

Pendules et Espace-Temps

Ch1. Le moment Galilée

- découverte de l'isochronisme
- le temps "absolu, mathématique et vrai"

Ch2. La Terre pas si ronde mais bien en mouvement

- les arpenteurs (Picard, La Condamine, Delambre)
- Foucault au Panthéon

Ch3. Pendule de Newton (et Hooke !)

- cinq boules diaboliques
- Loschmidt contre Boltzmann
- du chaos dans les pendules (et ailleurs)

Ch4. Physique ultra-moderne

- Einstein et le pendule de lumière
- Tic-tacs quantiques (horloges atomiques et radioactives, GPS)



Pendule \leftrightarrow Grands thèmes de la Physique

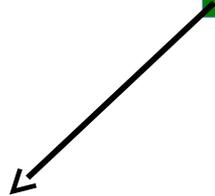
Lois de conservation



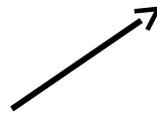
Flèche du temps thermodynamique



Quelles mathématiques?



Statut du temps en Mécanique



Unités et étalons



Chaos déterministe



Cosmogonies d'hier...

**Dieu dit: que la lumière soit, et la lumière fut.
Il y eut un soir, il y eut un matin.
Ce fut le premier "jour"**

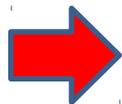
Genèse, chap.1 , v3

Un "soir", un "matin"?

Un "jour"??

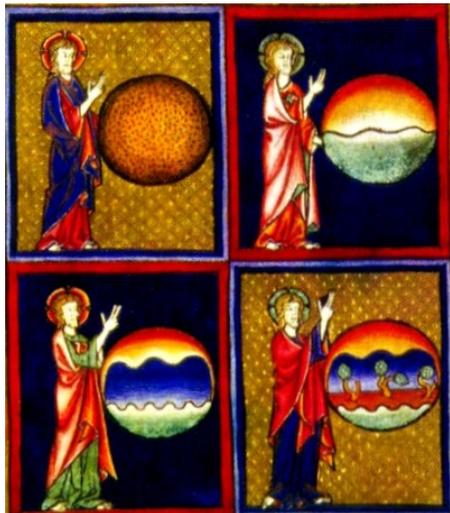


(NB: dans Genèse chap.1 v14-18
le soleil n'est créé qu'au quatrième "jour"...).

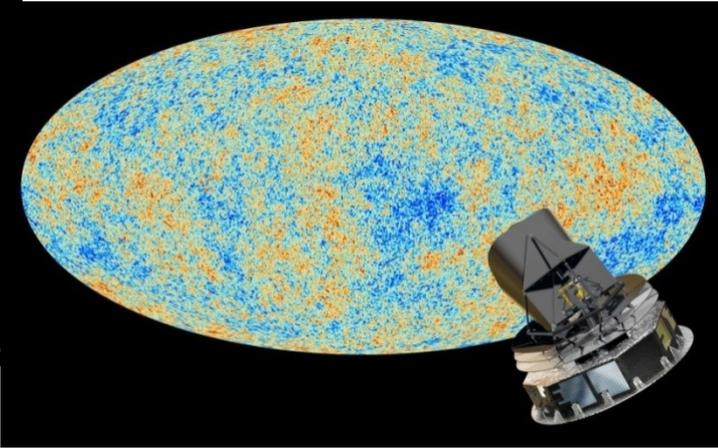
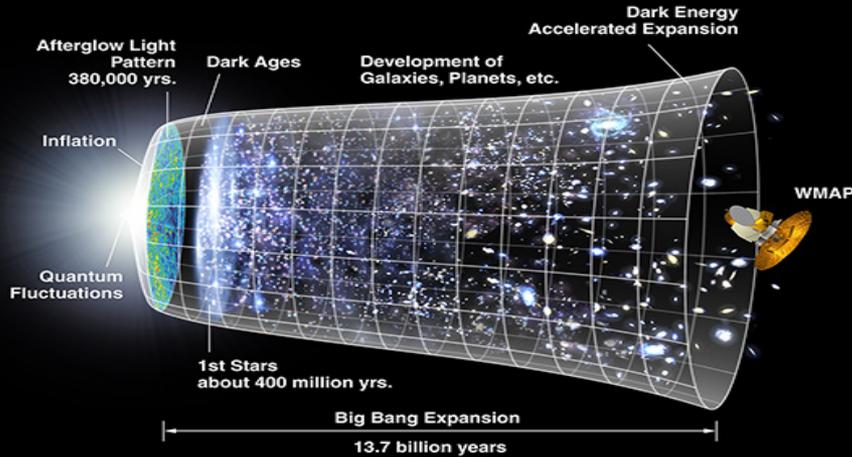


Récits symboliques
(ni historiques* ; ni scientifiques)

(* pas d'historien avant Thucydide, Plin, Hérodote...)



