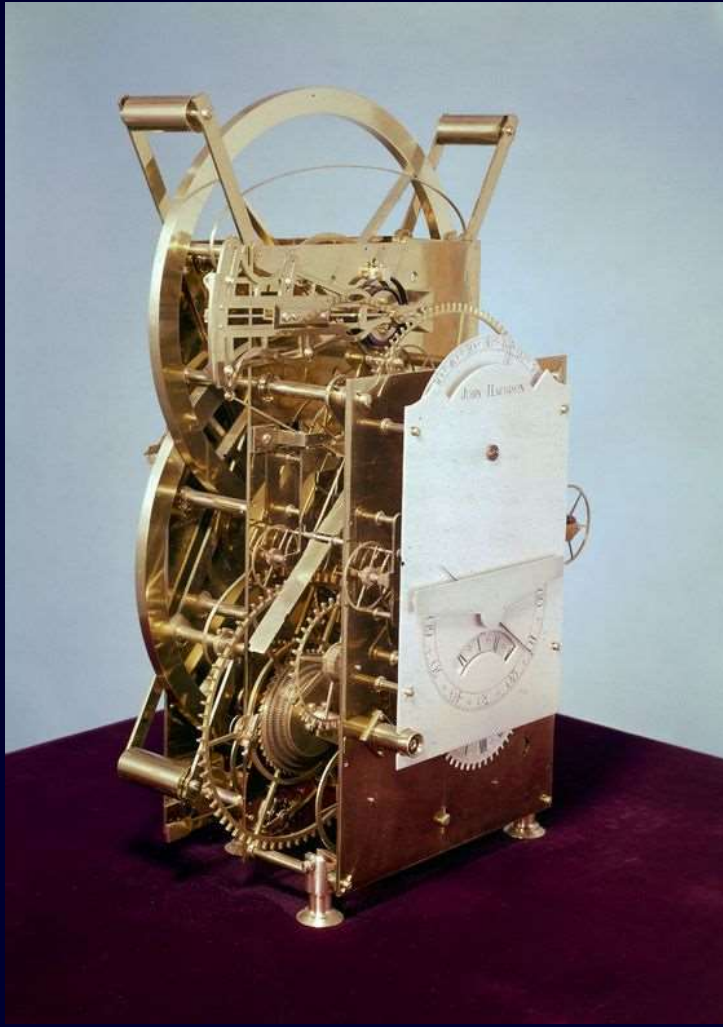


# Un temps universel ?



Il faut trouver des garde-temps fiables et des moyens de les « remettre à l'heure » loin du cadran solaire de référence.

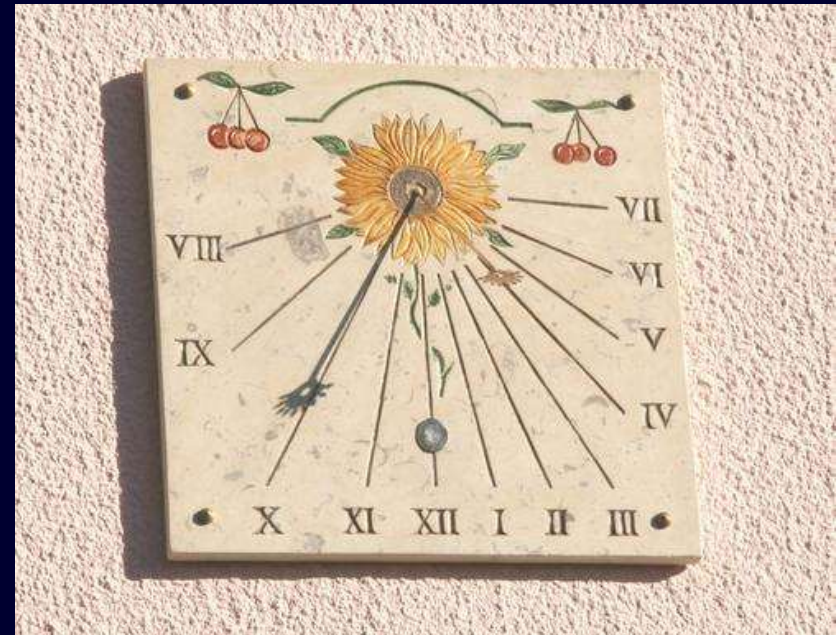
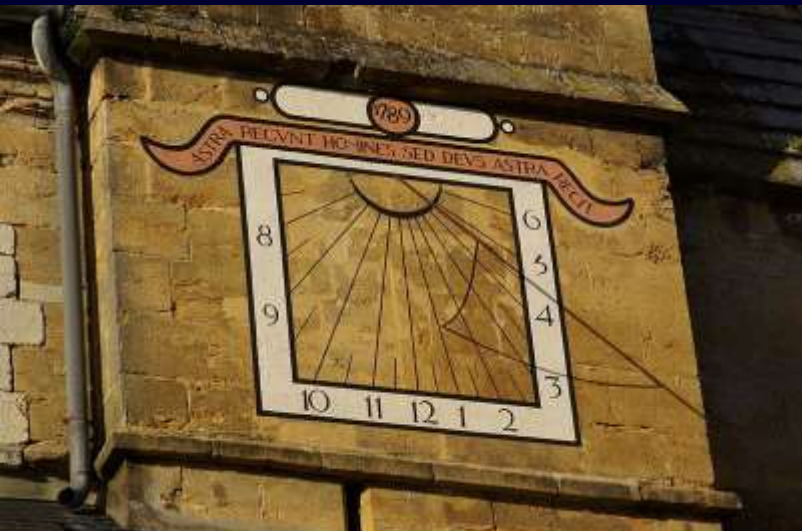
# Les horloges mécaniques



Elles permettent de s'affranchir des cadrans solaires et de transporter un temps « universel ».

# Un temps universel?

- La différence de temps entre deux cadrans solaires, c'est la différence en longitude.
- Pour avoir un temps universel, il suffit de connaître sa longitude par rapport à celle de l'horloge de référence.



# Pourquoi un temps « universel »?

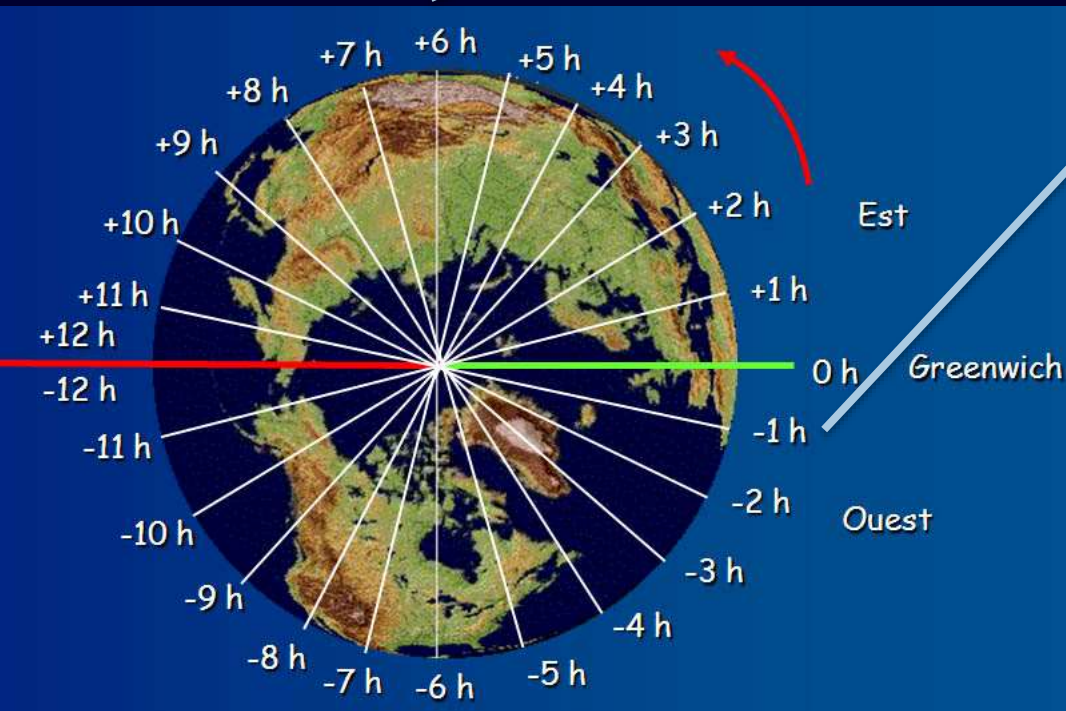
- Un temps « universel » de référence est indispensable pour établir des cartes géographiques, pour mesurer les longitudes des lieux.
- La différence de longitude entre deux lieux est égale à la différence entre les heures solaires locales des deux lieux.
- Il faut un temps universel dans lequel exprimer les heures solaires locales, le temps du méridien d'origine.
- Trouver un phénomène naturel, régulier, visible par tous, indépendant du lieu exprimé en temps du méridien d'origine.



**Le méridien  
de Paris:**  
une référence pour les  
longitudes et pour le  
temps.

Comment mesurer les  
longitudes des lieux  
éloignés ou comment  
conserver le temps  
moyen de Paris?

