

Mesure du temps

(en physique)

UE 3-2 Master MEEF

Le temps pour les Hommes

- Les êtres humains ont pris conscience du temps très tôt dans leur histoire.
- Il a été très rapidement au centre des sociétés dans leur organisation
 - sociale (place des jeunes et des anciens)
 - économique (récolte, chasse,...)
 - religieuse (le temps est au centre de nombreuses religions)
- La nécessité de la mesure du temps s'est très rapidement imposée.
 - Il a donc fallu imaginer des dispositifs permettant cette mesure

Le temps pour les philosophes

- Le temps est un sujet central de la réflexion philosophique.
 - Il est intimement lié à la vie (naissance, mort), à la trace, à Dieu...
- Platon (-437, -347)
 - «Le temps est inutile. Seule compte l'étude des invariants qui sont des réalités vraies.»
 - - "Le Temps est l'image mobile de l'éternité immobile"
- Aristote (-384,-322)
 - «Le rôle du temps dans les processus naturels est un fait essentiel de la réalité du monde.»
 - - "Le temps est le nombre du mouvement"

Le temps pour les philosophes

- Le temps est un sujet central de la réflexion philosophique.

- Saint Augustin (354-430)

- « La notion du temps, n'est pas un objet de notre savoir, mais une dimension de notre être. »

- Dieu est l'éternité, l'homme est dans le temps.

- Pascal (1623-1652)

- «Le temps... Qui pourra le définir ? Et pourquoi l'entreprendre, puisque tous les hommes conçoivent ce qu'on veut dire en parlant de temps, sans qu'on le désigne davantage?»

- Kant ()

- « Le temps n'est pas un concept empirique qui dérive d'une expérience quelconque. En effet, la simultanéité ou succession ne tomberait pas elle-même sous la perception, si la représentation du temps ne lui servait a priori de fondement. Ce n'est que sous cette supposition que l'on peut se représenter qu'une chose existe en même temps qu'une autre (simultanément) ou dans des temps différents (successivement). »

Le temps pour les physiciens

- La mesure du temps présente un caractère essentiel en physique,
 - Sa mesure permet
 - de positionner un évènement dans un système de référence et donc de définir les notions de :
 - Simultanéité
 - Causalité
 - de définir les notions liées à la dépendance dans le temps des phénomènes physique :
 - Evolution
 - Equilibre
 - Périodicité
 - Permet de s'interroger sur l'universalité et l'invariance des lois de physique dans l'espace et dans le temps.

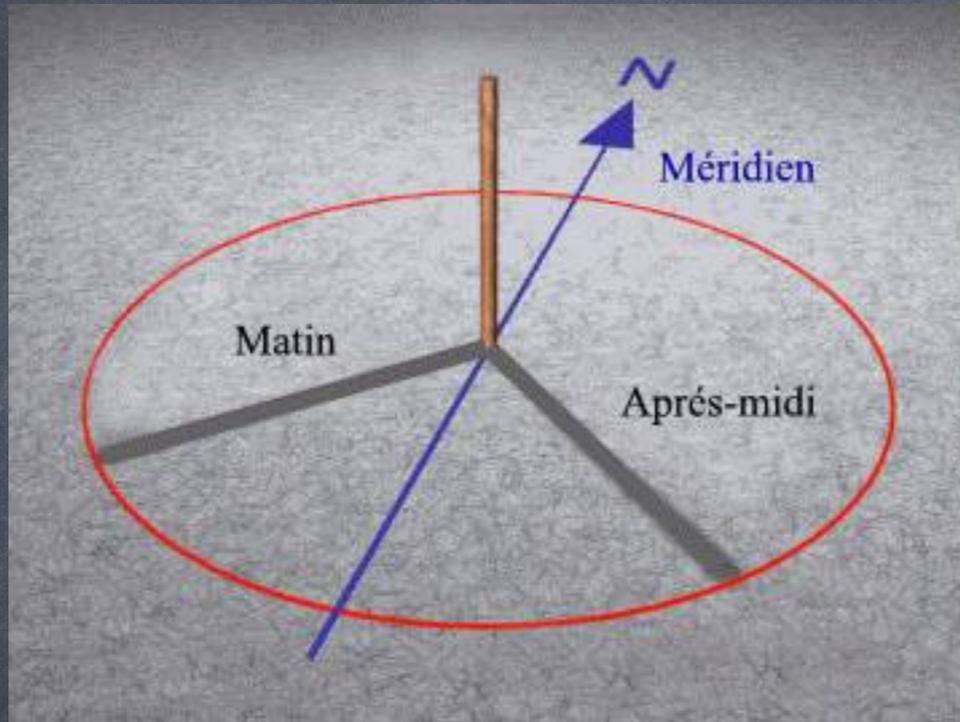
Le temps astronomique (première partie)

- Les premiers instruments de mesure du temps sont liés à l'observation astronomique du mouvement de la Terre
 - Ils ont contribué à la construction de l'idée d'un temps périodique
 - Les saisons reviennent à intervalle régulier (à l'échelle humaine).
 - L'alternance jour/nuit est la manifestation évidente d'une évolution plus ou moins régulière de l'environnement
 - La course du soleil dans le ciel est elle aussi la manifestation évidente d'une dynamique.
- Les premiers instruments de mesure du temps cherchent donc à capter la course du soleil dans le ciel

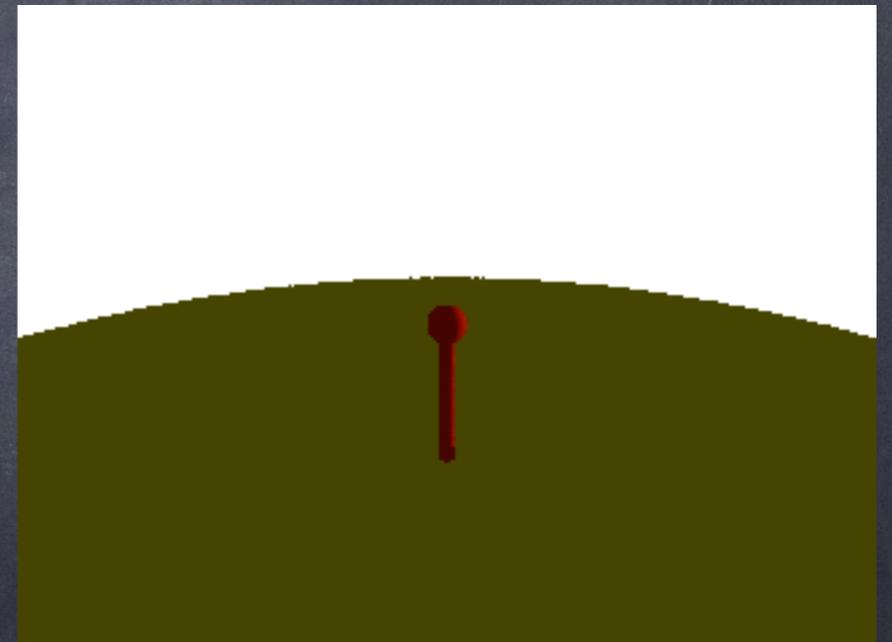


Le Gnomon

- L'ombre d'un simple bâton planté verticalement dans le sol permet de mettre en évidence le mouvement apparent du soleil.



Un gnomon planté à Paris le jour de l'été



Le Gnomon

- C'est un véritable instrument de mesure du temps car il permet d'obtenir le temps de façon absolue.
- Sa précision n'est cependant pas très bonne.
- Limitations
 - La taille de l'ombre dépend du jour de l'année, ce qui peut rendre la lecture difficile quand le soleil est haut dans le ciel.
 - La position de l'ombre dépend du jour de l'année. Car le jour solaire n'est pas rigoureusement identique. (on reverra ce problème pour les cadrans solaires)
 - Il ne fonctionne pas la nuit.
- L'instrument a été utilisé de manière empirique pour fractionner la journée.
- Son étude théorique demande de mettre en oeuvre quelques calculs astronomiques...

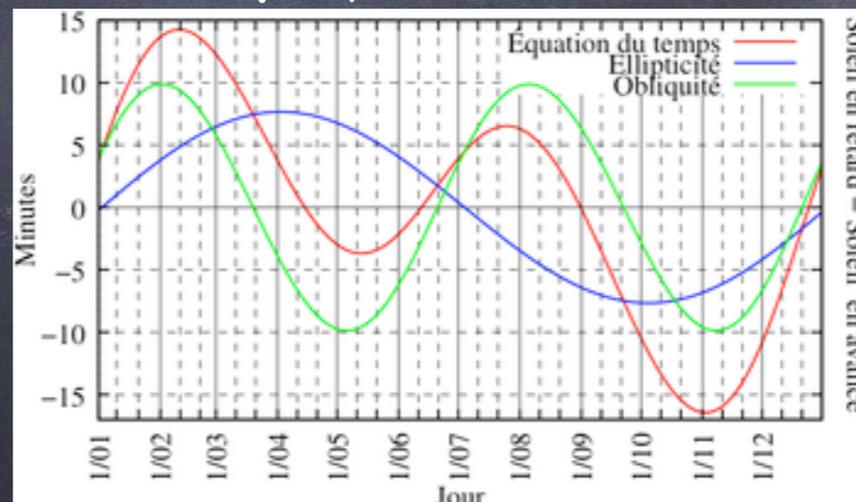
Le(s) Cadran(s) solaire(s)

- C'est une amélioration du gnomon. On lui adjoint un système de graduation (il y en a de plusieurs types)