Vision “moderne” ??



NASA/WMAP Science Team

Cosmologie “du Big Bang”:

”Temps de Planck”, ère hadronique, nucléosynthèse etc...
...toutes repérées en fractions de “secondes”.

Emission du fond diffus à 3°K: à $t=“0”+380000$ “ans”

Des secondes! Des minutes... bien avant le premier atome de *césium 133*...

Ces deux “récits des origines” sont-ils tellement *différents* ?
➡ Mêmes schémas mentaux à propos du “ Temps”?

Deux “récits des origines” si *différents*et un *parallèle* troublant:

{ précision extrême sur le scénario du “tout début”
mais... flou certain sur la *date* de l'événement !

* Calendrier juif: 3/10/2016 AC = +5777
→ année de la Création **-3761**

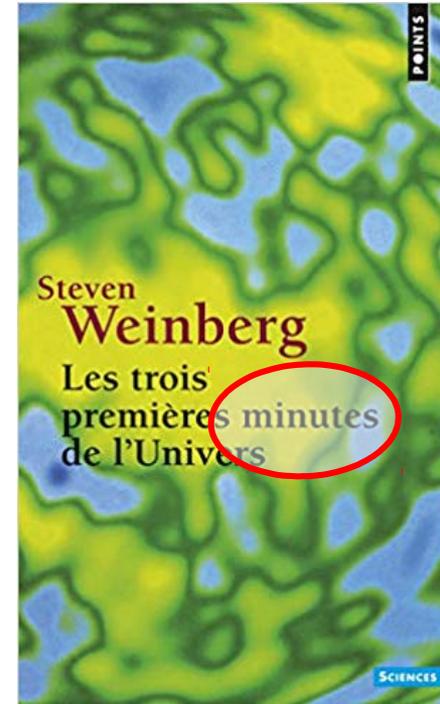
* XVII: LE jour de la Création selon les exégètes anglais=
23/10/**-4004** à 9h du matin (James Usher)
-3929 à 19h20 !! (John Lightfoot)

* XVIII-XIX: **Lyell (1828)**; Darwin (1859); Wegener (1915); Kelvin (**millions**)

* XX: Edwin Hubble (**milliards**)

*1976: S.Weinberg prend $H=15$ km/s/Mpc
→ âge de l'Univers = **20 milliards**....

* Valeur 2019: **13.8 milliards** (modèle Λ -CDM)



“Si personne ne m’interroge, je sais ce que c’est.
Si je veux répondre à cette demande, je ne sais plus”

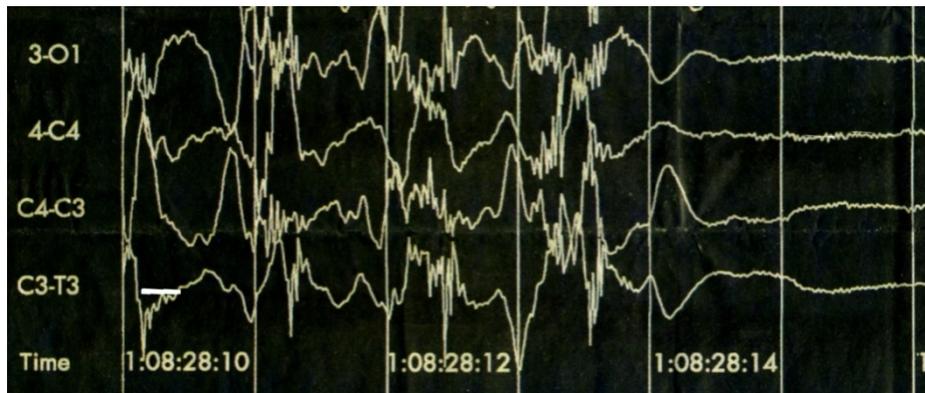
Saint Augustin, Confessions

“Oh Temps, suspends ton vol !”