# L'éclipse de Lune visible par tous: savoir que l'on est à la même heure! Et comparer les heures solaires locales



phénomène trop rare et trop imprécis

# Les distances lunaires

- On utilise le fait que la Lune se déplace très rapidement dans le ciel par rapport aux étoiles, au Soleil et aux planètes.
- La distance entre la Lune et un astre se calcule grâce aux éphémérides pour une date en Temps Universel



# Les éclipses des satellites de Jupiter: observables de tout lieu



- Une révolution au XVIIème siècle: utiliser les trois premiers satellites de Jupiter éclipsés à chacune de leurs révolutions comme horloge.
- La première éclipse est observée par Galilée en 1612





# Le temps « universel »:

## le temps moyen du méridien « origine »

- Le méridien de Paris à partir de 1667, création de l'observatoire de Paris et définition du méridien de Paris



# Temps universel et temps local



- Le temps local de chaque ville reste le temps solaire vrai, donné par les cadrans solaires

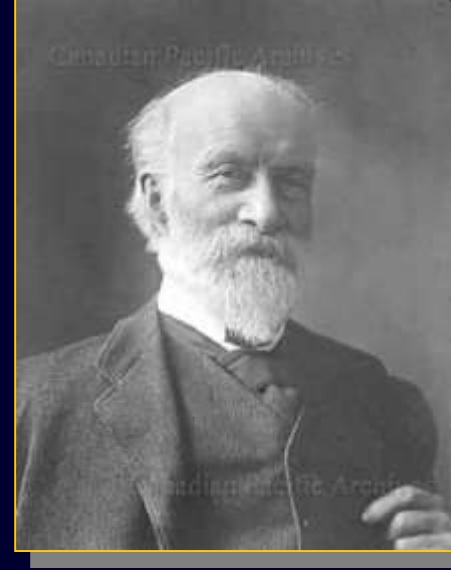
# Temps universel et temps local



- L'arrivée des chemins de fer rend le temps local problématique

# Au XIXème siècle: l'heure des chemins de fer

- Les projets de synchronisation de tous les temps locaux en un temps mondial (standard time) vient d'Amérique.

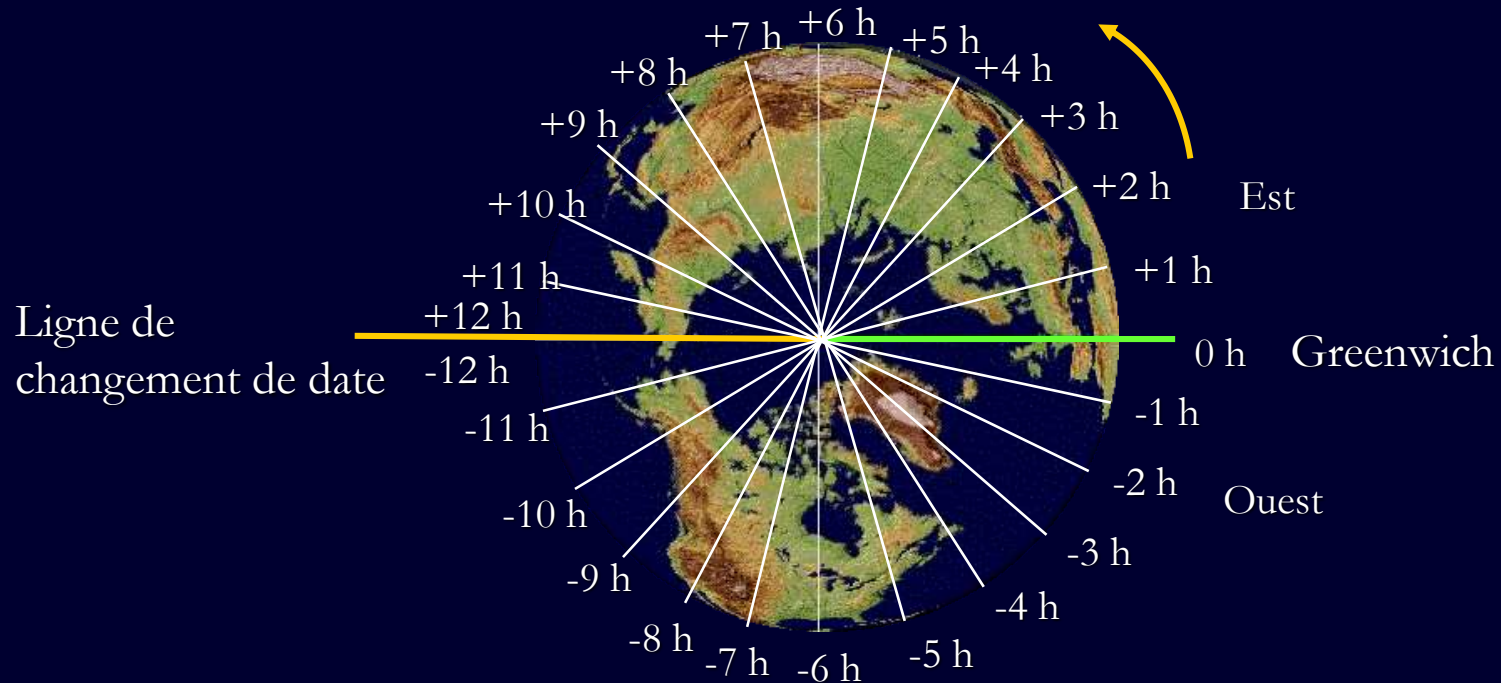


En 1873, il existait encore sur ce continent 71 temps du chemin de fer.

- *Sandford Fleming* (ingénieur en chef à la Canadian Pacific Railway) avait proposé le découpage de la Terre en 24 méridiens normatifs de 15° d'intervalle.

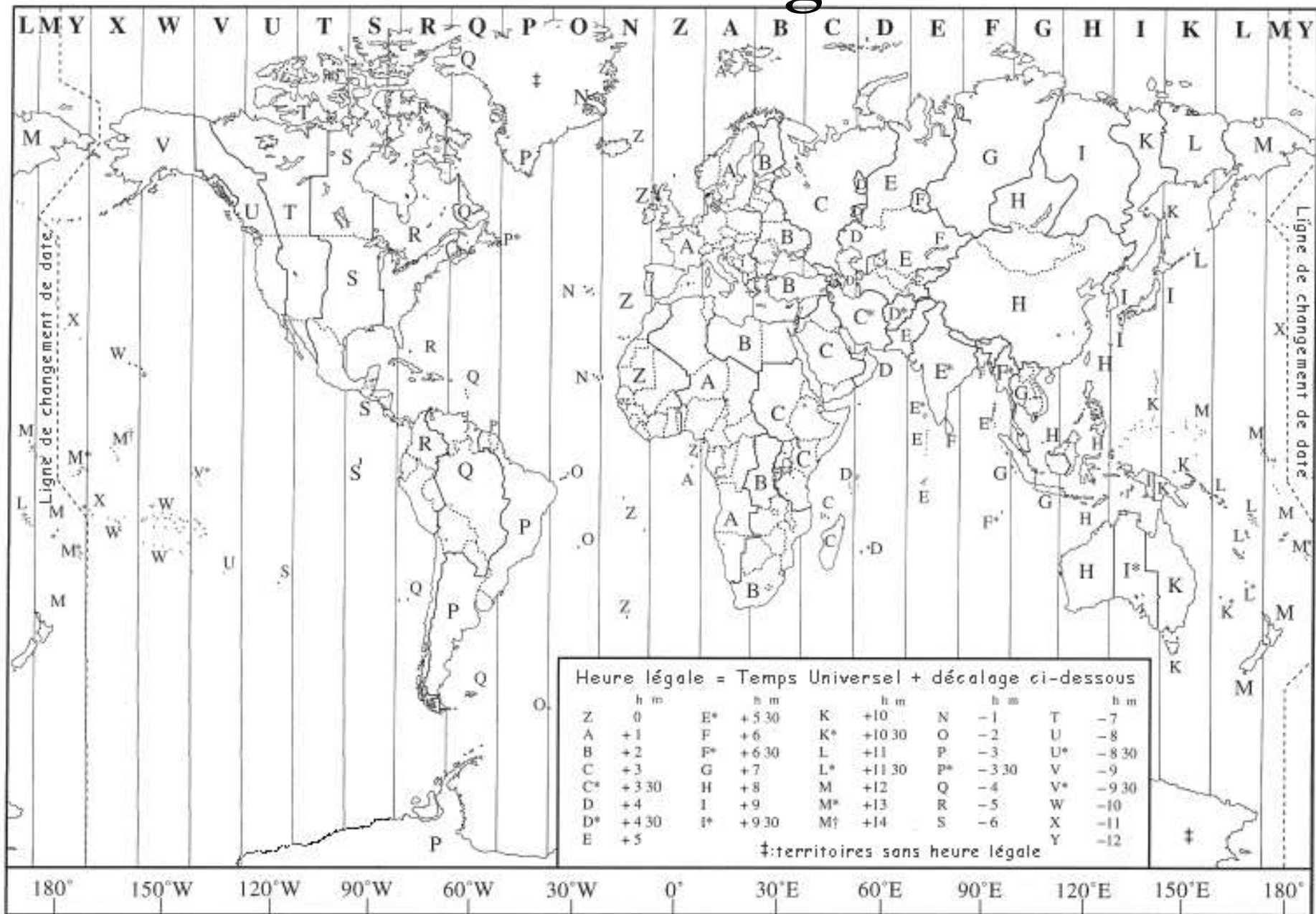


# Fuseaux horaires



- Lorsque l'on franchit la ligne de changement de date d'Ouest en Est on retranche un jour et lorsque l'on franchit la ligne de changement de date d'Est en Ouest on ajoute un jour.
- Sur la Terre, lorsqu'on se déplace vers l'ouest, on retranche des heures au temps légal (allonge la journée) lorsqu'on se déplace vers l'Est on ajoute des heures au temps légal (raccourcit la journée).

# Méridien origine



Découpage du monde en zones de temps liées aux méridiens

# Au XIXème siècle: l'heure des chemins de fer

Ce découpage en « fuseaux horaires » sera réalisé et officialisé par deux conférences internationales :

- Conférence géodésique internationale (Rome, octobre 1883)
- Conférence internationale tenue à Washington pour l'adoption d'un méridien origine et d'une heure universelle (octobre 1884).

# Au XIX<sup>ème</sup> siècle: définir un temps universel

Le méridien origine (méridien de Greenwich, axe du cercle méridien de Airy, installé en 1851) donne naissance au Greenwich Mean Time (GMT) .

Temps universel = temps moyen de Greenwich (GMT) + 12h

Les astronomes comptent à partir de midi et le monde social à partir de minuit.

Temps civil = temps moyen +12h



# Le temps légal français

- En France métropolitaine (et en Algérie) selon la loi du 9 mars 1911, en vigueur jusqu'en 1978, l'heure légale était "le temps moyen de Paris retardée de 9min 21s" (longitude du méridien de l'observatoire de Paris de 1667 par rapport au méridien de Greenwich).