Le cadran solaire

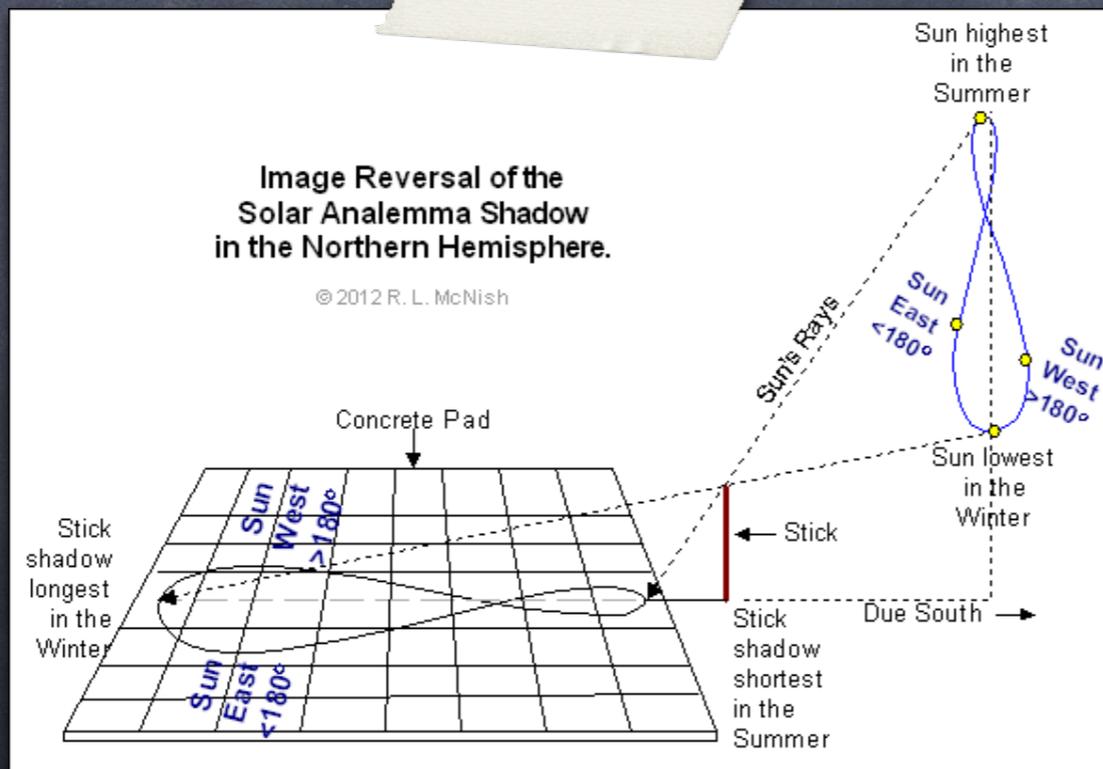
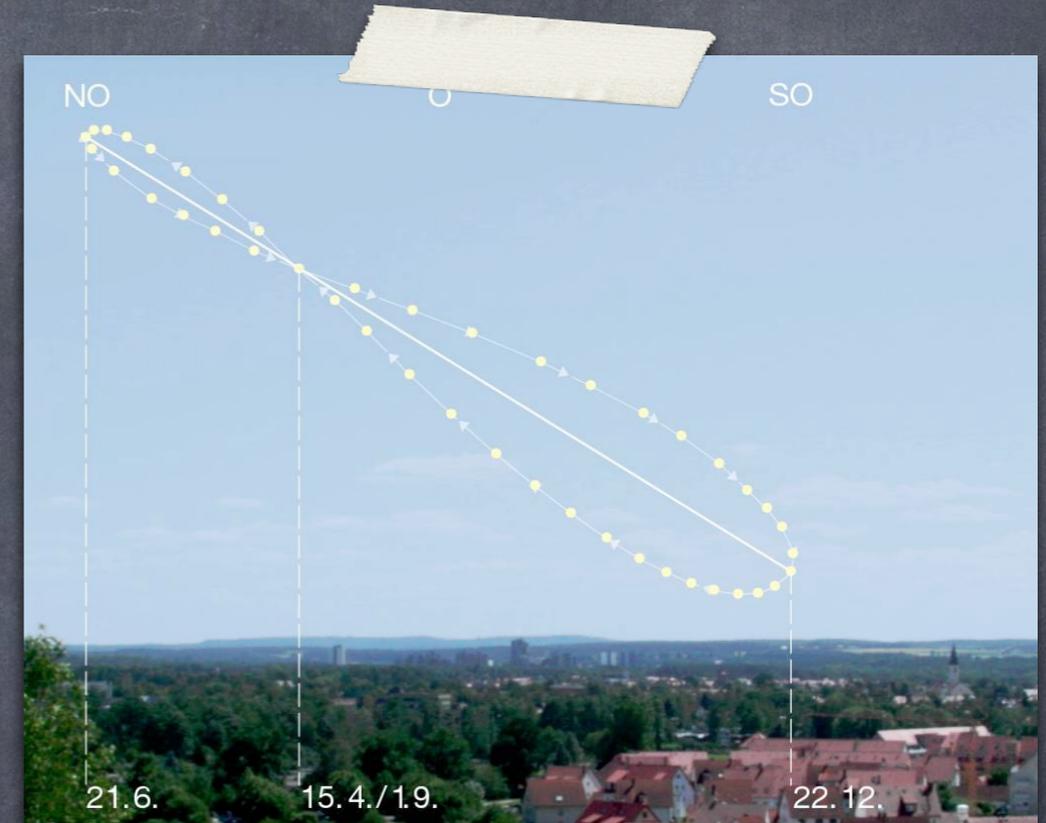
- C'est aussi un instrument de mesure du temps.
- Il souffre cependant des mêmes défauts que le gnomon.
- L'heure qu'il donne n'est pas la même d'un bout à l'autre de l'année, la course du soleil n'étant pas régulière dans le ciel.
- La valeur donnée par le cadran solaire doit être corrigée en fonction du jour de l'année.
- C'est l'équation du temps qui donne cette correction



- Elle traduit la différence entre le jour solaire et le jour moyen
 - La correction peut être de +/-15mn

Le cadran Solaire

- Un moyen de visualiser cette différence entre le jour solaire et le «jour moyen» : construire un analeme
- Chaque jour on pointe la position du soleil à midi...



Le temps astronomique

- Pendant longtemps la mesure du temps a été une affaire d'astronomes la mesure du temps était basée sur le mouvement périodique de la Terre
- Pourquoi une telle référence ?
 - Le mouvement de la Terre est d'une grande amplitude
 - Il est identique pour tout le monde
 - On avait alors deux définitions
 - 1 période = 86400 secondes
 - 1 révolution solaire = 31 556 925,9747 secondes (mnemo : $\pi \cdot 10^7$)
- Les astronomes sont restés les gardiens du temps jusqu'en 1967

La Clepsydre

- La clepsydre est une horloge à eau constitué d'un réservoir gradué présentant un petit orifice.
- La clepsydre n'est pas à proprement parler un système de mesure du temps (elle ne date pas en absolu), mais plutôt un «gardien du temps» (timekeeper).
 - Elle mesure le temps écoulé à partir d'une date donnée à l'instar d'un sablier ou d'un chronomètre.
- Elle a été utilisée dès la haute antiquité pour mesurer l'écoulement du temps.
- Elle trouve toute son utilité quand l'absence de soleil ne permet pas une datation astronomique.

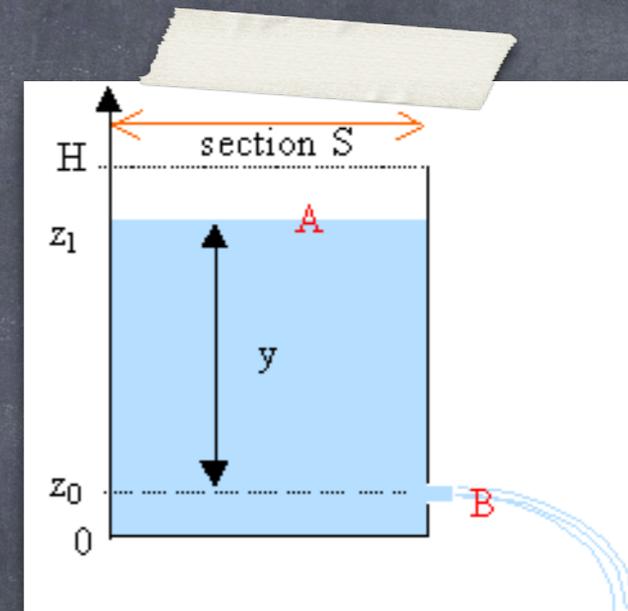
La Clepsydre

- Les clepsydre antiques les plus simples se présentent sous la forme de vases présentant un petit orifice par lequel l'eau s'écoule.
- Les vases antiques présentent une forme évasée.
 - Est-on capable de comprendre pourquoi?



La Clepsydre Modélisation

- Le vase cylindrique
 - S section du vase
 - s section du trou
 - $s/S \ll 1$
 - Trouver l'évolution de y en fonction du temps



C'est le problème du vase de Torricelli !

En supposant, le fluide incompressible, sans viscosité et l'écoulement dans l'orifice laminaire. Il est alors possible d'appliquer le théorème de Bernoulli

Ecrivons la conservation de la quantité de matière en A et B

$$Sv_A = sv_B$$

Ecrivons alors la relation de Bernoulli

$$p_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 + \rho g z_0 = p_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 + \rho g z_1$$

avec $z_1 = y + z_0$ et $p_A = p_B = p_0$

$$\frac{1}{2}v_B^2 + g z_0 = \frac{1}{2}\left(\frac{s}{S}\right)^2 v_B^2 + g z_0 + g y$$

$$v_B^2 = \frac{2gy}{1 - \left(\frac{s}{S}\right)^2} \simeq 2gy$$

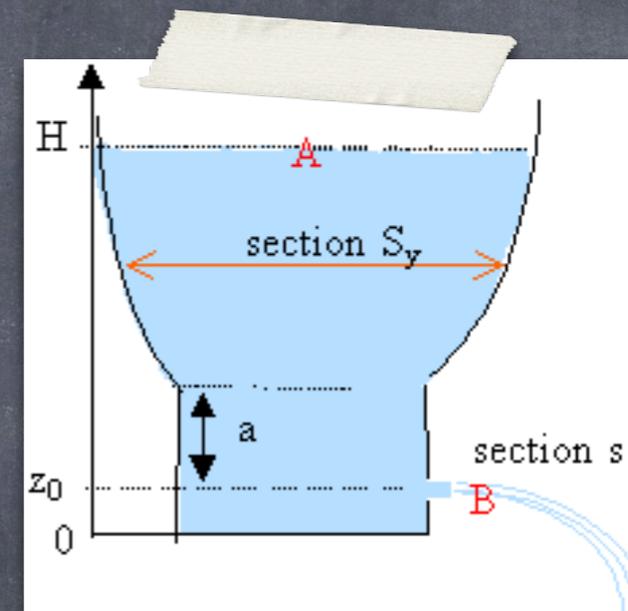
soit $v_A = \sqrt{2gy} \frac{s}{S} = -\frac{dy}{dt}$

On a alors $\frac{dy}{y^{\frac{1}{2}}} = -\sqrt{2g} \frac{s}{S} dt$ soit $\left[2y^{\frac{1}{2}}\right]_{z_1 - z_0}^y = -\sqrt{2g} \frac{s}{S} t$

$\Rightarrow y^{\frac{1}{2}} = -\sqrt{\frac{g}{2}} \frac{s}{S} t - (z_1 - z_0)^{\frac{1}{2}}$
 Les graduations sur le cylindre ne seront donc pas uniformément espacées en fonction du temps écoulé

La Clepsydre : Modélisation

- La Clepsydre antique
 - $S(y)$ section du vase
 - s section du trou
 - $s/S \ll 1$
 - Trouver la forme du vase pour avoir une graduation uniforme en fonction du temps dans la partie du vase comprise entre z_1 et z_0+a



Nous avons vu précédemment que la vitesse de descente du liquide dans le vase était donnée par

$$v_A^2 = 2gy \left(\frac{s}{S}\right)^2$$

Si on souhaite que cette vitesse soit constante, il faut alors réaliser

$$S_y^2 \propto y$$

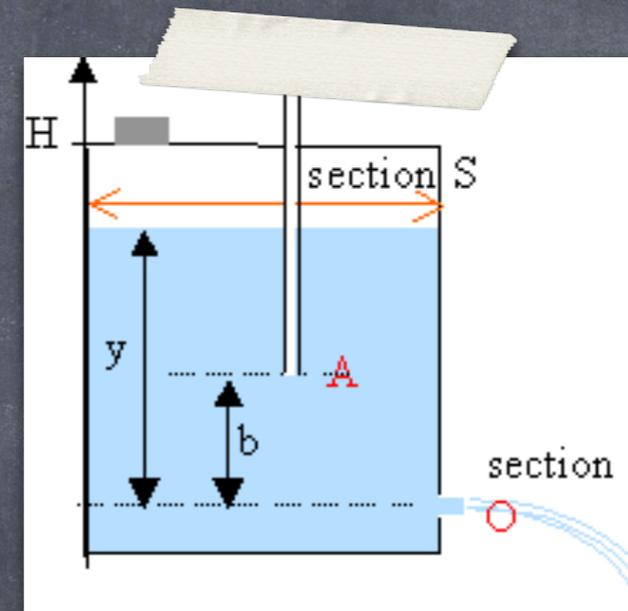
Soit donner à la partie évasée du vase la forme d'une surface de révolution construite sur une génératrice d'équation générale

$$y = Kr^4$$

La Clepsydre : Modélisation

Le cylindrique amélioré (version vase de Mariotte)

- Le cylindre est fermé par un bouchon hermétique
- A sa fermeture le cylindre contient un peu d'air.
- Un petit tube met en contact l'extérieur et le liquide à la profondeur b au dessus de z_0 .
- Décrire l'écoulement du liquide en fonction du temps.