“Le temps est assassin, et emporte avec lui les rires des enfants”

L’expérience de la temporalité (temps subjectif): un **PERCEPT**

“Passe”-t-il? “Coule”-t-il? “Vole”-t-il? Peut-on en “gagner” ou en “perdre”?



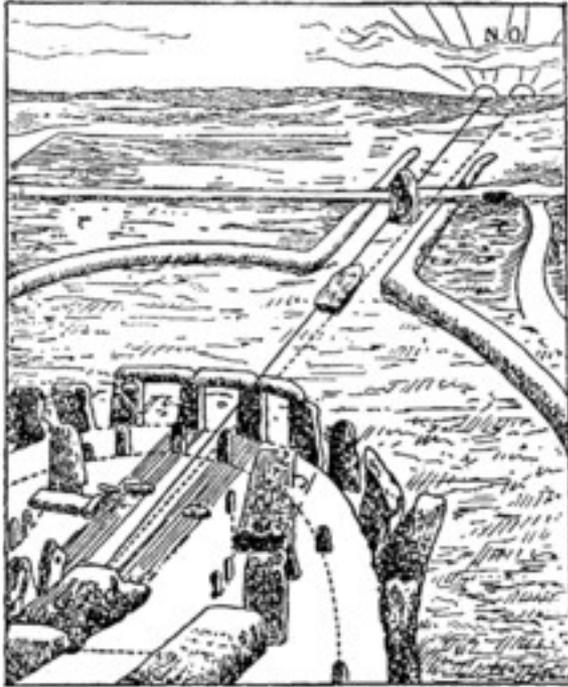
**Expérience humaine
fondamentale.
(contradictoire, dramatique,
voire tragique*..)**

* L’éternité, c’est long...surtout vers la fin
Woody Allen

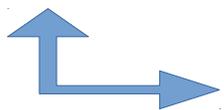
(l’humour toujours utile pour pointer pointer les paradoxes)



Depuis les débuts de l'aventure sapiens, notre temps *subjectif* est dominé par la dualité vie/mort, et rythmé par des *alternances* jour/nuit, saisons, année solaire.
(-432 en Grèce: Méton / "heures" romaines de durée variable)



Préoccupations **matérielles** (récoltes), indissociables du **religieux** (fêtes), puis **politiques** (conscription) enfin **économiques** (pointeuse, smic horaire..)



*en 1870, sous la Commune de Paris, les insurgés ont **détruit** cloches, carillons et horloges publiques....*

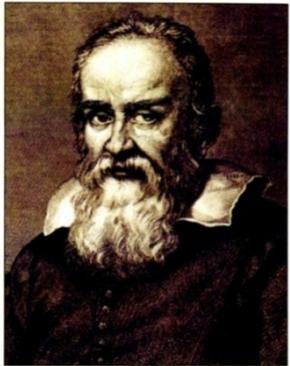
L'Italie de la Renaissance:
villes **autonomes**, commerçantes,
guerrières et riches.

(...comme la Grèce au siècle de Périclès)



A Pise et Venise, un certain **Galilée** applique la *pensée méthodique* à tout:
le ciel, la Terre, le mouvement (donc l'espace et le **temps**)

"La Nature est **écrite** en
langage mathématique"



(NB: le système de numération
chiffres arabes n'est introduit
en Europe qu'au **XIV**eme...)