Le décret du 9 août 1978 stipule que le temps légal est obtenu en ajoutant un nombre entier d'heures au Temps Universel.

# L'évolution du méridien origine

- En 1968, le méridien de Greenwich est remplacé par le Méridien international de référence, obtenu par le zéro statistique des longitudes attribuées à 68 stations de références, chacune de ces stations étant affectée d'un poids déterminé chaque année par le Bureau international de l'heure (BIH).
- En 1998, le Méridien international de référence se trouvait à 102,5 m à l'ouest du méridien de Greenwich.

# L'uniformité des unités de temps

Si le mois et l'année sont des unités variables qui ne servent que pour la vie sociale, le jour est incontournable et l'unité de temps sera une fraction de jour.

La seconde astronomique définie comme  $1/86400$  du jour solaire moyen est-elle vraiment constante et invariable?

# Une échelle de temps uniforme, quel que soit le calendrier. Quelle unité de temps constante choisir?

Si le mois et l'année sont des unités variables, en lien avec la société qui les utilise, le jour est incontournable et l'unité de temps sera une fraction de jour. Les horloges mécaniques permettent d'interpoler le jour.

Unité de temps: la seconde astronomique:  
la seconde est la  $1/86400$  du jour solaire moyen.

Mais le jour solaire moyen –et donc la seconde- sont-ils constants?

# Une échelle de temps uniforme, quel que soit le calendrier.

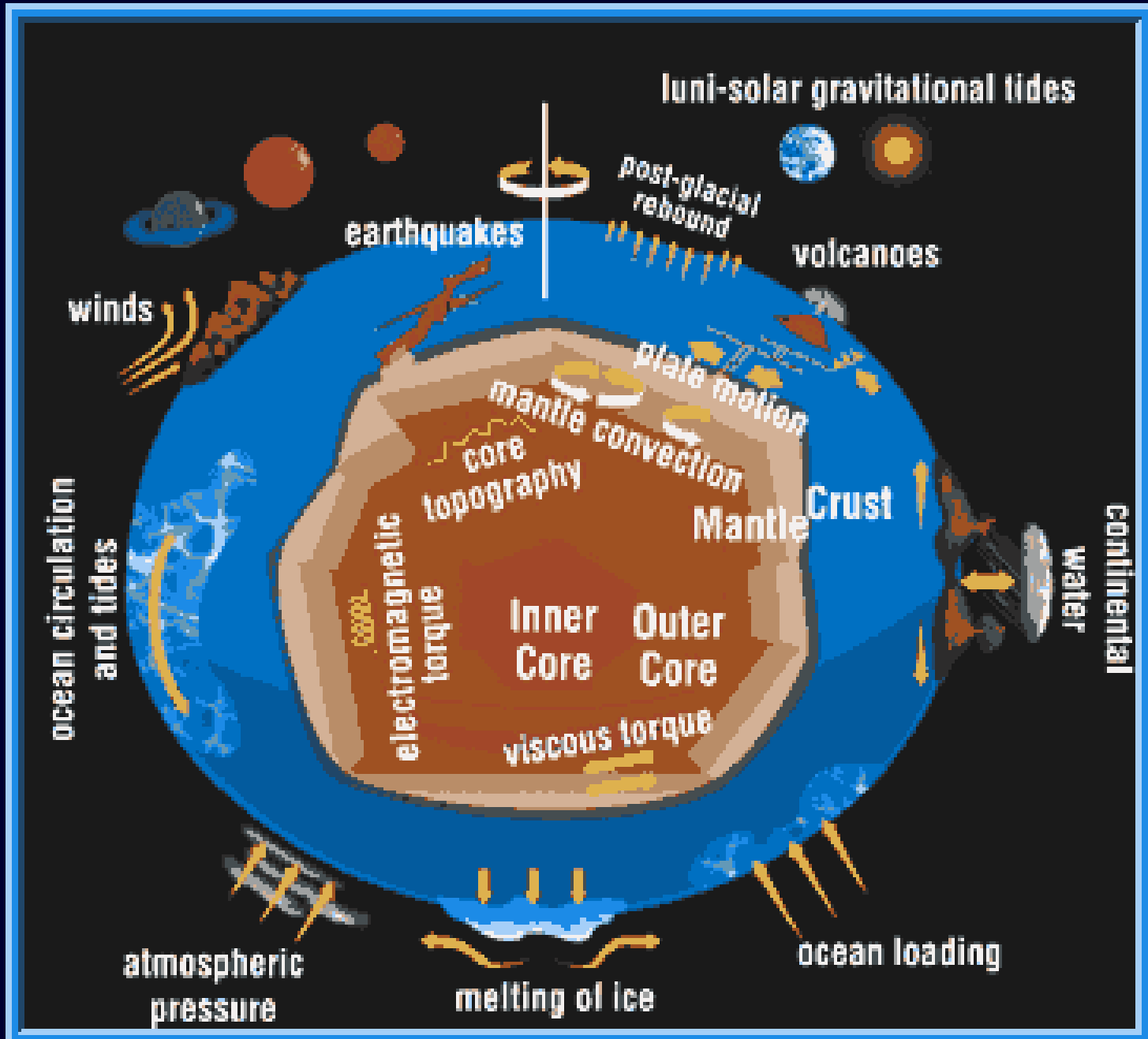
On a privilégié la rotation de la Terre autour de son axe: cette rotation est-elle suffisamment stable pour pouvoir être choisie comme temps uniforme?

# La rotation de la Terre comme modèle de temps: mais la Terre ne tourne pas si rond...!

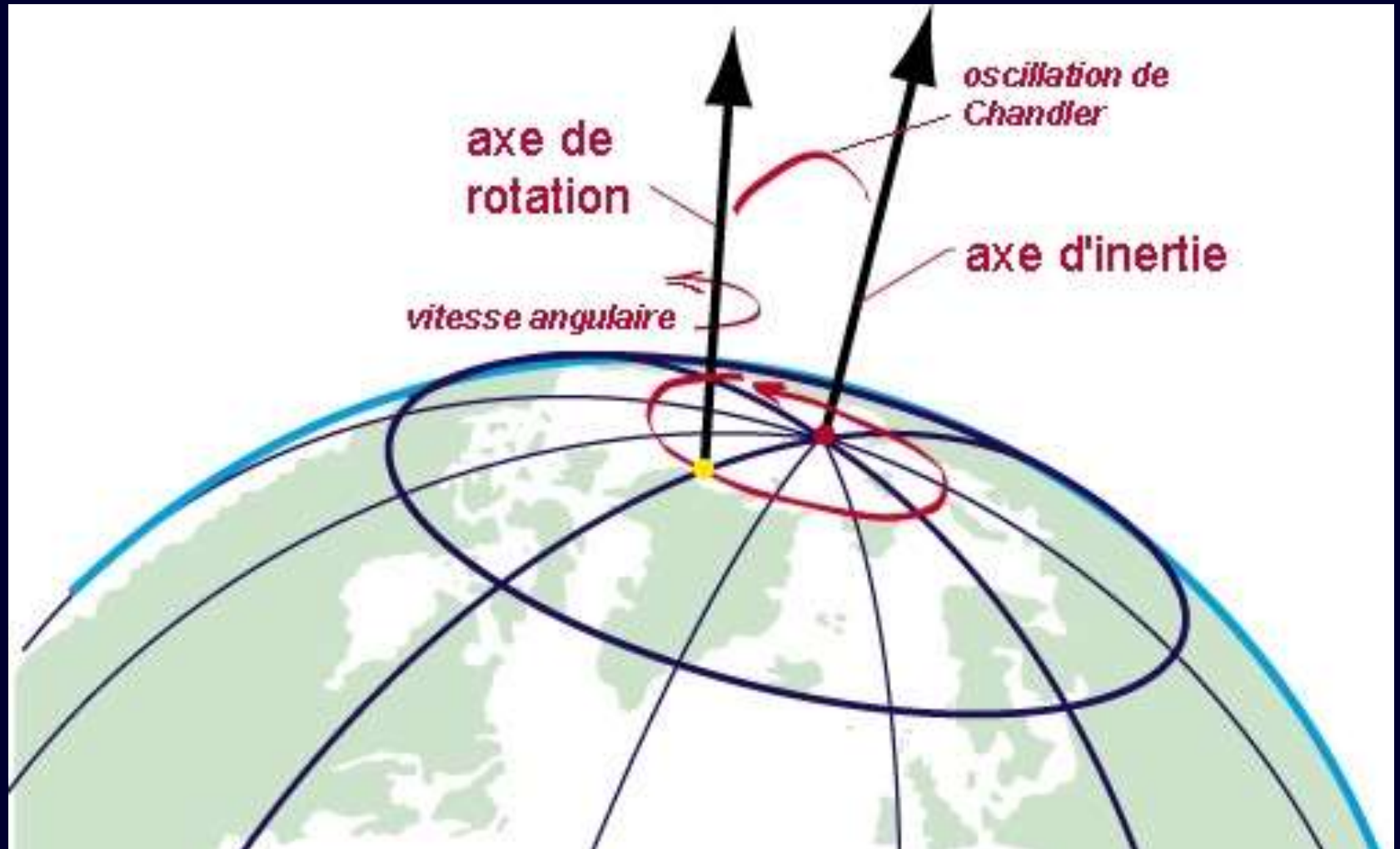
- Mouvement de l'axe de rotation dans l'espace  
précession, nutation (II<sup>ème</sup> siècle av. J.C)
- Mouvement de l'axe de rotation dans la Terre  
mouvement du pôle (XIX<sup>ème</sup> siècle)
- Non-uniformité de la vitesse de rotation  
ralentissement (XX<sup>ème</sup> siècle)