Lorsque le liquide commence à s'écouler par l'orifice O , le niveau de l'eau baisse dans le récipient : la pression de l'air situé dans la partie supérieure du récipient, initialement à la pression atmosphérique, va décroître. L'air pénètre dans le petit tube et repousse le liquide jusqu'en A .

$$p_A = p_{atm}$$

On a de plus

$$p_A - p = \rho g (y - b)$$

où p est la pression de l'air dans la partie supérieure du récipient et $\rho g (y - b)$ la masse du liquide au-dessus de A

On a

$$g (y - b) \simeq \frac{p_{atm}}{\rho}$$

En appliquant Torricelli entre A et O , on obtient

$$\frac{1}{2}v_0^2 + gz_0 = \frac{1}{2}v_A^2 + gz_A \quad \text{avec} \quad z_A = y - b + z_0$$

$$\text{Ce qui conduit à} \quad \frac{1}{2}v_0^2 = \frac{1}{2}v_A^2 + g(y - b)$$

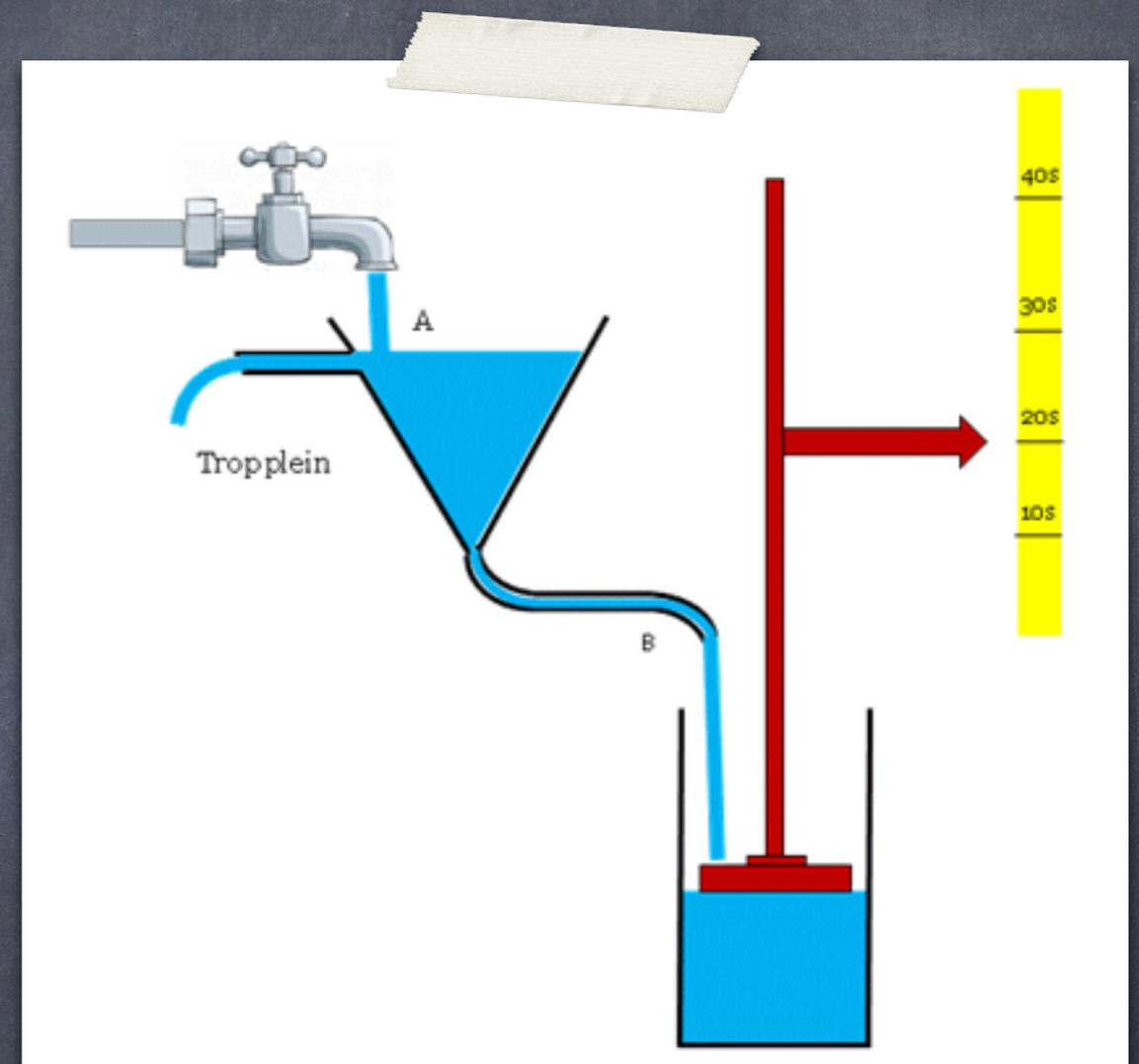
$$\text{soit} \quad \frac{1}{2}v_0^2 = \frac{1}{2}v_A^2 + \frac{p_{atm}}{\rho}$$

La conservation du débit donne $v_A S = v_0 s$

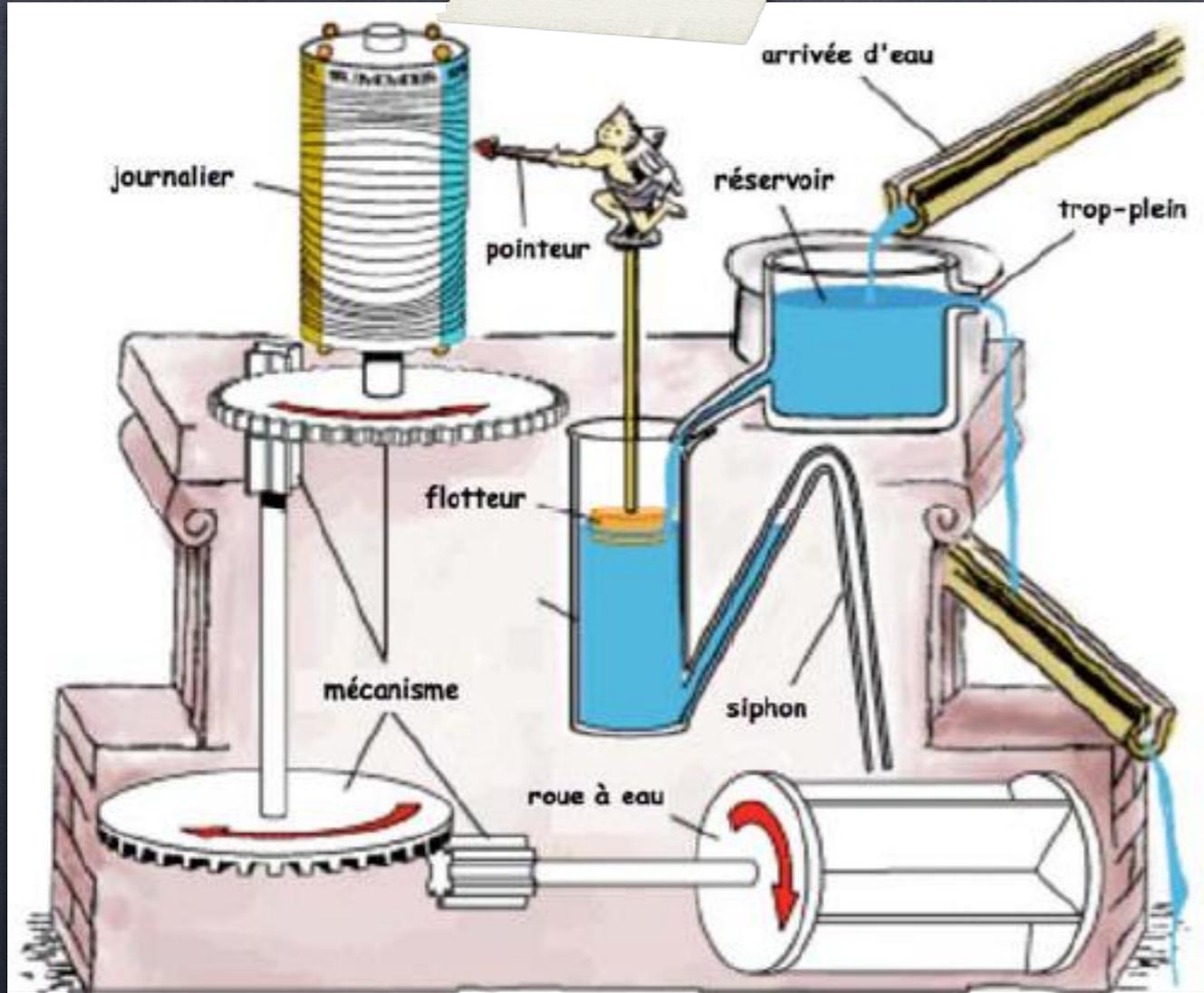
$$\text{On a alors} \quad v_A^2 = \frac{2p_{atm}}{\rho \left(\left(\frac{s}{S} \right)^2 - 1 \right)} \Rightarrow v_A = Cste \Rightarrow y \propto t$$

La Clepsydre : Modélisation

- La Clepsydre grecque
 - En quoi ce système résout-il le problème posé aux égyptiens?



Des Clepsydras «modernes»



La Clepsydre

- Limitation d'utilisation
 - L'écoulement de l'eau produit un dépôt de tartre et d'impuretés qui obstrue peu à peu l'orifice
 - L'écoulement dépend fortement des conditions d'utilisation
 - En hiver, l'eau peut geler...



Le sablier

- Il apparaît autour du X^{ème} siècle.
 - Il est basé comme pour la Clepsydre sur l'écoulement d'un matériau, mais l'eau est remplacée par le sable.
 - Utilisé pour les petites durées
 - Instrument de mesure du temps le plus répandu au XIV^{ème} et XV^{ème} siècle
 - Utilisé à l'origine dans la cuisine, il devient l'outil indispensable à la navigation lointaine.



Le sablier

- Pour le physicien, le sablier est-il une Clepsydre à sable?

- Constat :

- Le débit du sablier est indépendant du temps et donc de la quantité de sable au dessus de l'orifice.
- La hauteur de sable ne joue pas sur la vitesse.

- La physique du tas de sable...

- Le sable n'est pas un fluide mais un matériau granulaire.

- Expérience de pensée :

- Un cylindre rempli d'eau dont on retire brusquement les parois :

- Toutes les molécules d'eau se mettent en mouvement, il reste une flaque...