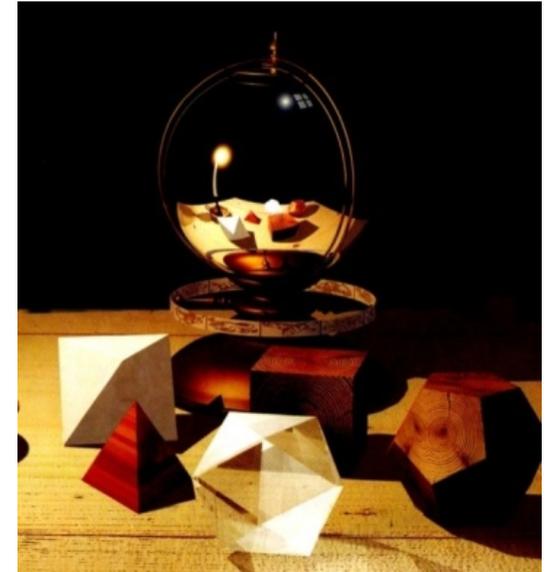
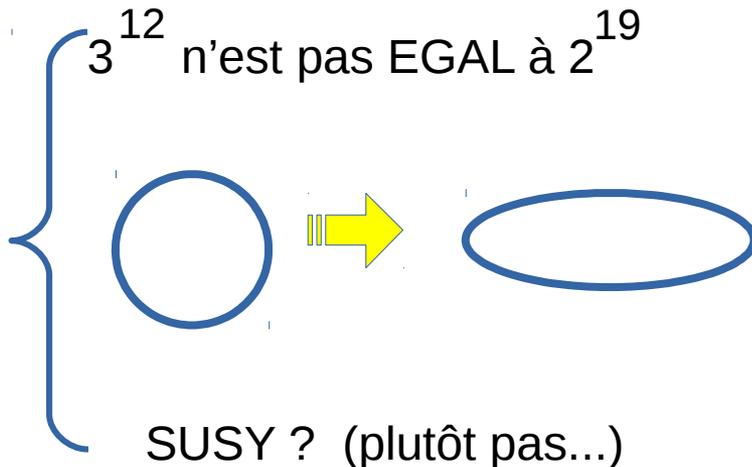
"La Nature est écrite en langage mathématique" (?)

...certes, mais...

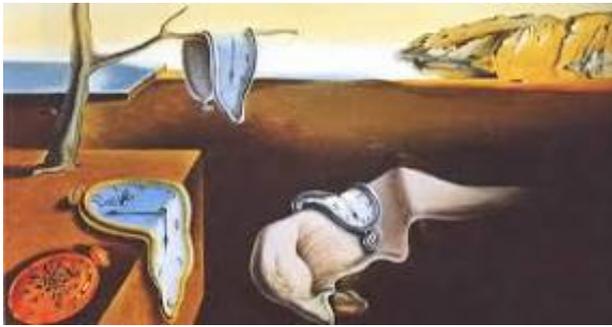


Pièges !

- * numérogie / astrologie
- * symbolisme / raisonnement par analogie
- * platonisme / **idéisme** (nos préjugés...)



Plus de DESIR
que d'évidence...



Après les poètes et les philosophes: **Le temps des savants**

* *Aristote*: Le temps est le nombre du **mouvement**

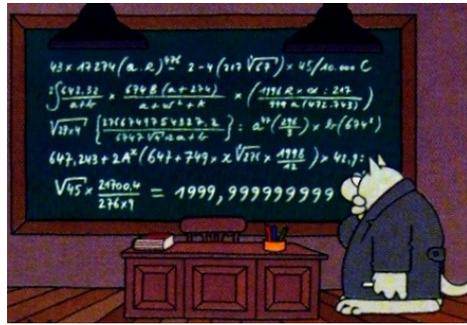
* *A.Einstein*

Le temps, c'est ce qu'indique ma montre

* *K.Gödel*: The Disappearance of Time (1930)

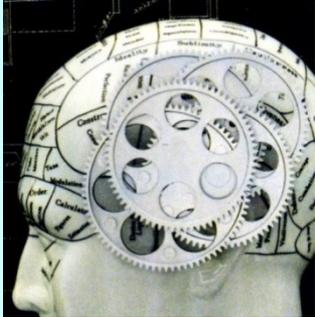


Même comme objet scientifique, le “temps” n’échappe pas à nos schémas de pensée inconscients, voire nos incohérences!



1) Question scientifique:
Des mathématiques? Oui, mais lesquelles?

2) Question philosophique:
Est-ce que le/la pendule “mesure” une **chose** objective (“le temps”)?
(indice: nécessité de “manipuler”, de **répéter** la mesure)



OU EST-CE PLUTOT

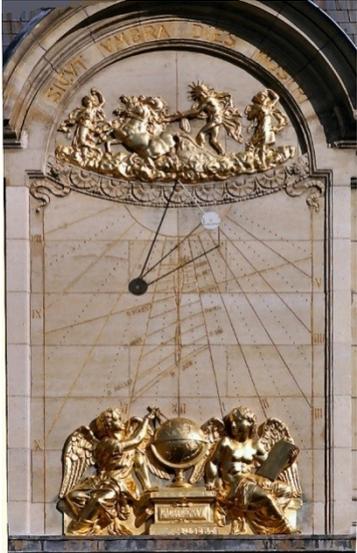


le pendule qui a **façonné** dans nos têtes **le concept** moderne de temps?