# Pourquoi ces caprices?

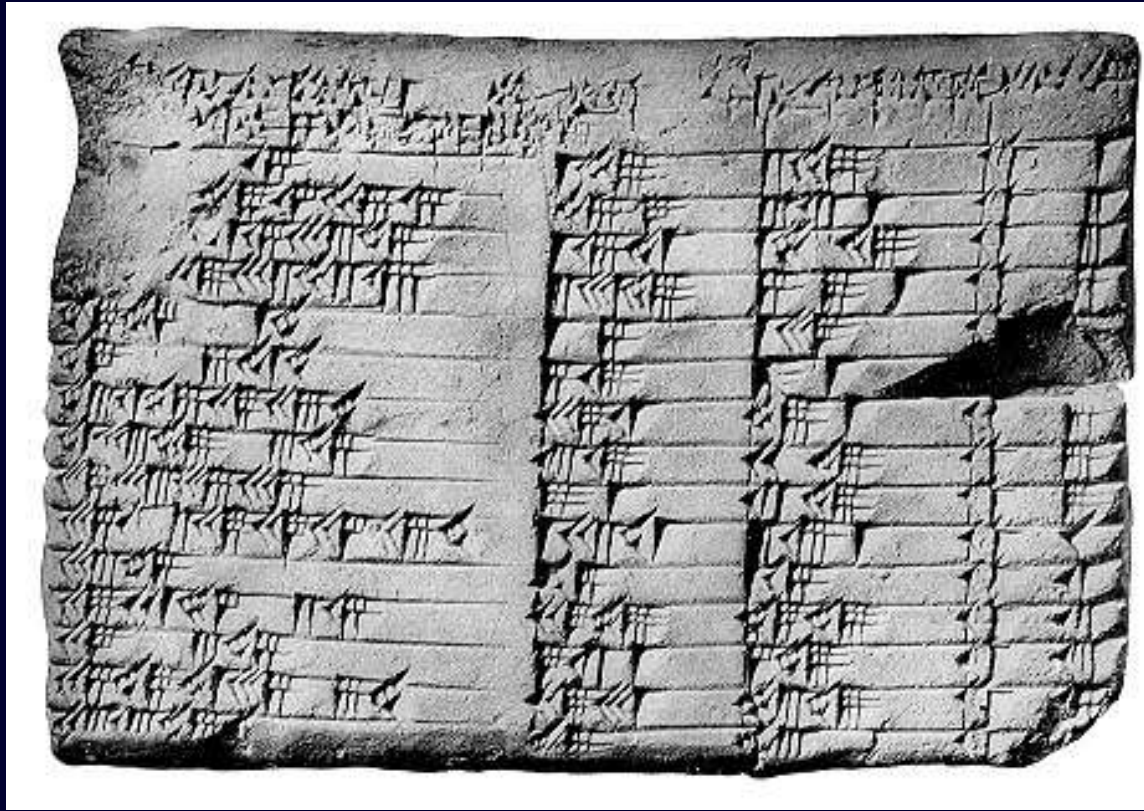


# Une rotation pas très uniforme





# Les éclipses anciennes pour aider les historiens



- *Traduction d'une tablette cunéiforme: « Une éclipse solaire a débuté au sud-ouest 96 minutes après le lever du Soleil et est devenue totale 72 minutes plus tard. L'ombre se déplaçait du sud-ouest au nord-est. Au total 140 minutes. »*

# De quelle éclipse s'agit-il?

- Contraintes astronomiques
  - 18/01/-401 11h00
  - 15/08/-241 12h30
  - 15/04/-135 8h30
- 
- Le 15 avril -135:
  - Lever du soleil 5h36
  - Début 7h12
  - Totalité 8h24
  - 
  - => Date identifiée : 15 avril -135

Ouest 10° 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° Est

Éclipse totale du  
15 avril -135

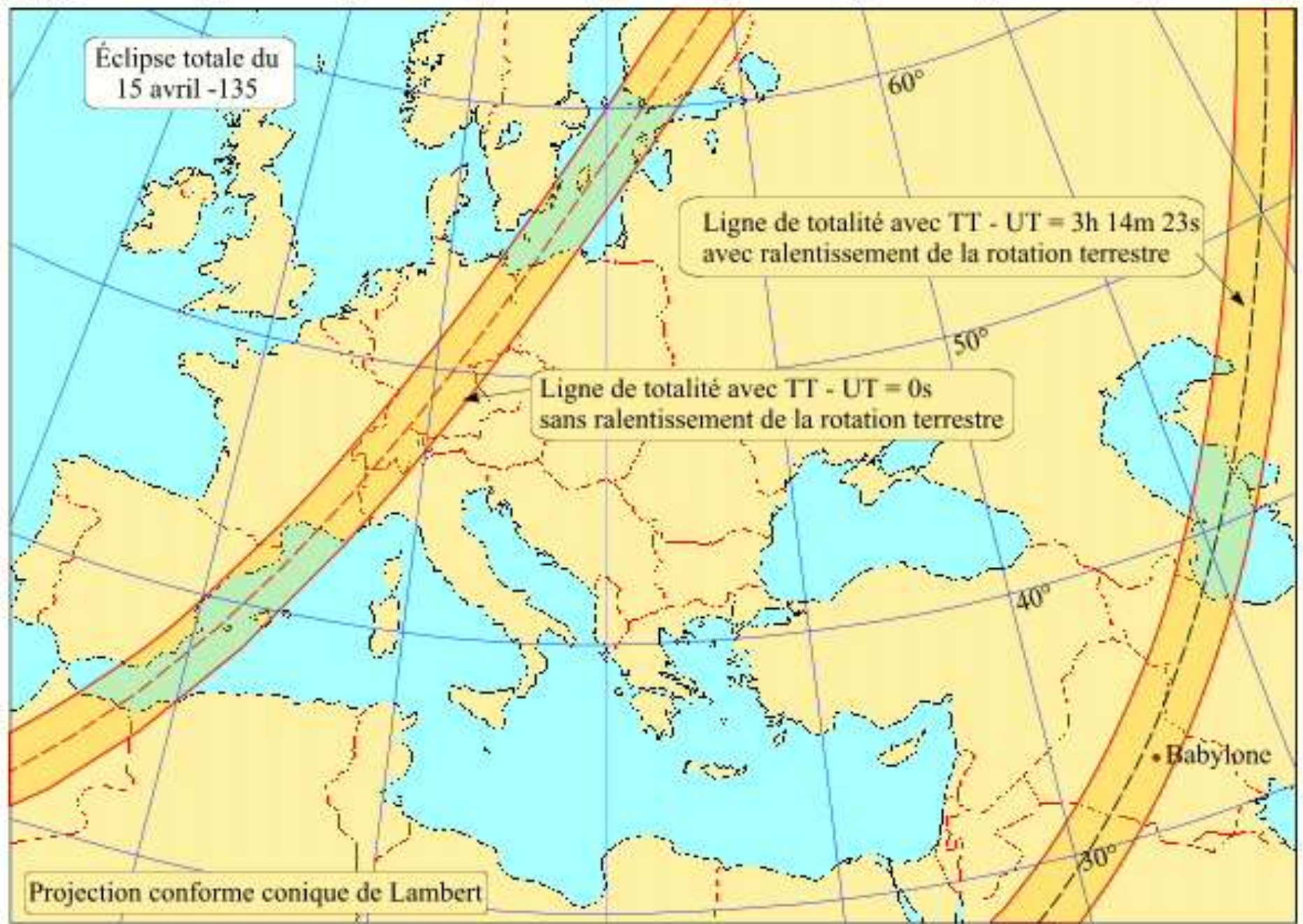
Ligne de totalité avec  $TT - UT = 3h\ 14m\ 23s$   
avec ralentissement de la rotation terrestre

Ligne de totalité avec  $TT - UT = 0s$   
sans ralentissement de la rotation terrestre