- La même expérience avec du sable sec

- Il reste un tas de sable, toutes les grains de sable ne se sont pas mis en mouvement

Le sablier

- La modélisation du sablier est complexe et demande de connaître les interactions grain à grain.
- Cependant, il est tout de même possible d'estimer le débit du sablier ! C'est la loi de Beverloo
 - Analyse dimensionnelle du problème
 - Interprétation

Bilan des variables du problème

Débit D en $m^3 \cdot s^{-1}$

Accélération de la pesanteur g en $m \cdot s^{-2}$

Rayon du trou R en m

Dimension temporelle :

Une seule possibilité $D \propto \sqrt{g}$

Donc nécessairement $D \propto \sqrt{g} \times [L]^{\frac{5}{2}}$

Ce qui conduit à

$$D \propto \sqrt{g} R^{\frac{5}{2}} = \sqrt{gR} \times R^2$$

La loi de Beverloo

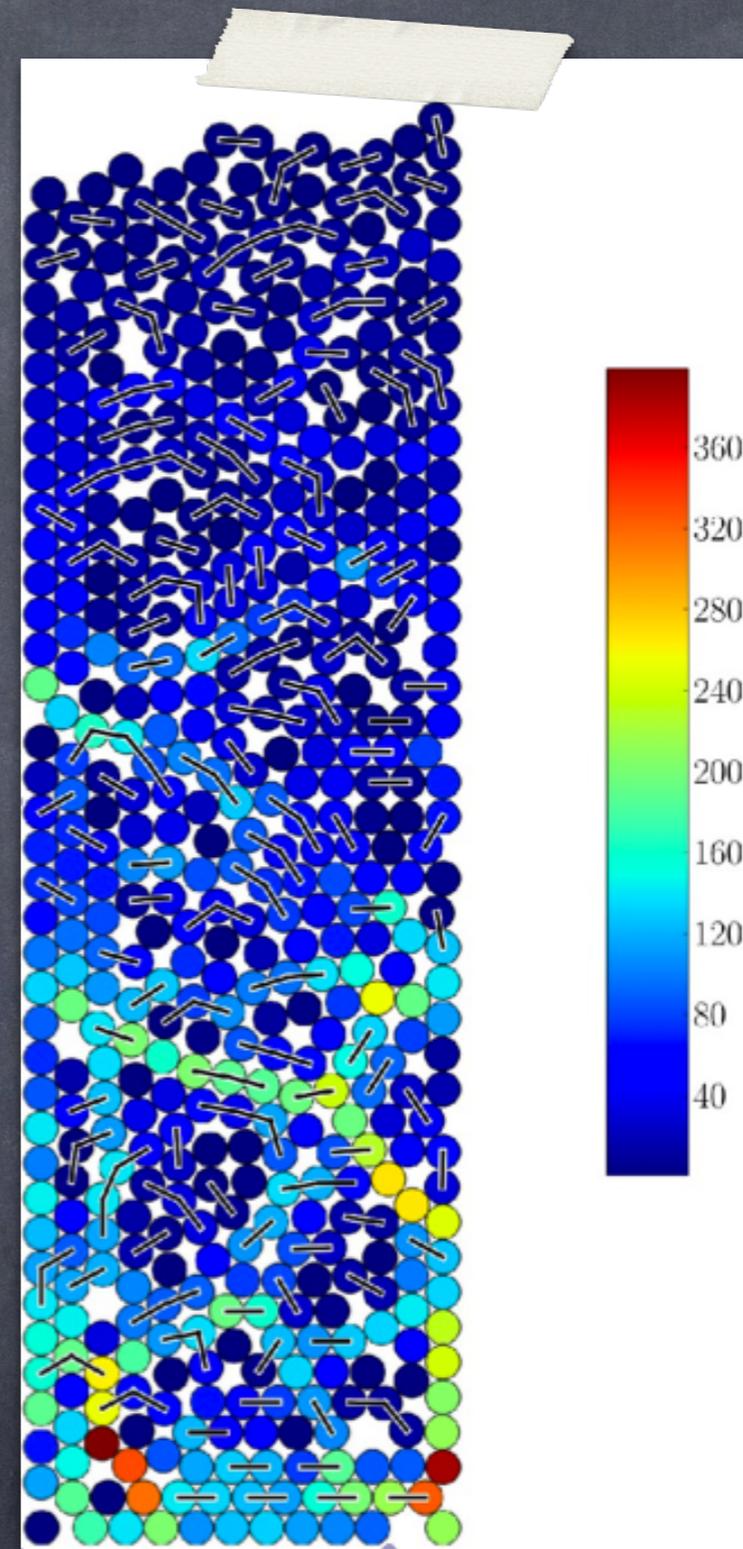
Interprétation de la loi de Beverloo

L'écriture de droite montre que c'est le résultat que l'on obtiendrait pour Torricelli avec une hauteur d'eau égale à R

Tout se passe donc comme si seul le sable situé dans le volume de hauteur égale au diamètre du trou exerçait une pression sur les grains lors de l'écoulement, ceci quelle que soit la quantité de grains au-dessus de l'orifice.

Le sablier

- Théorie des arches granulaires
 - Lors de l'écoulement les grains s'organisent en arches qui reportent la pression sur les parois du récipient neutralisant ainsi la composante verticale de la pression
 - La pression au bas de l'écoulement reste relativement faible
 - Il y a écrantage (écrantage de Janssen)
 - L'écoulement devient donc indépendant de la quantité de sable au-dessus du point d'écoulement



La combustion pour mesurer le temps...

- Horloges à encens
 - Chine VI^{ème} siècle avant JC jusqu'au XVII^{ème} siècle
 - L'encens brûle à vitesse fixe
- Horloges à bougie
 - Les graduations sur la bougie indiquent le temps écoulé
- Lampes à Huile
 - La combustion de l'huile fait baisser le niveau dans

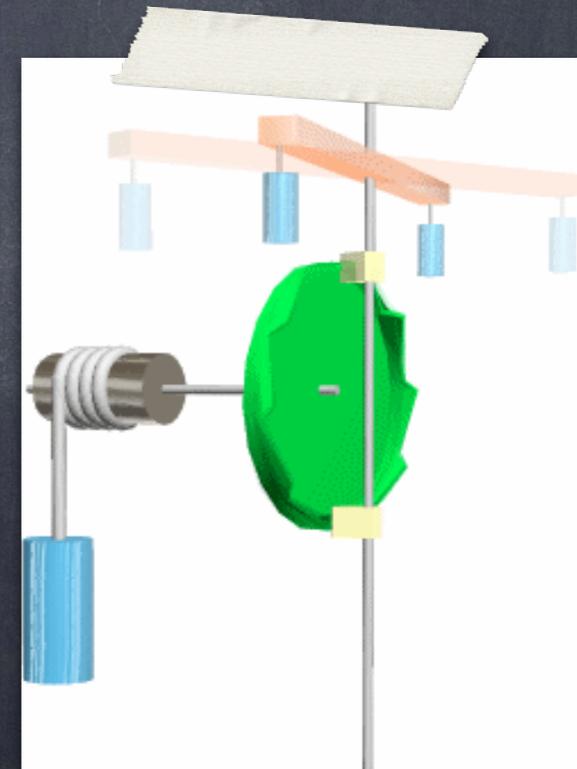
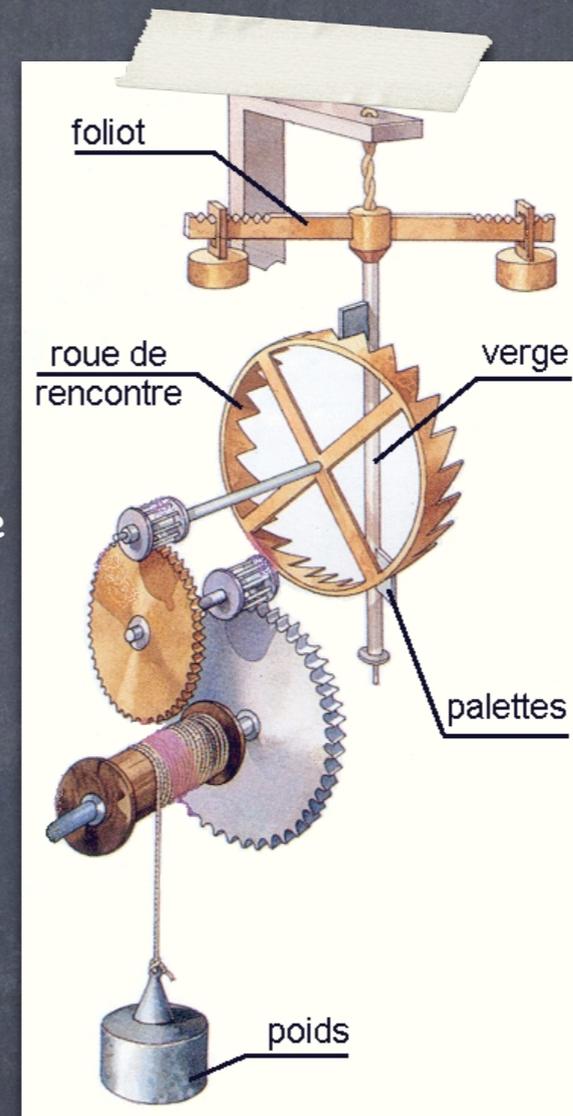


Les horloges mécaniques

- Premières horloges mécaniques datent du XIII^{ème} siècle.
 - Leur «moteur» est constitué par la chute d'un poids associé à un système d'engrenages.
 - La faiblesse du système réside dans le fait que le poids accélère dans sa chute rendant le mouvement irrégulier.
 - Un système de régulation de la chute du poids est nécessaire.
- L'apparition des horloges a marqué une transition dans la conception de la notion de temps.
 - On passe d'une conception cyclique du temps à une conception linéaire (avec un début et une fin... et un sens)

Horloge à Foliot

- Premières horloges mécaniques
 - Le système de régulation de la chute du poids est dit à Foliot
 - Le système de palettes et de roue de rencontre conduisent à une chute de poids par à coups.
- La précision d'un tel système est toute relative
- Cependant cette invention se répand rapidement chaque ville faisant construire son horloge conduisant à l'abandon progressif de l'heure solaire.

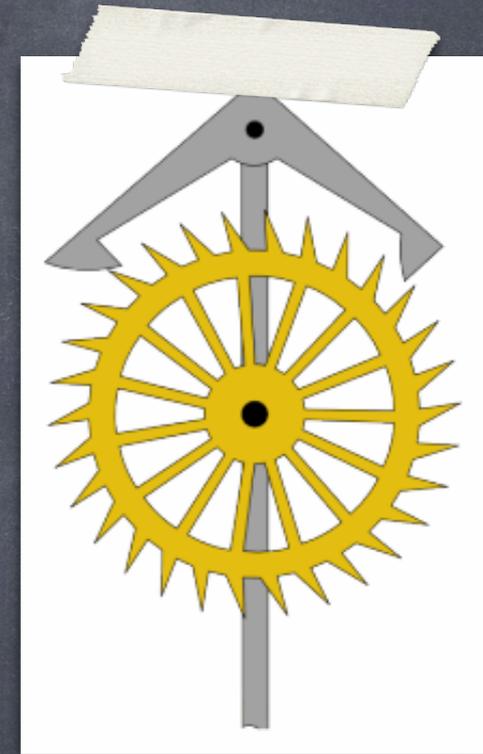
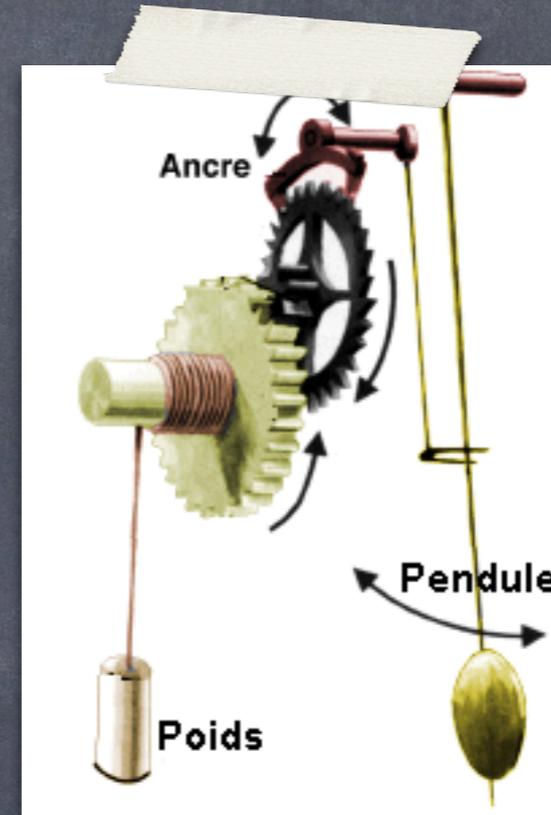
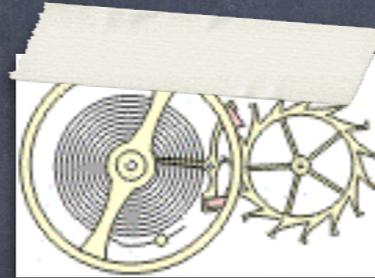