3) Question à 20000 livres anglaises:
”quelqu’un peut-il m’inventer une horloge fiable et précise
pour **stopper les naufrages** ?”

↓

Enjeux pratiques, politiques/**militaires**
(problème des longitudes)



(le bon vieux cadran solaire ne suffit plus....)

Quelles mathématiques?

$$i\hbar \cdot \partial\psi/\partial t = -\frac{\hbar^2}{2m} \partial^2\psi/\partial x^2 + V \cdot \psi$$

Nombres?

Opérateurs?

Groupes?

Géométrie

non-commutative?

\mathbb{N} ?

heures,
calendriers

\mathbb{Q} ?

365,2421898 (-0.5319 s/siècle)
(Méton, Sosigène,
Jules, Grégoire XIII)

\mathbb{R} ?

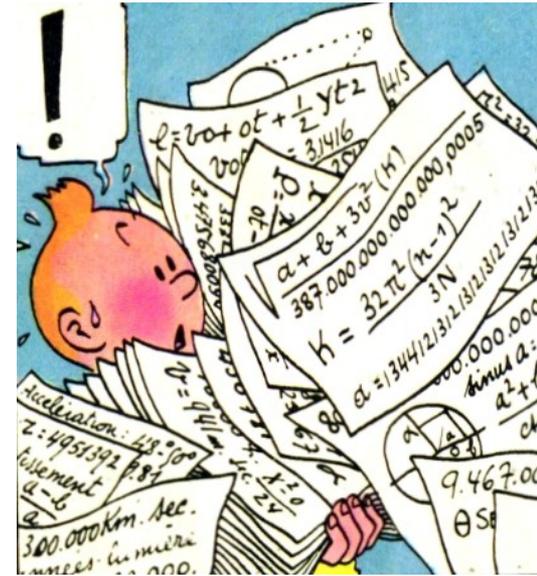
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

d/dt?

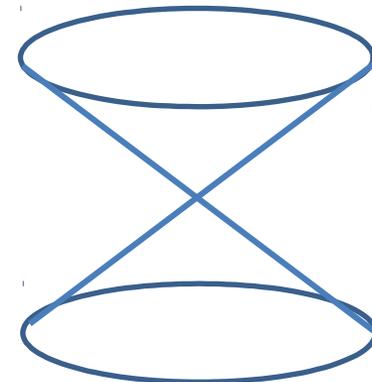
H?

SU(3)

SO(10)?



Cône de
lumière?



?

Encore une minute de philosophie...

Héraclite: "On ne se baigne jamais deux fois dans le même fleuve"

Parménide: "tout se répète, indéfiniment"

Zénon d'Elée: "le paradoxe d'Achille et de la tortue démontre l'impossibilité du mouvement"



→ 1) irréversibilité

→ 2) temps **cyclique**

→ 3) *découpage à l'infini*

Temps des savants

Pendule de Galilée + "t" de Newton (1680)

Thermodynamique de Boltzmann (1890)

~ synthèse de ces trois aspects

Le temps préexiste comme une « catégorie de l'esprit »

E.Kant, Critique de la Raison Pure



REALLY ??

1946: Piaget, Friaese, Vautrey:

Psychologie **expérimentale** !

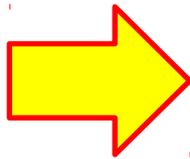
1) Stade intuitif:

les enfants de 5 ans mélangent allègrement les notions d'espace parcouru, de vitesse et de temps écoulé !

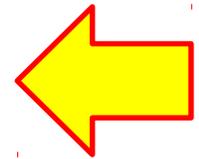
(ils estiment p.ex.une durée par l'effort requis...)