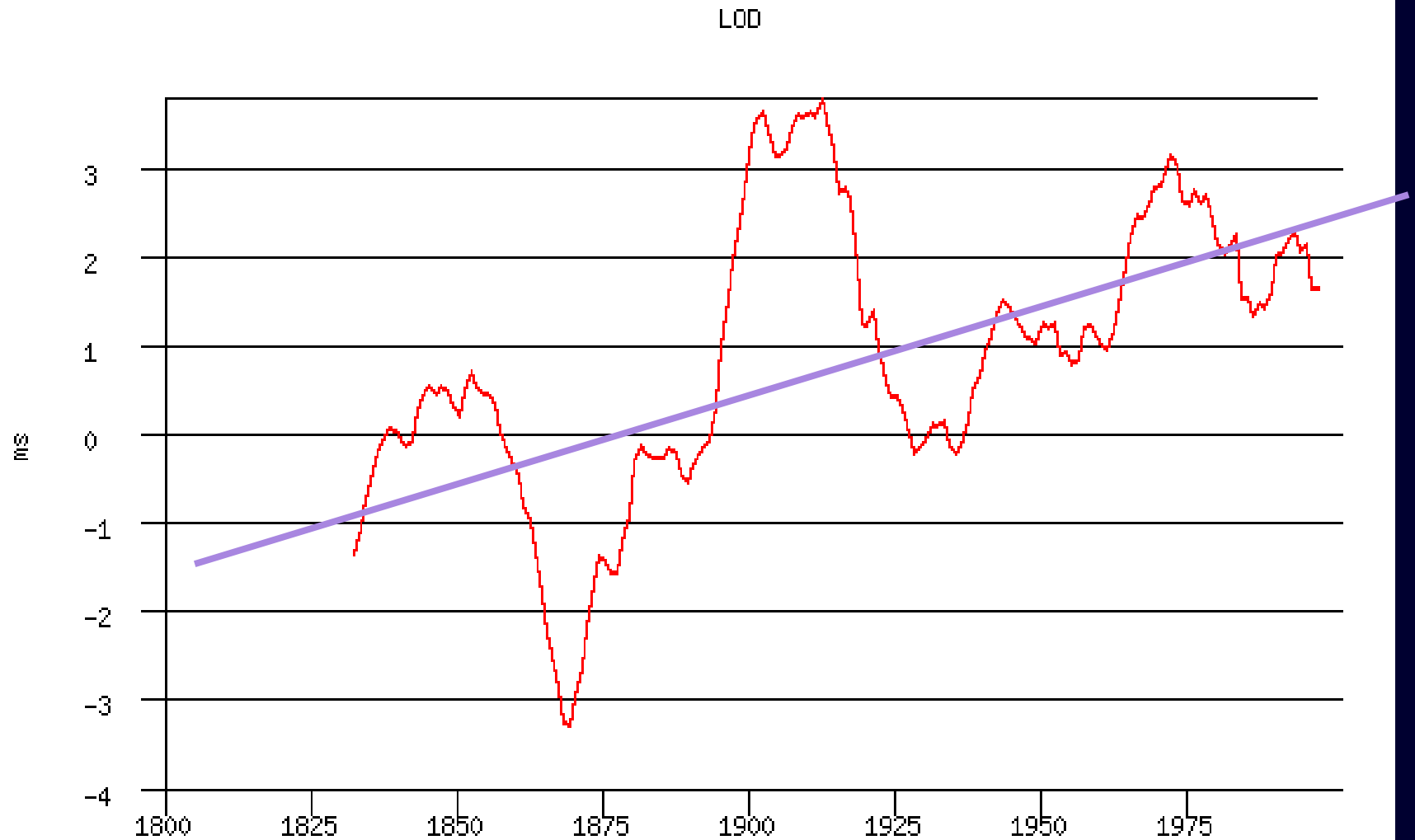
• Babylone

Projection conforme conique de Lambert

Ouest 0° 10° 20° 30° 40° Est



# Variation de la durée du jour



# La marée océanique freine la rotation de la Terre



La Terre ralentit et la Lune s'éloigne de 3cm par an

# Évolution des échelles de temps

- Abandon de la rotation diurne de la Terre (le jour moyen) comme phénomène naturel de référence
  - Utilisation de la révolution de la Terre autour du Soleil (temps des éphémérides):
    - *la seconde est la fraction  $1/31556925.9747$  de l'année tropique pour le 0 janvier 1900 à 12 heures de temps des éphémérides*
- (adopté par la 11<sup>ème</sup> conférence des poids et mesures en 1960 mais abandonné en 1967!)

# Évolution des échelles de temps

- Abandon de la seconde astronomique comme phénomène naturel de référence
- Utilisation de la physique: recherche d'une fréquence naturelle stable permettant de construire une seconde « physique » fabriquée en laboratoire.

# Le temps atomique

- C'est en 1955 que le premier étalon de fréquence fut construit par L. Essen et J. Parry qui travaillaient au National Physical Laboratory de Londres.
- Ces premiers travaux ouvrirent la voie à une nouvelle définition de la seconde qui vit le jour en 1967 lors de la treizième conférence générale des poids et mesures.
  - *La seconde est la durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins  $F=3$  et  $F=4$  de l'état fondamental  $6S_{1/2}$  de l'atome de césium 133.*
- Malgré une complexité apparente au moins aussi grande que celle de la définition de la seconde de temps des éphémérides, cette définition offre l'avantage d'une bien meilleure accessibilité.



# L'horloge atomique

Abandonner le temps astronomique, non uniforme pour le temps physique, plus régulier.

## Définitions:

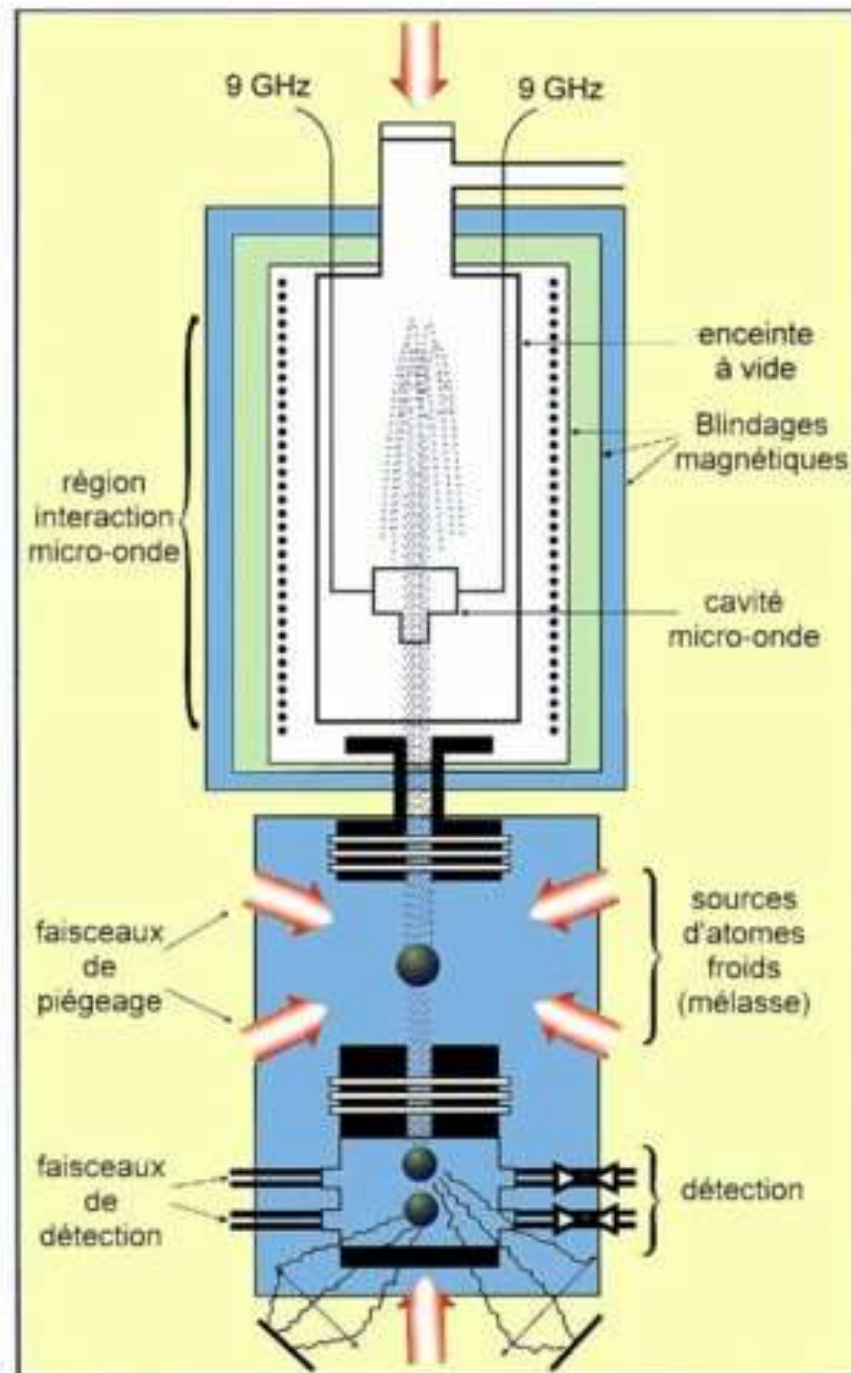
- de la seconde:

Astronomique → 1967

Physique 1967 → ...

- du jour:

c'est 86400 secondes



# Les horloges atomiques

Abandonner le temps astronomique, non uniforme pour le temps physique, plus régulier.

Définitions:

*de la seconde:*

Astronomique

-jusqu'en 1960:

$1/86400$  du jour solaire moyen.

- de 1960 à 1967:

$1/31556925.9747$  de l'année tropique 1900

Puis physique à partir de 1967

9192631770 périodes de transition du césium 133

*du jour:*

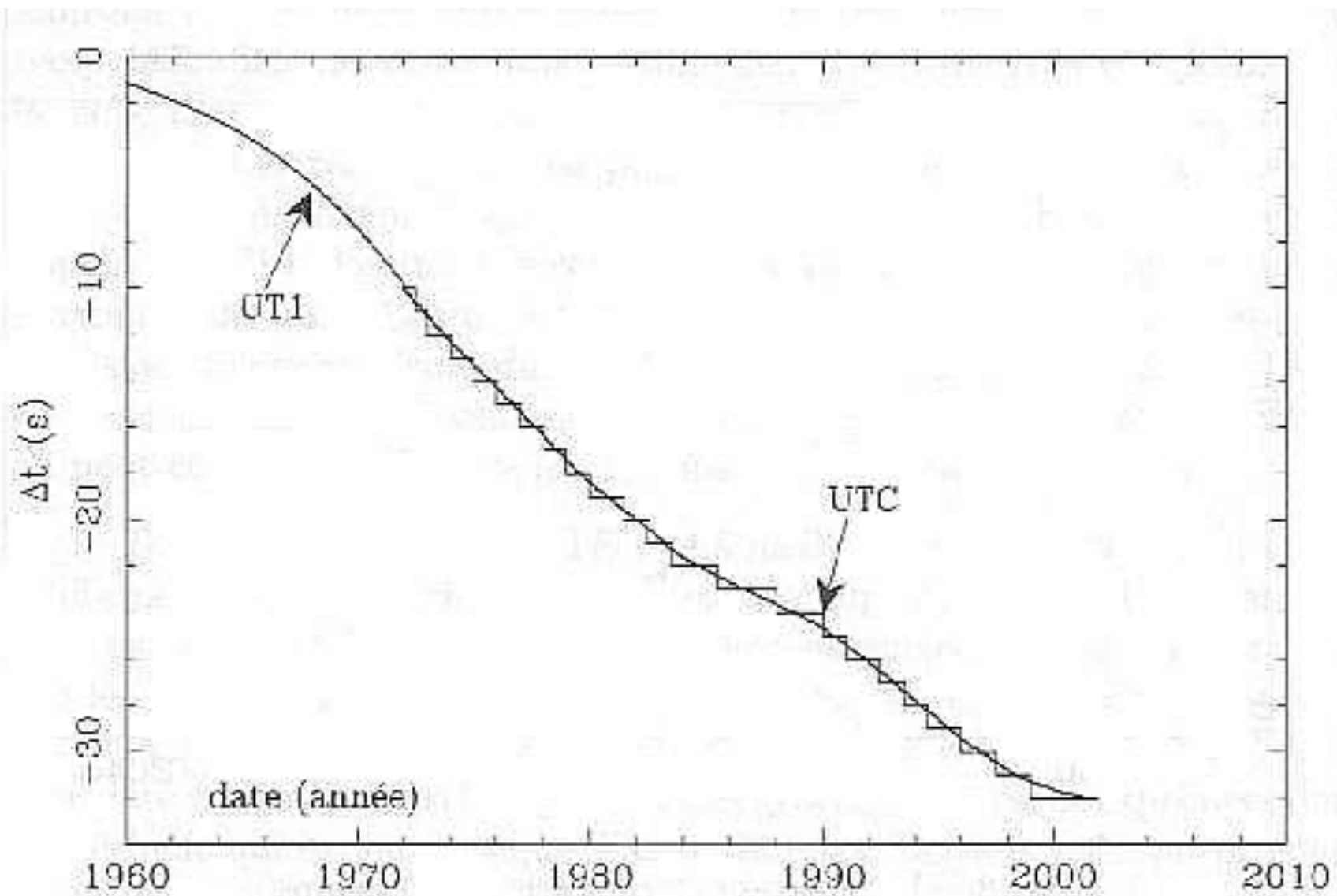
c'est 86400 secondes



# Les nouvelles échelles de temps

- Le temps universel est désormais construit grâce à une moyenne statistique de diverses horloges atomiques de référence.
  - UT1 suit la rotation de la Terre
  - TAI suit les horloges atomiques
  - UTC suit les deux:  $UT1 - UTC = < 0,9s$ .
- ➔ ajout d'une « seconde intercalaire » (le 30 juin ou le 31 décembre à 23h59m60s si besoin)