Horloge à pendule

- Galilée (1564-1642)
 - Isochronisme des oscillation du pendule
 - Problème ne marche qu'aux petits angles...
 - Or le mécanisme d'échappement à roue de rencontre impose des oscillations de grande amplitude
- Huygens (1629-1695)
 - Comprend le problème et commence par imposer au pendule de décrire non plus un mouvement circulaire mais de suivre une cycloïde, ce qui rend le mouvement réellement harmonique. (1656)
 - La seconde amélioration viendra de l'abandon du système d'échappement à roue de rencontre, remplacé par un système d'échappement à ancre permettant au pendule de fonctionner dans un régime de petites oscillations. (1671)

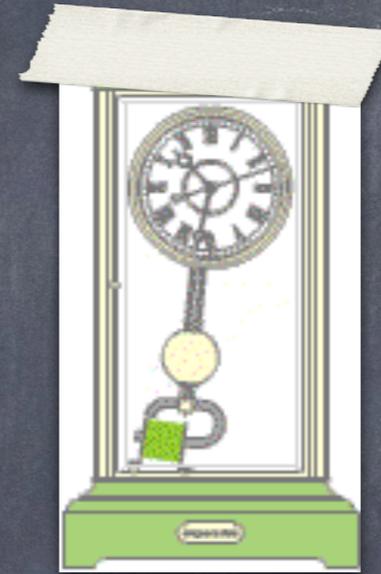
L'horloge à pendule

- Perte de seulement 1 s/ jour !
- Huygens inventera aussi le ressort spiral qui sera au centre de l'horlogerie mécanique «moderne»



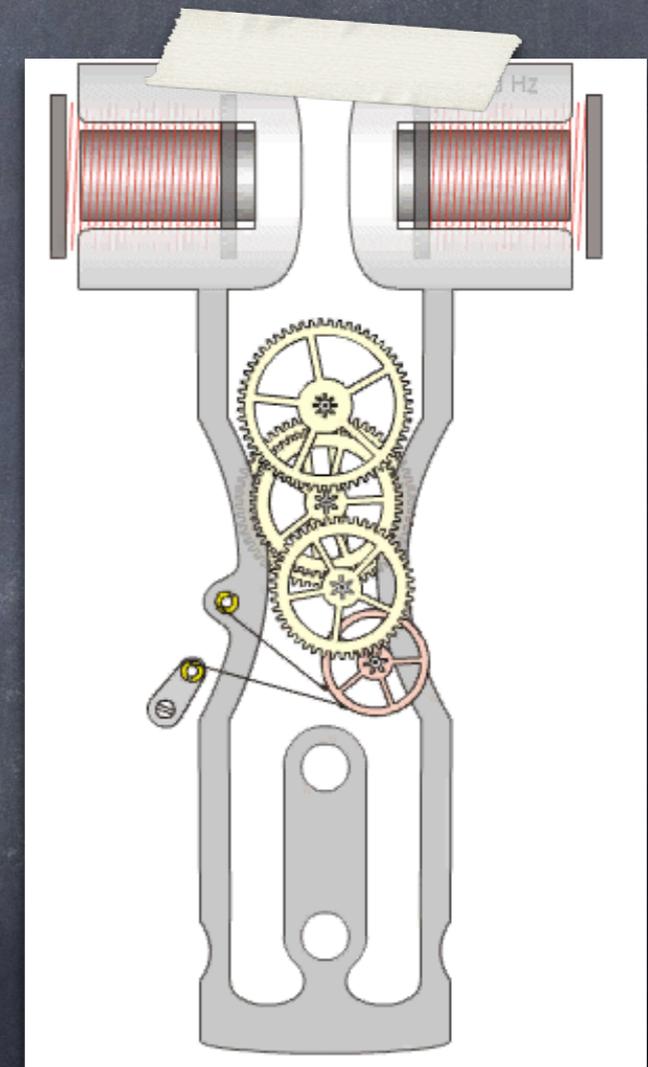
Horloge électrique

- L'électricité devient la source d'énergie du système.
 - La régulation se fait à travers l'utilisation d'électroaimants qui entretiennent le mouvement périodique.



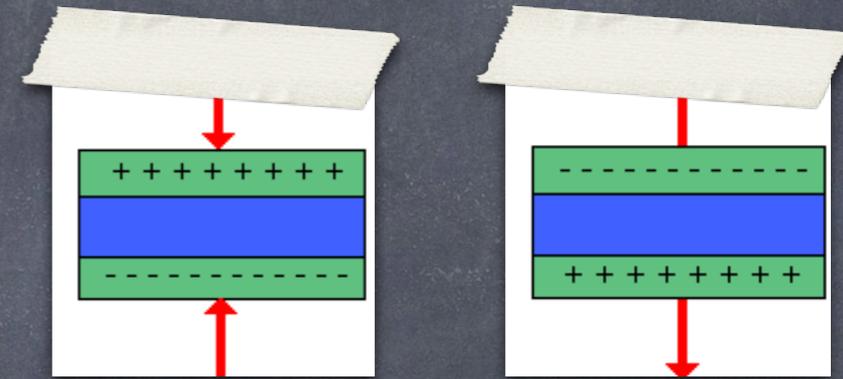
- **Montre à diapason électrique**

- La mesure du temps est donnée par l'utilisation d'un système oscillant
- Plus l'oscillateur est à haute fréquence plus la précision de la mesure sera grande.



Oscillateur à quartz

- Ce type d'oscillateur est basée sur les propriétés piezo-électrique du cristal de quartz
 - Une déformation du cristal conduit à l'apparition d'une polarisation électrique entre les faces du cristal (Effet piezo-électrique direct)
 - Inversement, en présence d'une tension électrique le cristal se déforme (effet piezo-électrique indirect).
 - La combinaison des deux va permettre de faire osciller le système.
 - L'effet est faible sauf à certaines fréquences dites fréquences de résonance. Ces fréquences dépendent de la taille du cristal et de sa taille (dimension et coupe).
 - Il s'agit alors de sélectionner une fréquence



Horloge à quartz

- Le résonateur oscille
 - $F=32768\text{MHz}$
 - Le signal électrique est produit à cette fréquence
 - On divise la fréquence autant qu'il faut
 - Précision 10^{-4}s/jour
- Cependant,
 - La fréquence d'oscillation dépend de la géométrie du cristal et de ses éventuelles déformations (dépendance à la température en particulier)
 - On constate un vieillissement des cristaux et une dérive de la fréquence de résonance
 - Il est difficile de produire des cristaux strictement identiques et donc d'avoir une définition universelle du temps.

Horloges

- Bien qu'elles donnent l'heure, comme les Clepsydras et les Sabliers les horloges ne sont pas à proprement parler des instruments de mesure du temps mais des garde temps...
- Seule l'observation astronomique donne vraiment une mesure du temps...

Le temps astronomique 2

- Les astronomes sont restés les gardiens du temps jusqu'en 1967
- Cependant depuis le 19^{ème} siècle, des premiers doutes apparaissent au sujet de la régularité du mouvement Terrestre
 - Ce n'est pas un corps rigide, il y a dissipation d'énergie
 - Il y a donc ralentissement
- 1933 : mise en évidence des irrégularités terrestres (ms sur plusieurs mois en comparaison avec des oscillateurs à quartz)
- Quelle doit donc être la référence de temps (stable et universelle)?

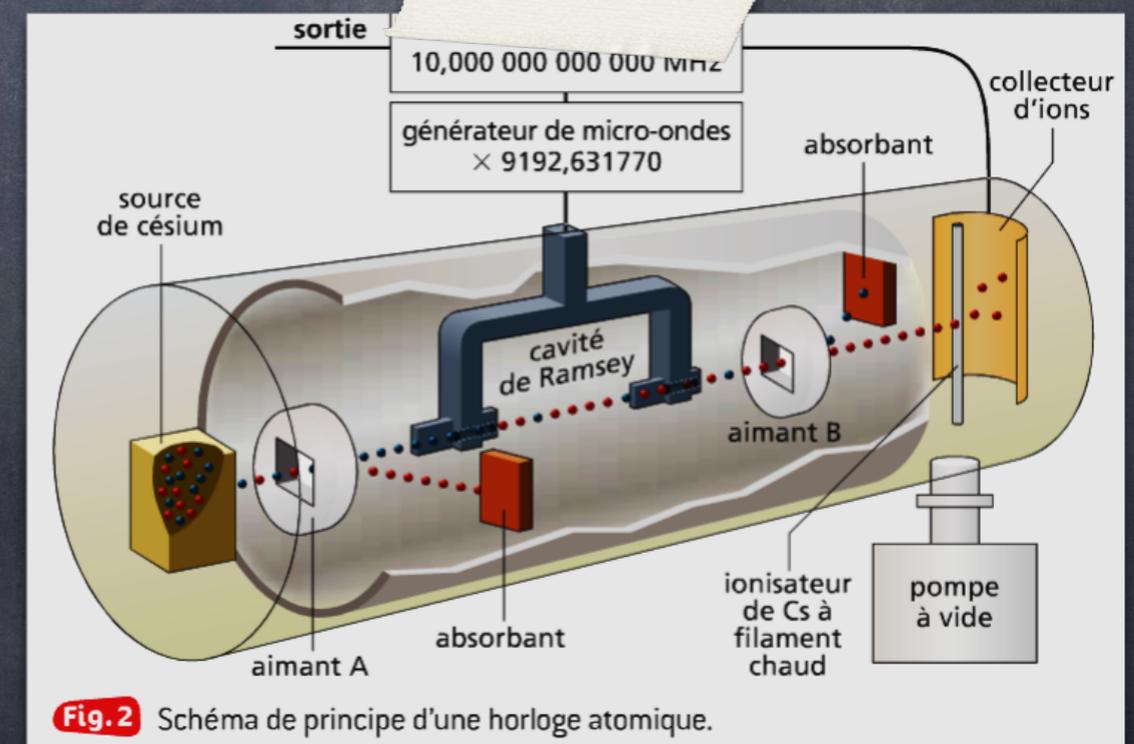
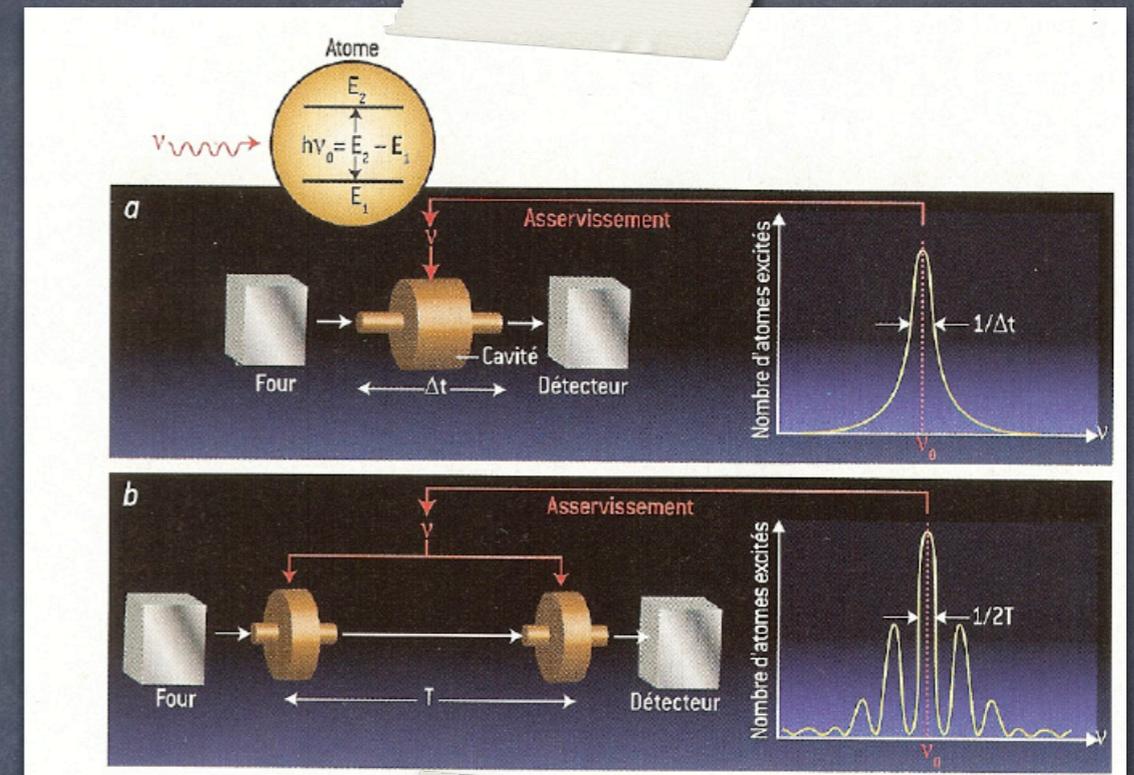
L'horloge atomique