2) Stade de l' « Intelligence opératoire » =

phase de **construction** des concepts



Pas d'intuition à-priori de la notion de temps !
Temps = **concept** (laborieusement) *construit*



Einstein à propos des concepts d'Espace et de Temps:

« *Les physiciens, **forcés par les faits**, ont dû les faire redescendre des hauteurs olympiennes de l'**à-priori** pour les rendre utilisables* »

La (très) longue histoire de l'approche expérimentale

- 350: Hipparcos (mesures angulaires)
- 200: Erathostène (R Terre en stades)
- +150: Ptolémée
- +990: Al-Hazen
- +1250: R.Bacon
- +1480: L.DeVinci

1610:

Galilée

1670-1750: Harrison (chronomètres/longitudes)

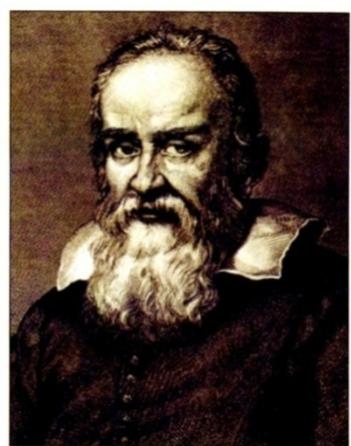
1680-1730: Picard, La Condamine, Bouguer

(la Terre mesurée en *toises*)

1793-99: Système "métrique" décimal

(la Terre = *étalon de temps+d'espace*)

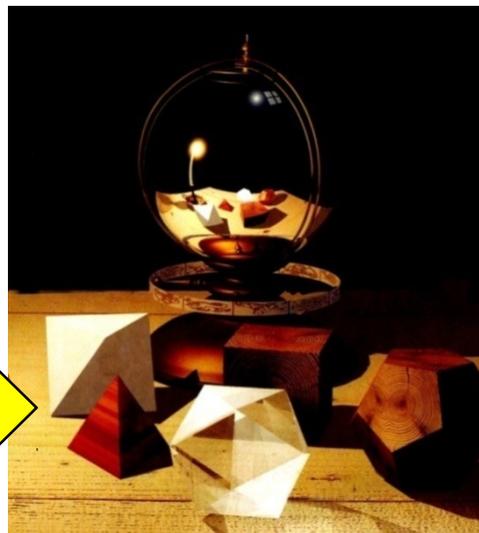
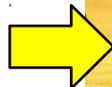
1985: Le **mètre** du SI dérive de la **seconde**



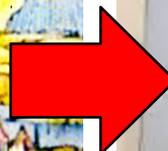
« Wir müssen wissen
Wir werden wissen »

D.Hilbert

Pythagore
,
Kabbale,
Képler...



R.Bacon,
Th d'Aquin



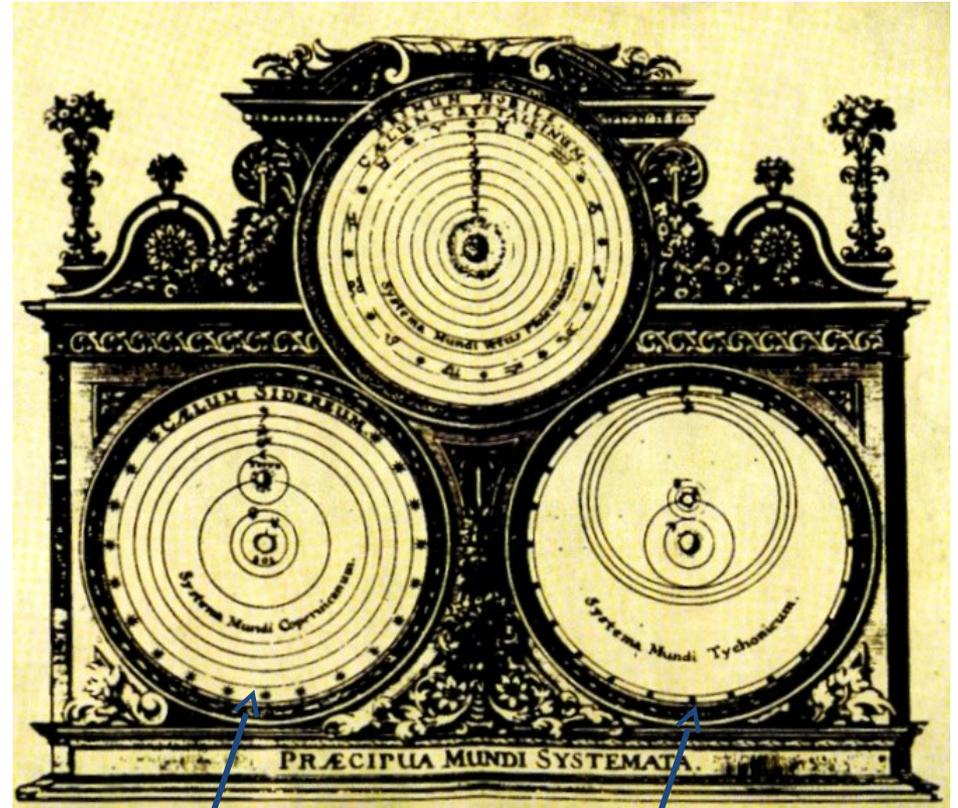
Erathostene
Hipparcos,
Al-Hazen,
De Vinci,
Galileo...