Elles permettent de créer une unité de temps physique qui ne suit plus la rotation de la Terre



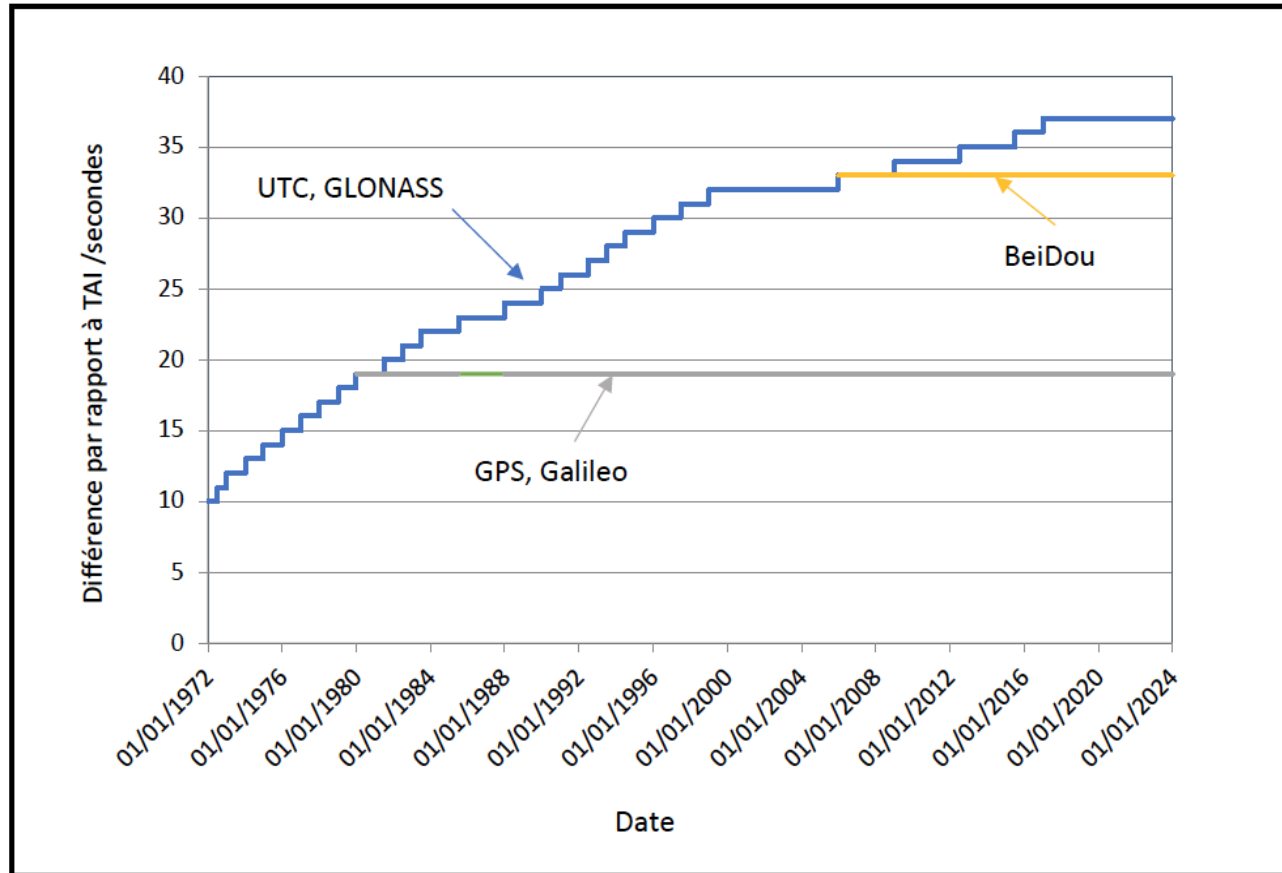
Différences en secondes par rapport au TAI.

# Les nouvelles échelles de temps

- UTC suit les deux:  $UT1-UTC = < 0,9s$ .
- ➔ ajout d'une « seconde intercalaire » (le 30 juin ou le 31 décembre à 23h59m60s si besoin)

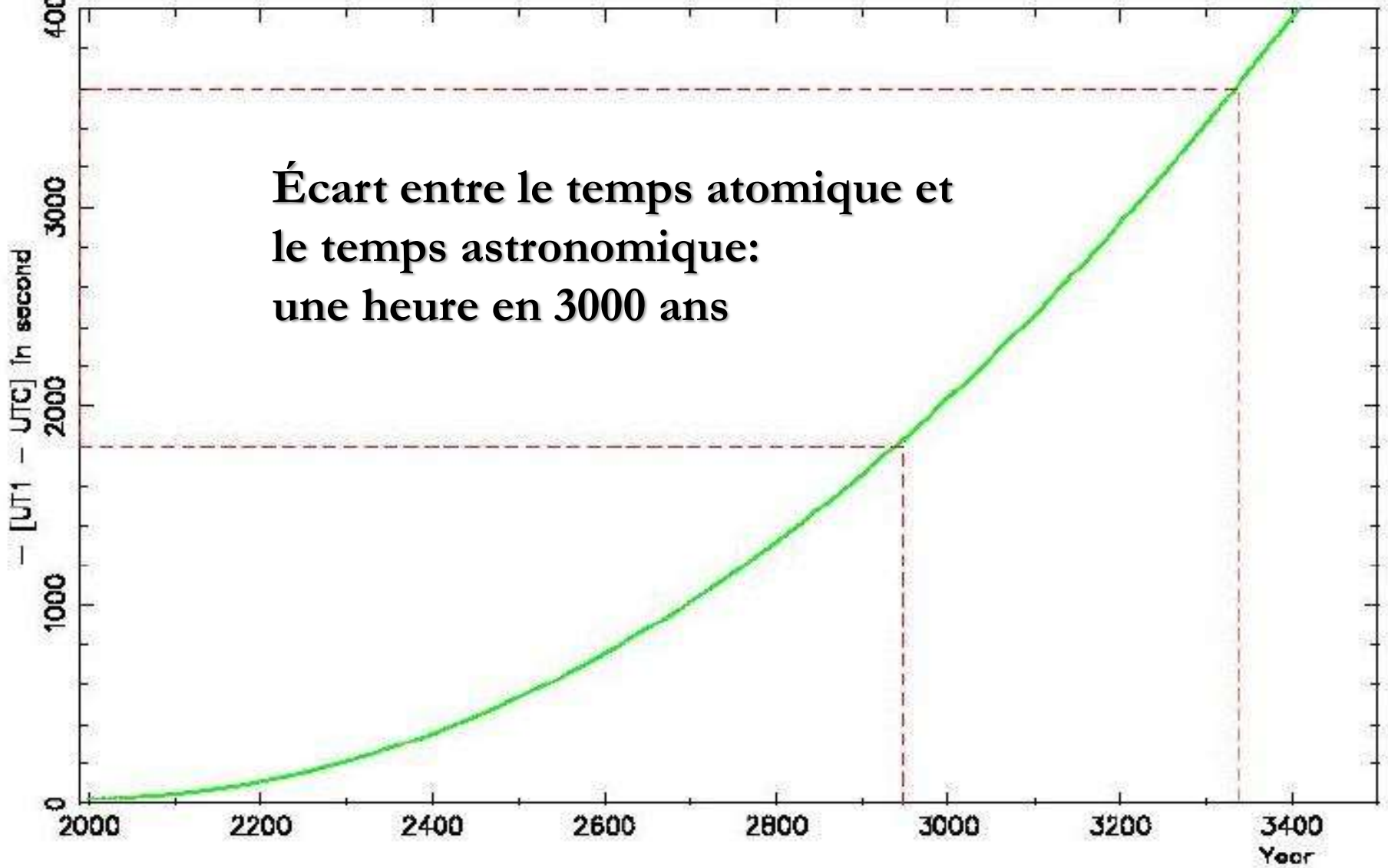
Mais: le 18 novembre 2022 les représentants des états membres du Bureau international des poids et mesures (BIPM), réunis à la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) à Versailles ont adopté une résolution qui permettra de préserver la continuité du Temps universel coordonné (UTC) au moins pendant un siècle à partir de l'année 2035.

# L'abandon de la seconde intercalaire



- C'est déjà fait pour les systèmes de positionnement (GPS,...)