- Haute fréquence d'oscillation et universalité...
- Le candidat tout trouvé : l'atome.
- Depuis 1967, la seconde est définie de la façon suivante :
 - «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 électronique fondamental du césium 133»
- Le mouvement terrestre n'est plus la référence de temps.

Horloge atomique

Principe

- Un four produit un jet de césium
- Le césium est un système à deux niveaux donc deux spins différents
- Un premier aimant sélectionne un état de spin (l'état inférieur)
- On fait traverser une cavité Ramsey aux atomes sélectionnés
- Certains changent d'état
- Un second aimant sélectionne l'état de spin du niveau supérieur
- On mesure le nombre de détections
- On corrige la largeur de la cavité



On a donc régulé la fréquence de l'oscillateur

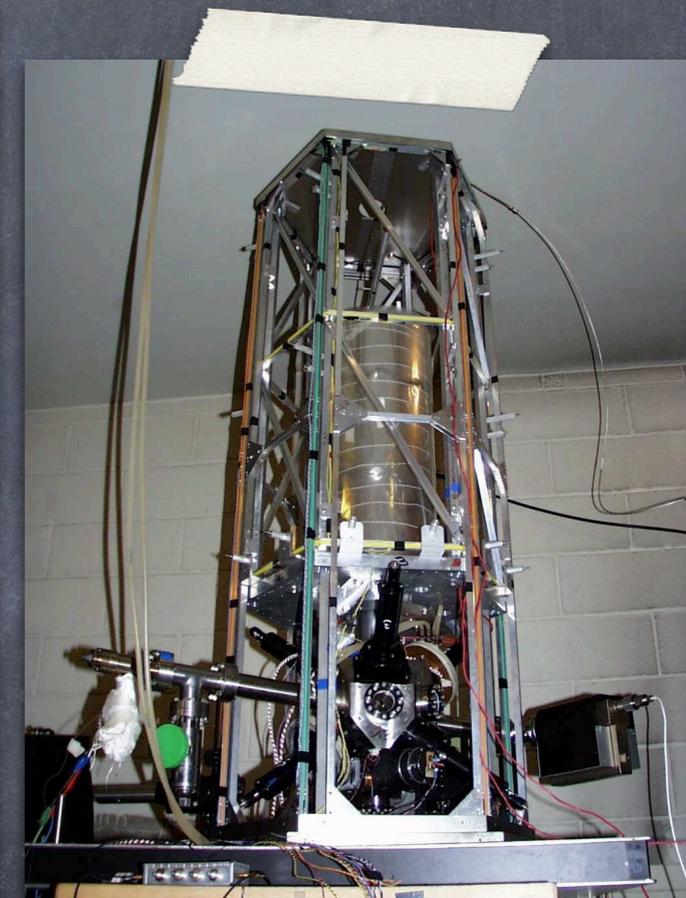
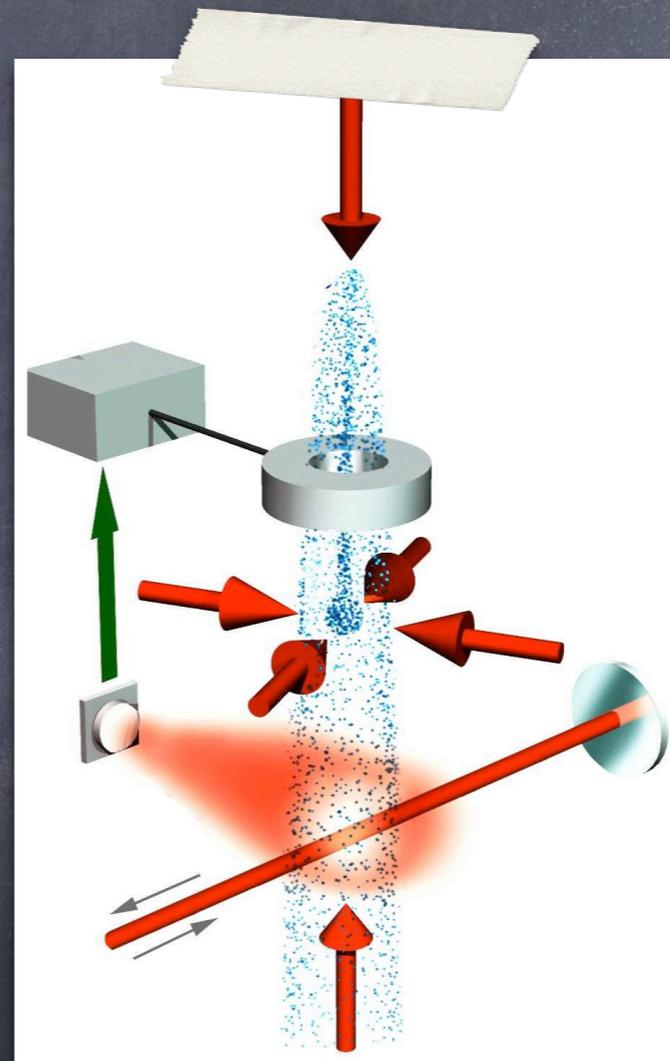
Horloge atomique

- La précision de la mesure dépend du temps d'analyse.
 - La précision de la première horloge atomique était de 10^{-5} s/jour
 - Plus l'atome passe de temps dans le faisceau analyseur mieux son état est déterminé (les franges de Ramsey sont plus étroites)
 - Le temps passé dans le faisceau d'analyse dépend de l'agitation thermique.
 - Il faut donc refroidir...
 - à 10^{-6} K, l'agitation thermique produit une vitesse de $7\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
 - Le temps d'interaction avec le faisceau analyseur approche alors la seconde!
 - On arrive alors à une précision de 10^{-7} s/jour
- Peut-on faire mieux?

La fontaine à Césium

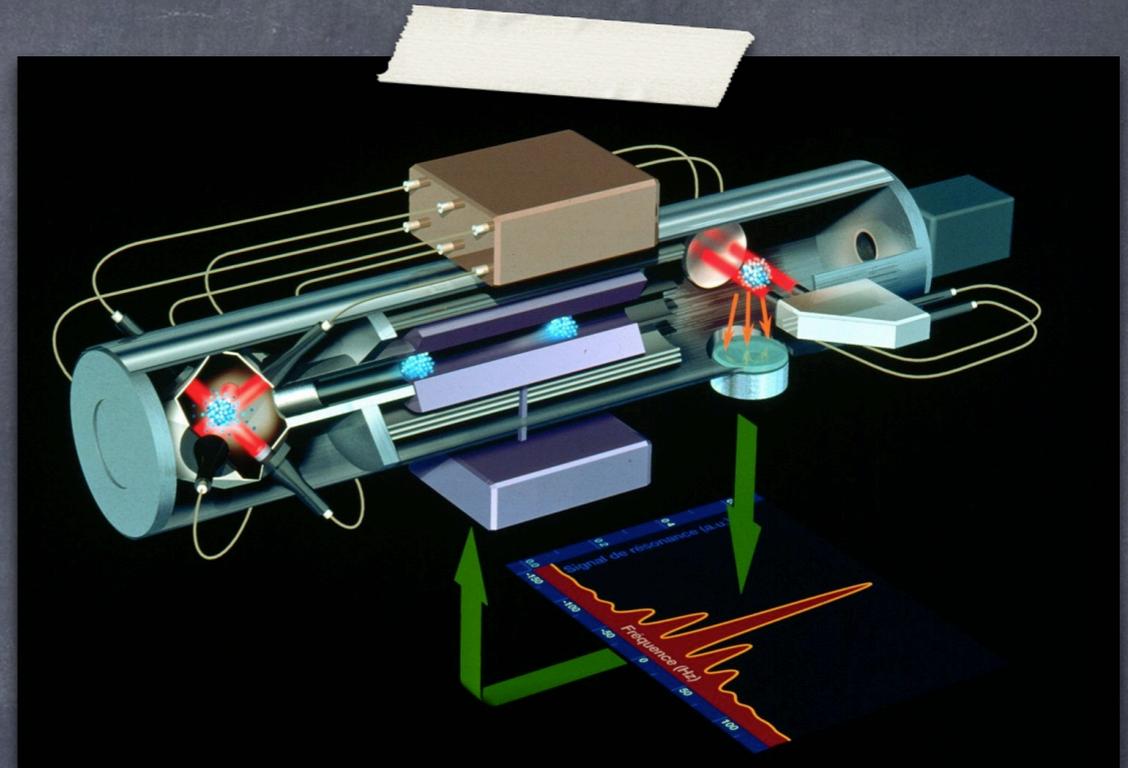
Principe

- Lancer les atomes de Césium à faible vitesse vers le haut dans le faisceau d'analyse et attendre qu'ils retombent...
- C'est la gravité qui permet d'augmenter le temps d'interaction dans le faisceau
- C'est le temps entre les deux passages dans la cavité excitatrice qui donne la finesse intrinsèque des franges Ramsey.
- Il faut donc envoyer les atomes le plus haut possible