Les idées fausses ont la vie (très) dure

(la faute à notre cerveau? Biais cognitifs....)



Systeme de
Ptolémée
(150-**1543**)



Copernic

Tycho Brahé

La lumière peut venir du ciel (même de nuit...)

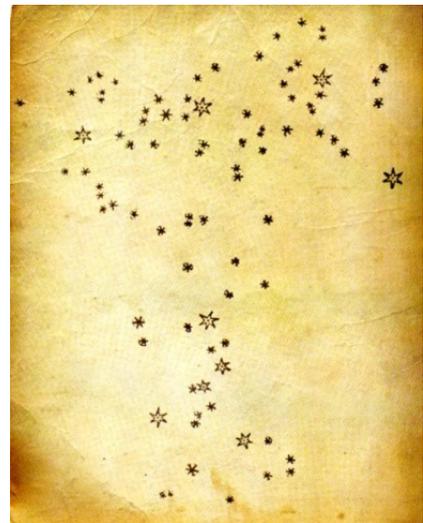


Galilée chez le Doge de Venise (1610)

La “Révolution Galilée”

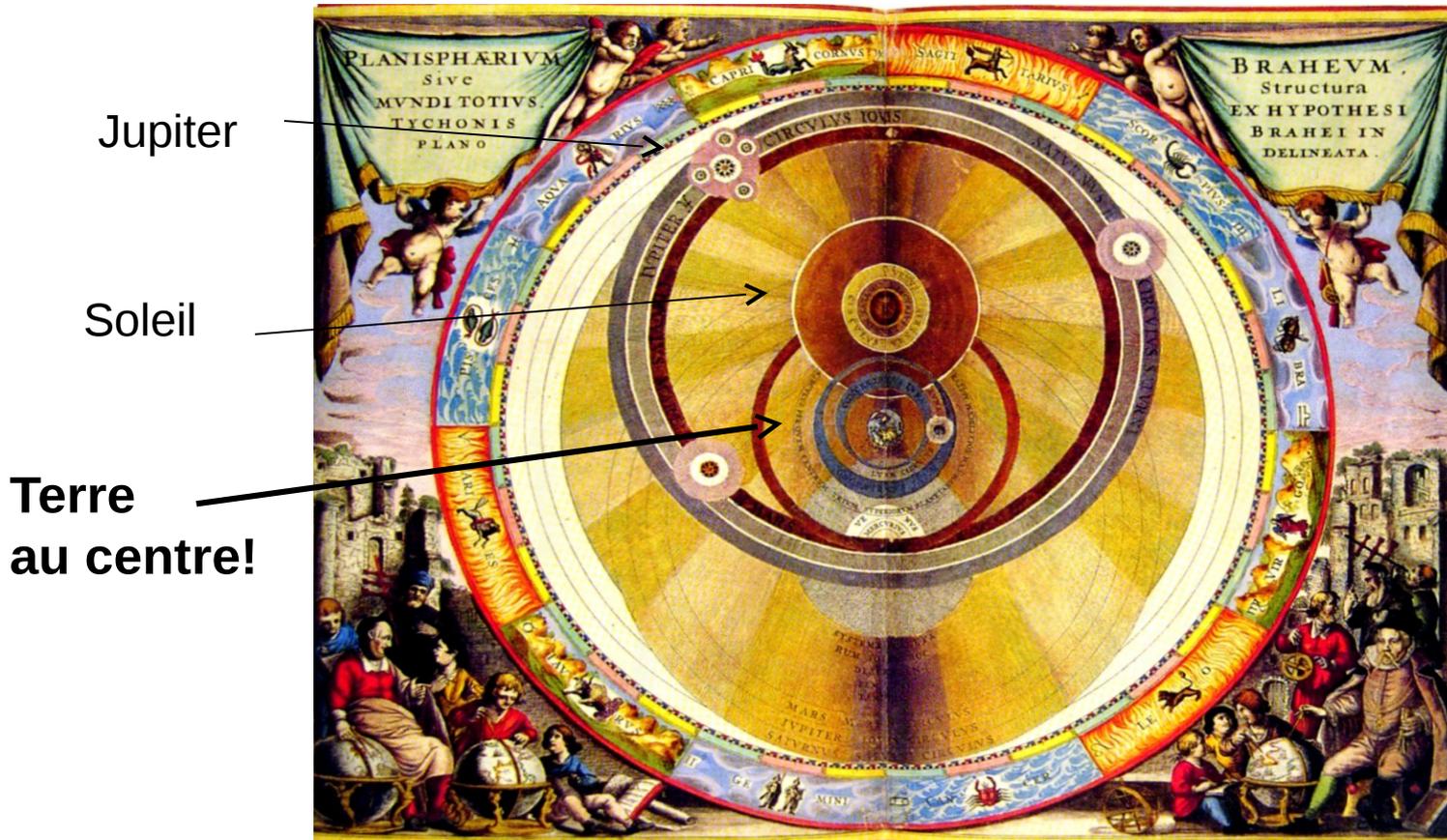


- 1) des “lunes” autour de Jupiter ! Tout ne tourne pas autour de nous
→ système héliocentrique de Copernic: plus probable
- 2) taches sur le Soleil: ni “parfait” ni immobile
- 3) étoiles jamais vues par un oeil humain (Orion)
- 4) pendule: isochronisme des petites oscillations → horloges...
- 5) chute libre: **observer** ou faire une “**exp. de pensée**” (!)
au lieu de ressasser Aristote