Quadratic Evolution of  $- [UT1 - TA]$  wrt Years with the mean Dlod = 2 ms



# Le temps et la relativité restreinte

- La constance de la vitesse de la lumière va remettre en cause la notion de temps absolu
- La relativité galiléenne et le temps absolu newtonien sont abandonnés





# La relativité restreinte

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$



# La relativité générale

*le principe d'équivalence:*

masse grave = masse inertielle

« poids » = « masse »



# Le temps n'est pas absolu

- La relativité générale a changé notre perception du temps
- Une position dans l'espace temps s'écrit désormais:
  - $X=f_x(t)$
  - $Y=f_y(t)$
  - $Z=f_z(t)$
  - $T=f_t(t)$où  $t$  est une variable mathématique uniforme
- Le temps dépend de l'espace: il n'y a pas d'événements simultanés.

# La précision des échelles de temps

Le temps atomique est plus précis que le temps astronomique mais comment mesurer cette précision?

La stabilité des horloges est évaluée par la comparaison entre horloges.

A partir d'une certaine précision, la relativité générale postule que deux horloges situées dans des champs gravitationnels différents auront un fonctionnement différent: il faut le mesurer et en tenir compte.

Les meilleures horloges actuelles ont une précision de  $10^{-17}$  soit une erreur d'une seconde au bout de 3 milliards d'années.

# Échelles de temps relativistes

1976 : TDB Temps dynamique barycentrique.

TDT Temps dynamique Terrestre voisin du temps des éphémérides.

TDB - TDT : termes périodiques et de Poisson de faibles amplitudes.

1991 : notion de temps coordonnée - TC\*

TCB : Temps coordonnée barycentrique.

TCT : Temps coordonnée terrestre.

TCB - TCT : termes périodiques + terme séculaire.

Relations entre échelles de temps

$$TE = TAI + 32,184s$$

$$TAI - UTC = n \text{ secondes (nombre entier de secondes)}$$

$$\text{Temps terrestre (lié au géoïde) } TT = TE = TAI + 32,184s.$$

$$TDB = TDT + P \text{ (termes périodes)}$$

$$TCB = TCT + P + k(J - 2443144.4) \text{ (termes périodiques + terme séculaire).}$$

# Le temps relativiste

Le temps ralentit lorsqu'on se déplace rapidement. Quand un cosmonaute revient sur Terre après avoir passé un an en orbite, il revient *1,4 milliseconde plus jeune* que s'il était resté sur terre. Son temps s'est donc ralenti par rapport à celui de la Terre.



# Les jumeaux de Langevin et le GPS: la dilatation du temps

- Le temps n'est pas le même pour tous: expérience faite à l'aide d'horloges atomiques en orbite.

## L'expérience de Hafele-Keating

	prédictions théoriques (ns)			résultats expér. (ns)
	relativité	gravité	total	
vers l'Est	$-184 \pm 18$	$144 \pm 14$	$-40 \pm 23$	$-59 \pm 10$
vers l'Ouest	$96 \pm 10$	$179 \pm 18$	$275 \pm 21$	$273 \pm 7$

Expérience refaite en 1996, puis en 2010, avec une précision améliorée.

Effets désormais incorporés dans la localisation par GPS.

# Le paradoxe de Langevin

- On affirme que le voyageur vieillit moins que le sédentaire
  - MAIS: le voyageur peut considérer qu'il n'a pas bougé mais que c'est le sédentaire qui a voyagé puisque les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels
- ➔ En fait, le sédentaire est resté dans un référentiel galiléen mais pas le voyageur qui est dans un référentiel relativiste (confirmé par la durée de vie des muons)



# Le temps relativiste

A la vitesse de la lumière, on ne vieillit plus, ce qui est le cas du photon sans masse mais il est impossible à une masse quelconque d'atteindre la vitesse de la lumière.

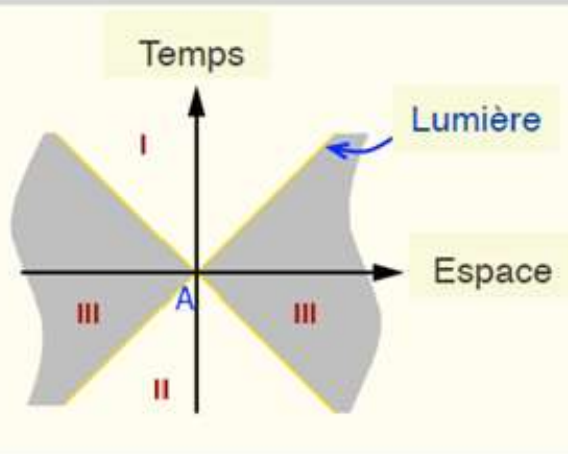
En fait, nous nous déplaçons tous en permanence *dans l'espace-temps*. Ainsi, si nous sommes immobiles, nous nous déplacerons uniquement dans le temps, et nous vieillirons rapidement. Plus on se déplace dans l'espace, c'est à dire plus on va vite, moins nous nous déplaçons dans le temps. La lumière ne se déplace que dans l'espace. Elle ne peut donc plus se déplacer dans le temps. Pour elle, le temps n'existe donc plus. Les photons ne vieillissent pas.

# L'espace-temps

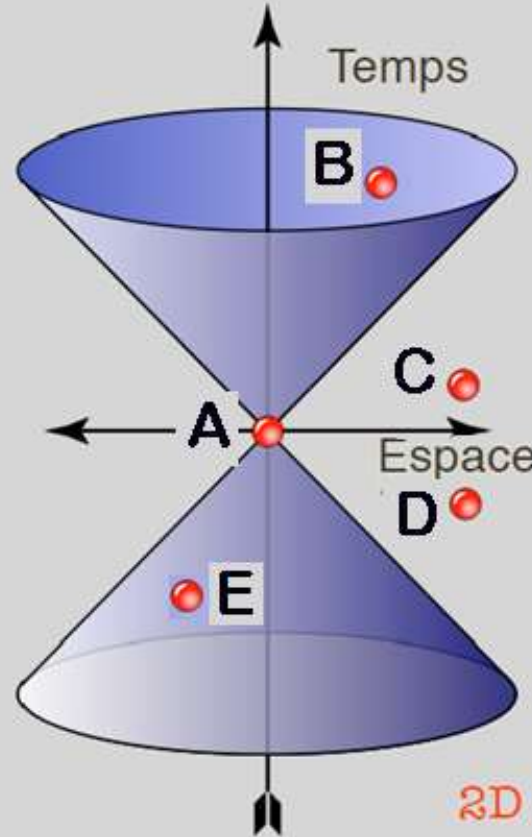
## L'espace-temps

intervalle invariant  $\Delta s^2 = c^2\Delta t^2 - \Delta x^2$

1D



Minkowski (1908)



2D

Attention: l'espace-temps n'est ni euclidien, ni référentiel galiléen

← Nous sommes en **A**: nous pouvons aller en **B**, nous pouvons observer **E** mais nous ne pouvons pas aller dans **C** ni observer **D**.

L'espace-temps détermine comment la matière se déplace et la matière détermine comment l'espace-temps se courbe. (J. Wheeler)

# Le temps relativiste

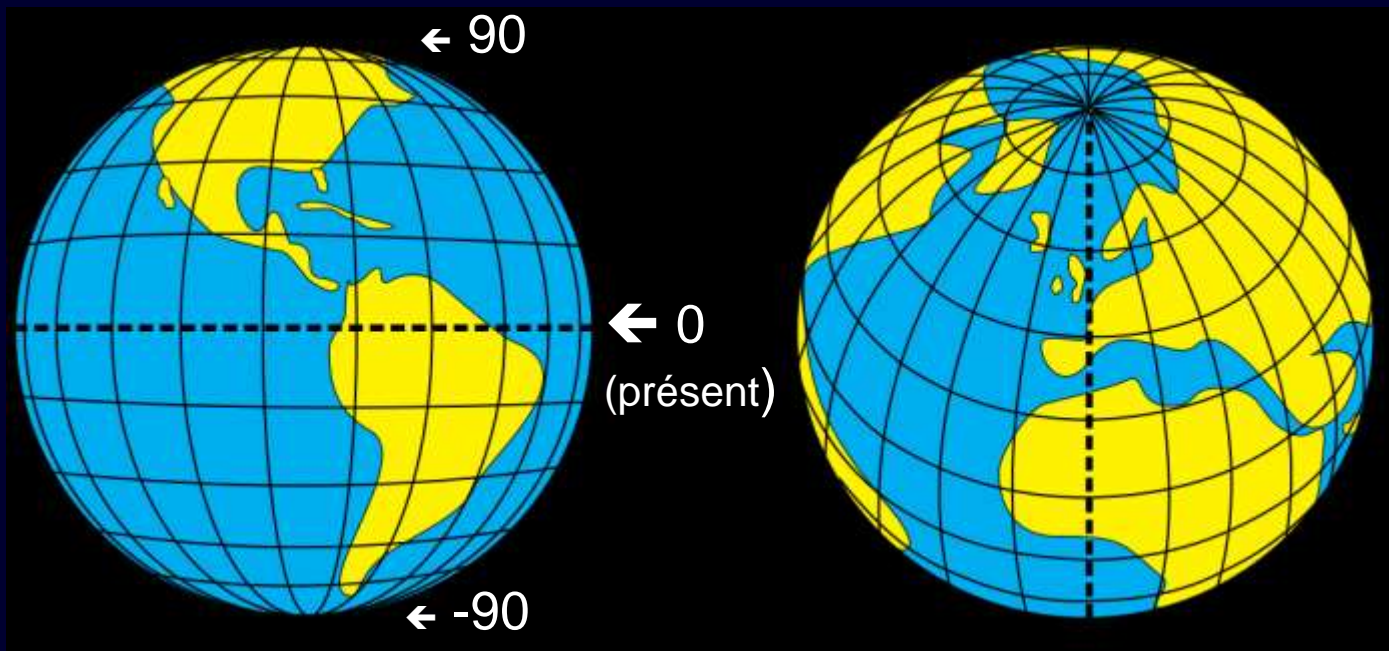
- Y-a-t-il eu un instant « zéro » de l'univers?
- Non, mais l'univers n'existe que dans l'espace-temps.  
En dehors de l'espace-temps il n'y a ni espace, ni temps.

# Le temps relativiste

Y-a-t-il eu un instant « zéro » de l'univers?

Non, mais l'univers n'existe pas depuis toujours et quand il n'y avait pas d'espace, il n'y avait pas de temps.