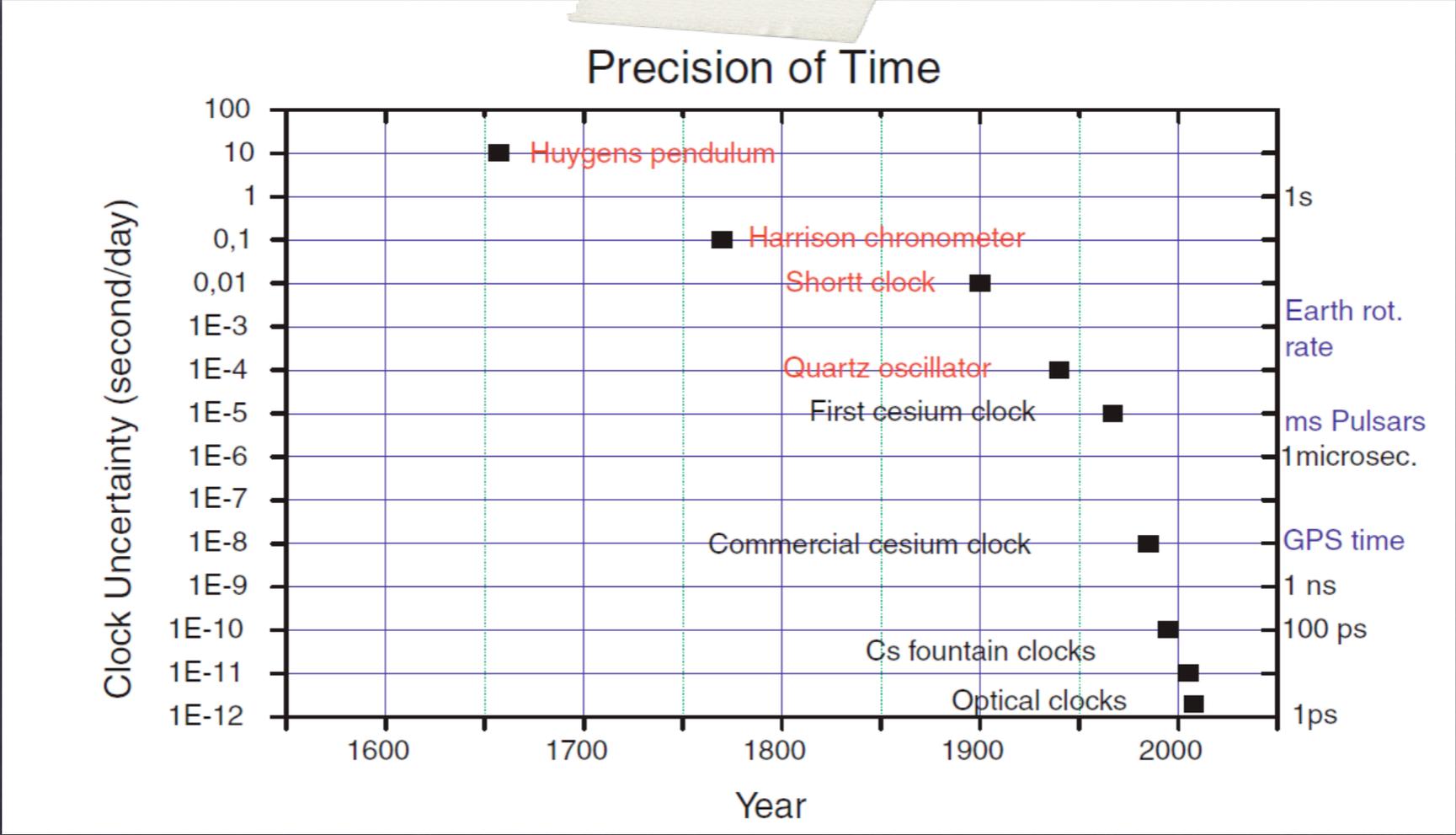


La fontaine à Césium

- Pour passer plus de temps entre les cavités pourquoi ne pas éliminer la gravitation...
- PHARAO projet d'horloge atomique embarquée dans la station orbitale.



Evolution de la précision avec le temps

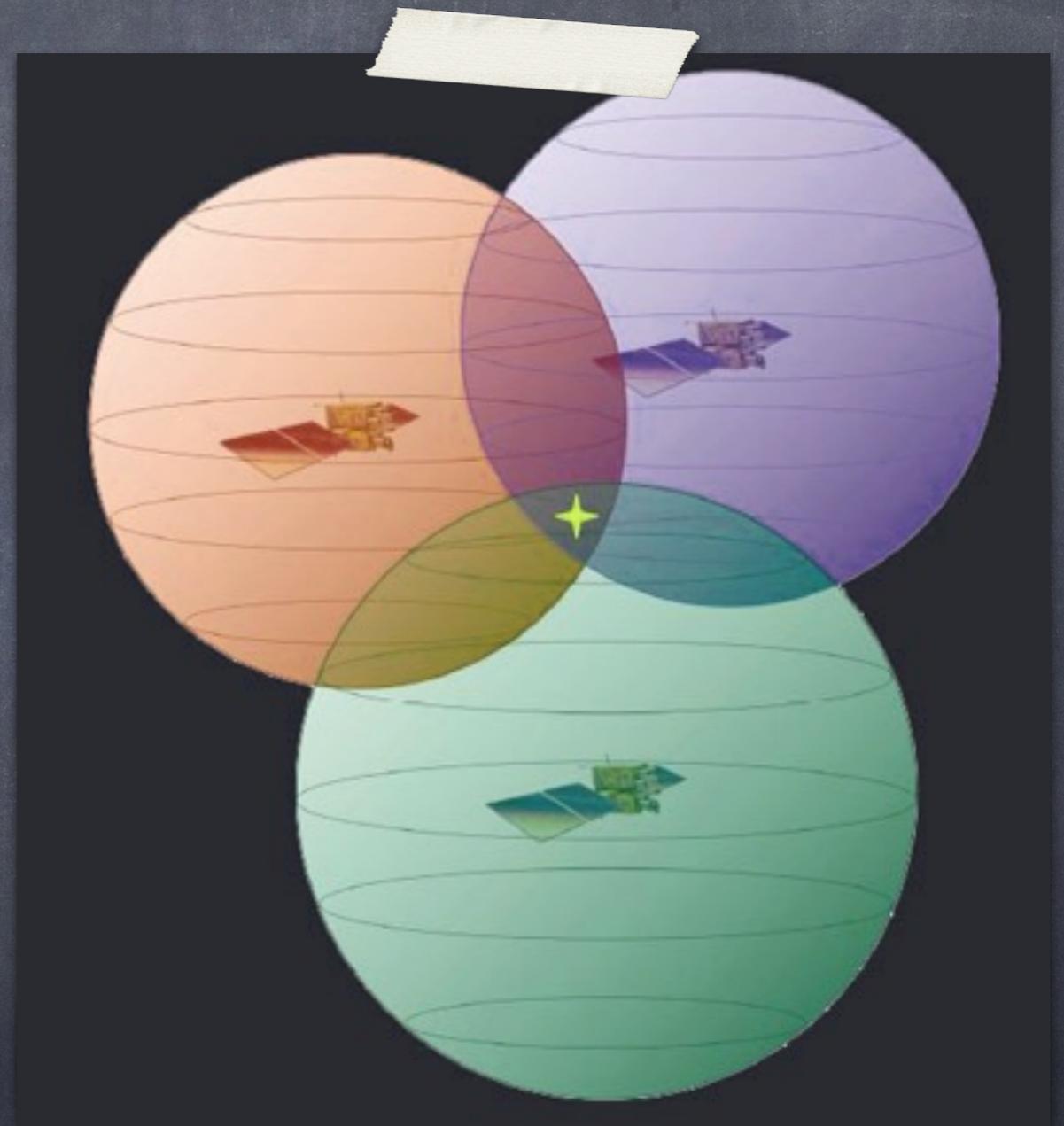
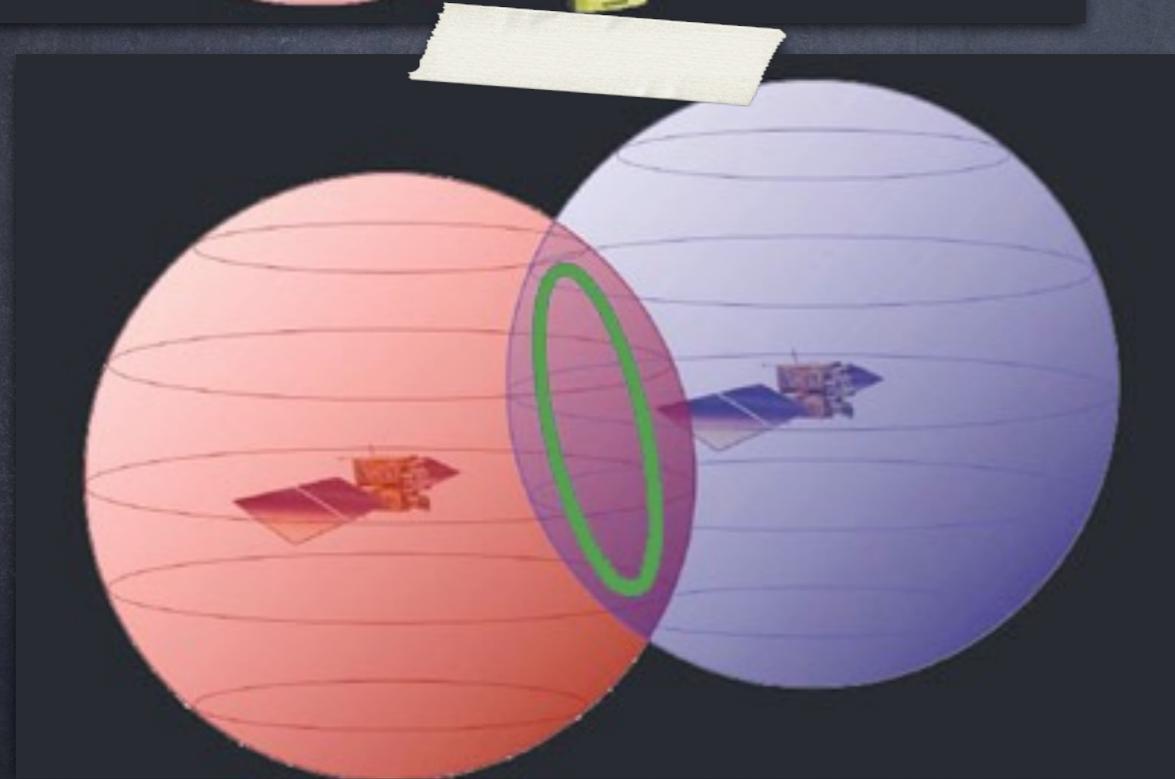
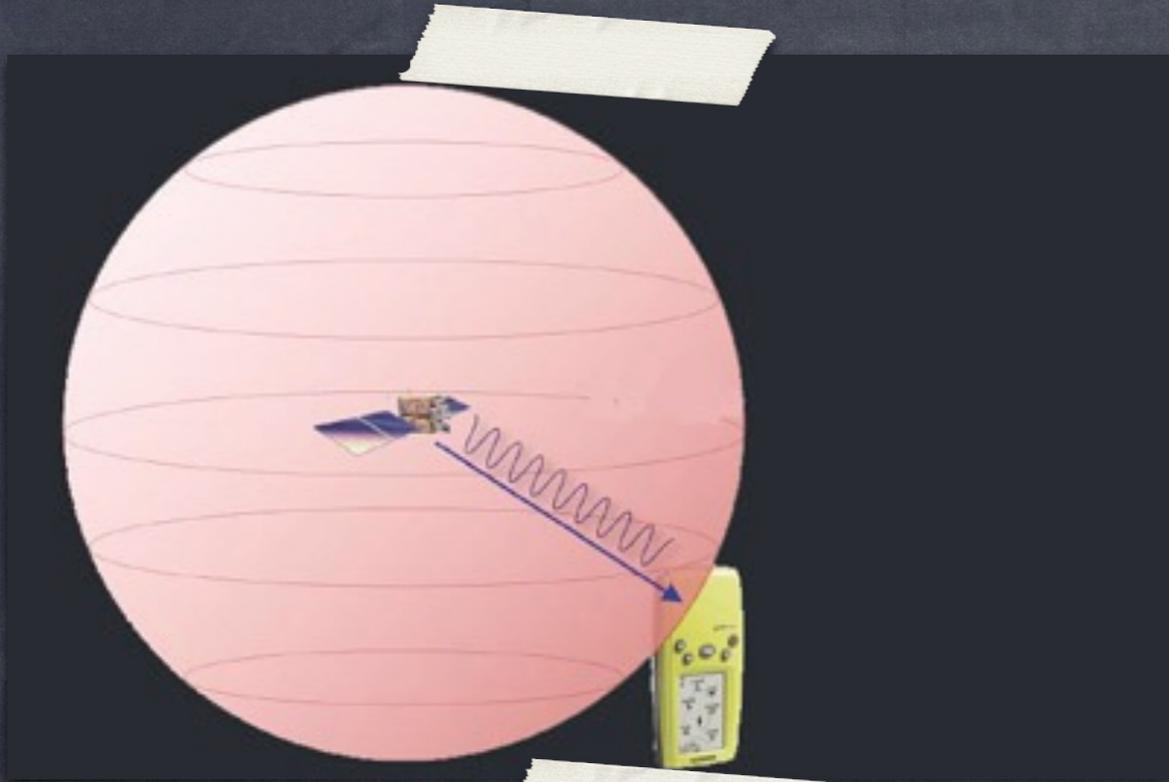


GPS

- 24 Satellites NAVSTAR placés sur 6 orbites circulaire
- Altitude 20184 Km
 - 1 orbite en 12h
- Position connue à mieux qu'1m
- Chaque satellite possède plusieurs horloges atomiques et passe une partie de son temps à vérifier qu'il est à l'heure...