L'univers n'existe que dans l'espace-temps.



Qu'y avait-il avant l'instant zéro? = Qu'y a-t-il au-delà du pôle? L'univers n'est pas « éternel ».

# Temps et expansion de l'univers

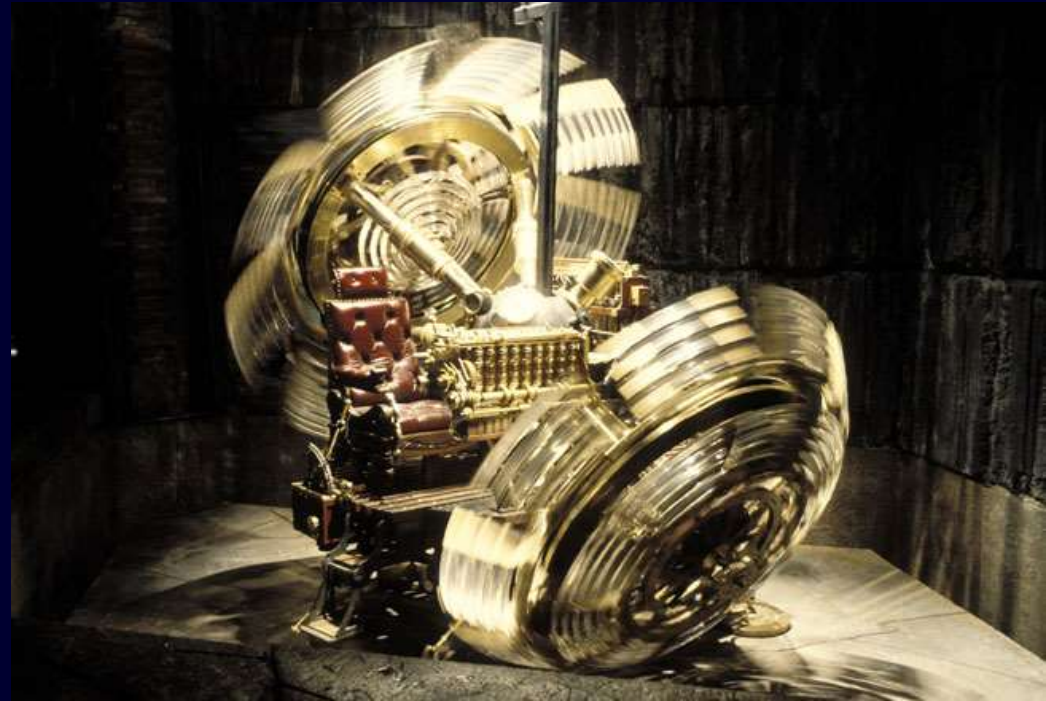
- En cosmologie on a vu que l'univers est en expansion
- L'espace se crée peu à peu
- Cette création d'espace est aussi une concrétisation de la notion de temps

# Le temps relativiste: quelles conclusions sur le temps des philosophes

- Temps et espace sont liés, l'un n'existe pas sans l'autre.
- La physique nous montre qu'il n'y a pas de temps absolu et que le temps peut ralentir: il est propre à chaque point de l'espace et il n'existe pas pour la lumière!
- Mais pourquoi le temps ne va-t-il que dans un sens?

# La machine à explorer le temps

Le voyage dans le temps est impossible du fait du principe de causalité.

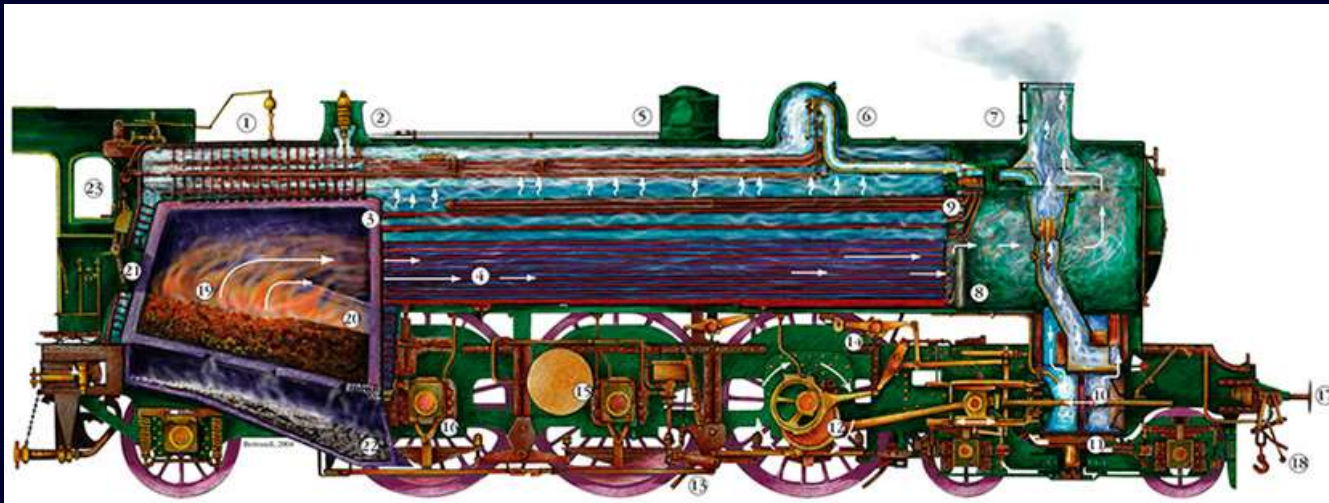


# Qu'est-ce que la flèche du temps?

Les lois physiques supposent toujours que les phénomènes naturels sont réversibles? Et le temps ne l'est pas?

L'explication est donnée par l'entropie de l'univers et la 2<sup>ème</sup> loi de la thermodynamique: plus simplement l'univers tend vers l'équilibre thermique, dépense son énergie et il est impossible de retourner à la situation initiale de « déséquilibre » sans un apport important d'énergie.

Exemple le moteur à explosion, la machine à vapeur ou tout organisme vivant.





# Qu'est-ce que la flèche du temps?

## L'approche déterministe:

Un verre d'eau chaude + un verre d'eau froide = un verre d'eau tiède

Mais comment fabriquer un verre d'eau froide et un verre d'eau chaude à partir d'un verre d'eau tiède? L'opération n'est pas réversible sans apport d'énergie.

## L'approche probabiliste:

Un verre d'eau + un verre de vin:

-l'eau et le vin doivent-ils absolument se mélanger? Peuvent-ils cohabiter sans se mélanger ou se séparer après avoir été mélangés?

-le mélange est dû à l'agitation aléatoire des molécules d'eau donc rien ne l'interdit mais la probabilité est très très faible...

Dans les deux cas le système n'est pas réversible

# Qu'est-ce que le temps?

Il n'y a pas d'événements simultanés (Einstein)



Passé

Présent 1

Avenir



Passé

Présent 2

Avenir

# Qu'est-ce que le temps?

Tous les instants vécus, le sont au présent! (Descartes)



présent

présent

présent

Nous ne pouvons pas vivre tous les instants en même temps pour constater le changement et l'évolution de l'univers, mais nous devons les relier entre eux (le continuum de Descartes).

# Qu'est-ce que le temps?

Le principe de causalité peut remplacer la notion de temps (Kant).



passé

présent

avenir

- Le temps n'est que l'interprétation par nos sens de ce principe.
- Nous n'avons pas conscience que de l'instant présent mais d'un présent étendu, connecté au passé et au futur.

# Qu'est-ce que le temps?

Comment évolue-t-il?

L'évolution est-elle déterministe?



La réponse est oui!

passé

présent



avenirs ?

# Qu'est-ce que le temps?

- Première théorie (dite de l' « univers-bloc »)



passé

présent

avenir

- Passé, présent et avenir coexistent et notre conscience ne peut vivre qu'un point de l'espace-temps: le présent. L'univers est déterministe (Saint-Augustin).

# Qu'est-ce que le temps?

- Deuxième théorie (dite du « présentisme »)



passé

présent

avenir

- Seul le présent existe: nous nous souvenons du passé pour construire l'avenir.

# Qu'est-ce que le temps?

- Troisième théorie (dite de l' « espace-dynamique »)



passé

présent

avenir

- Le présent construit l'espace-temps peu à peu; le « moteur » du temps se trouve dans l'énergie et l'expansion de l'univers.



# Une autre question sur le temps

- Le temps est-il discret ou continu?
- Est-ce une succession d'instants séparés? (le temps de Planck)
- Ou bien un déroulement continu?
- (La même question se pose pour matière, lumière, particules)

# Une autre question sur le temps

- Des problèmes à résoudre pour décrire l'évolution de l'univers à son début:
  - Le temps de l'infiniment petit, celui de la mécanique quantique, n'est pas déterministe mais probabiliste: il est discret!
  - Le temps de l'infiniment grand, celui de la relativité générale, est déterministe: il est continu!
- La théorie « des super-cordes » cherche à unifier ces deux temps différents.

# Quel est l'âge de l'univers?

- L'horizon des objets observables est à 14 milliards d'années lumière de nous.
- L'univers a donc un âge de 14 milliards d'années et une taille finie.
- Mais si l'univers a « une taille », il n'a pas de frontière! Il remplit tout l'espace... comme la Terre a une surface finie mais pas de « limites » à cette surface.
- De même si l'univers a « un âge », il n'a pas de début puisque le temps n'existait pas quand il n'y avait pas d'espace-temps (Saint-Augustin)...

Il a un âge défini mais pas d'instant initial (cf la Terre qui a une surface finie mais pas de début ni de fin...).

# En guise de conclusion

- Le temps n'est pas absolu: il est relativiste, lié physiquement à l'observateur.
- Le temps et l'espace sont liés dans l'espace-temps et évolue conjointement.
- L'espace se crée peu à peu (c'est l'expansion de l'univers) et le temps, c'est notre interprétation de cette création continue de l'espace.
- Le temps, c'est notre conscience qui parcourt l'espace-temps à 4 dimensions.
- Le temps est le moteur qui renouvelle le présent.