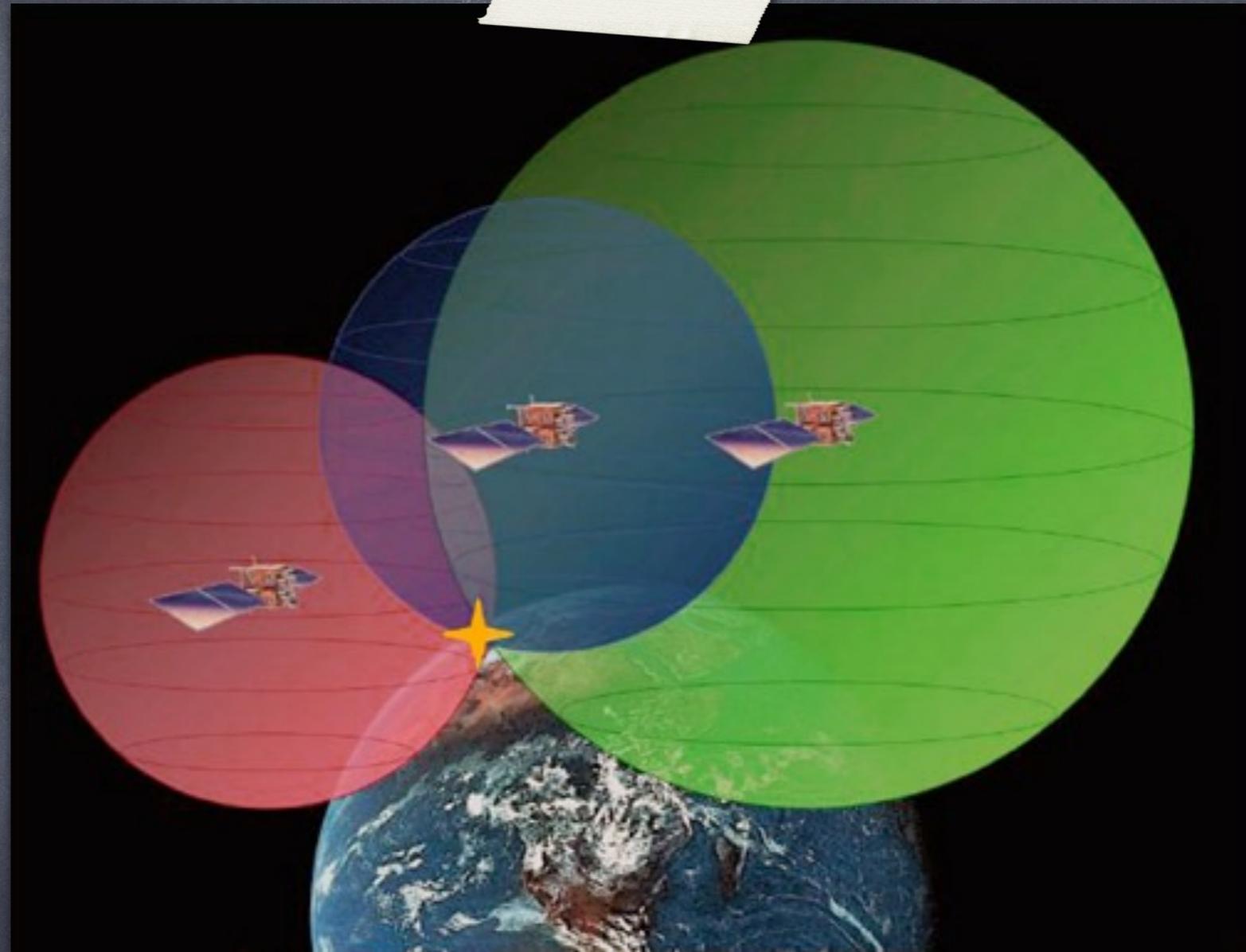


GPS



GPS

- Il faut au moins 4 satellites pour déterminer la position et le temps



Construction du temps

- Qui est le gardien du temps ?



Fort Boyard $45^{\circ} 59' 59''$ N $1^{\circ} 12' 50''$ W

Ce n'est pas lui, mais il ne réside pas loin...



Le Bureau International des Poids et Mesures
ou BIPM

(Pavillon de Breteuil $48^{\circ} 49' 45.56''$ N $2^{\circ} 13' 12.62''$ E
dans le parc de Saint-Cloud près de Paris)

Construction du temps

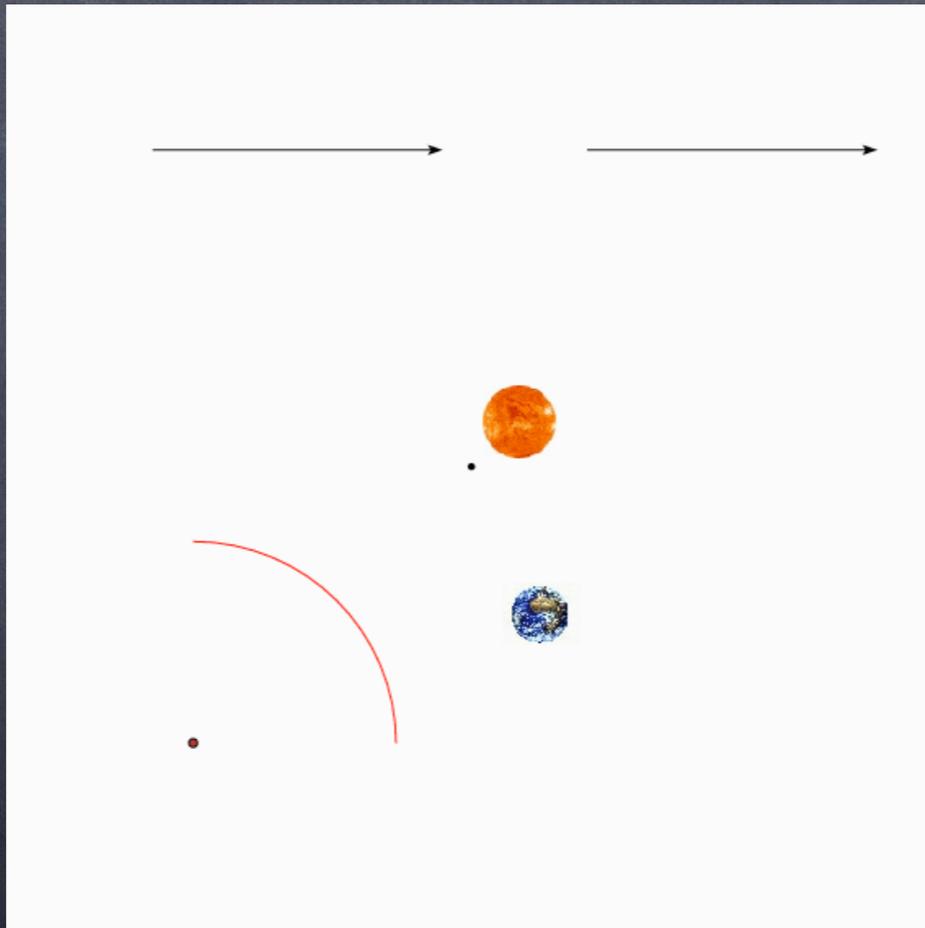
- Le BIPM construit le temps atomique international (TAI) à partir des 349 meilleures horloges atomiques réparties dans le monde.
- Ce temps atomique est régulier et ne décrit pas l'irrégularité du mouvement de la Terre (et son ralentissement)
 - Il y a donc une dérive du temps atomique par rapport au temps astronomique.
 - Si TAI était l'échelle de temps utilisée pour définir l'heure, à la longue il y aurait un décalage entre le midi astronomique et le midi atomique.
 - L'échelle de temps internationale est UTC (Temps Coordonné Universel) (a remplacé GMT) cette échelle donne un temps «astronomique moyen» construit à partir de TAI.
 - Deux fois par an (Janvier et Juin) le BIPM calcule l'écart entre les deux échelles si cet écart est supérieur à 1/2 seconde une seconde intercalaire est ajoutée à TAI pour former UTC (publication dans la circulaire T du BIPM).

Quelques problèmes de mesure de temps

UTC est-elle suffisante ?

- Problème : Soit un pulsar (prenons celui du Crabe $D=2\text{kpc}$) émettant un rayonnement périodique (à la manière d'un phare). Que dire de la périodicité apparente du signal détecté sur Terre pour une observation courant sur toute une année?

Les notions de référentiel pour la datation n'ont pas encore été abordées



Dans ce cas, il faut utiliser une autre échelle de temps.

TDB Temps Dynamique Barycentré.

Les dates d'arrivée terrestres des flashes lumineux doivent être «transportées au barycentre du système solaire»

Ce n'est que dans ces conditions que l'on observera une distribution temporelle des événements conforme à celle produite au niveau de la source de rayonnement.

Le temps des particules

- La durée de vie moyenne de la résonance Δ^{++} (uuu) est de
 $(5,63 \pm 0,14) \times 10^{-24} \text{ s}$
- Comment peut-on mesurer un temps aussi court ?

On a $\Delta E \Delta t = \hbar$ avec $\Delta E = 1232 \pm 2 \text{ MeV}$ et $\hbar = 1,05457173 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Mesurer l'âge de l'Univers

- Comment mesurer un temps aussi long que 13,6 milliards d'années...

Références

• Mesure du temps

- http://www.lgtbaimbridge.fr/SSI/CIT_mesure_du_temps/export/
- https://www.canal-u.tv/video/cerimes/la_mesure_du_temps.14102
- <http://www.bipm.org>
- [La mesure du temps au XXIeme siècle, Christophe Salomon, www.bourbaphy.fr/salomon.pdf](http://www.bourbaphy.fr/salomon.pdf)

• Sablier

- <http://sciencetonnante.wordpress.com/2013/06/10/quelle-est-la-difference-entre-une-clepsydre-et-un-sablier/>
- <http://www.lmm.jussieu.fr/~lagree/mudeI/>
- <http://fr.slideshare.net/sterengiannini/tipe-les-milieus-granulaires>