- 6) utiliser la “géométrie”:
les mathématiques = langage de la Nature
- 7) **Principe d’Inertie** (“le mouvement est comme rien”)
- 8) **Principe de Relativité**: (tous les observateurs sont égaux)



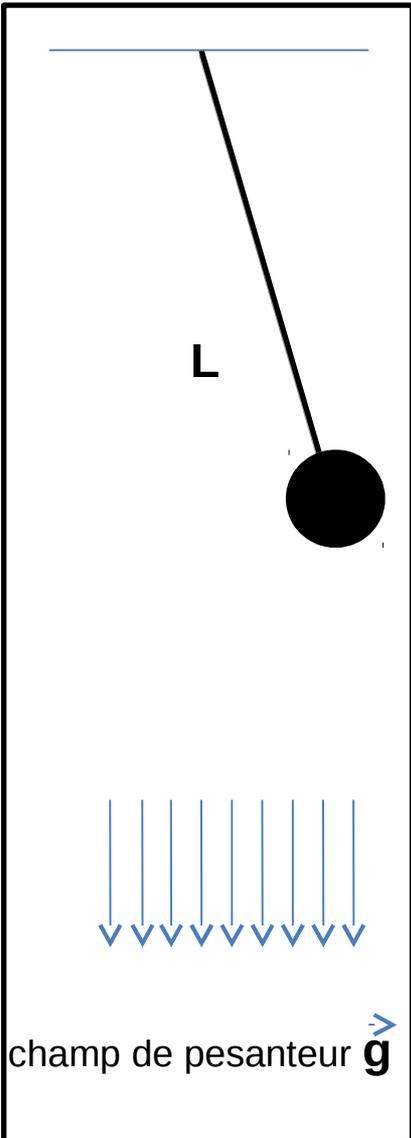
le baudrier d’Orion
(croquis Galilée)

Système « hybride » de Tycho Brahé (1660...)



Le système de Copernic (1543) ne détrône pas l'ancien du jour au lendemain...

Physique du pendule

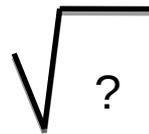


- **isochronisme** (observé aux petits angles $< 12^\circ$)
- Masse ? Matière ? Amplitude ? **aucun effet !!!**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

seulement DEUX
paramètres: L et g

Ex : L=15 m
→ T=7,5 s



L X 4 → T X 2



+FILM !!

Physique du pendule

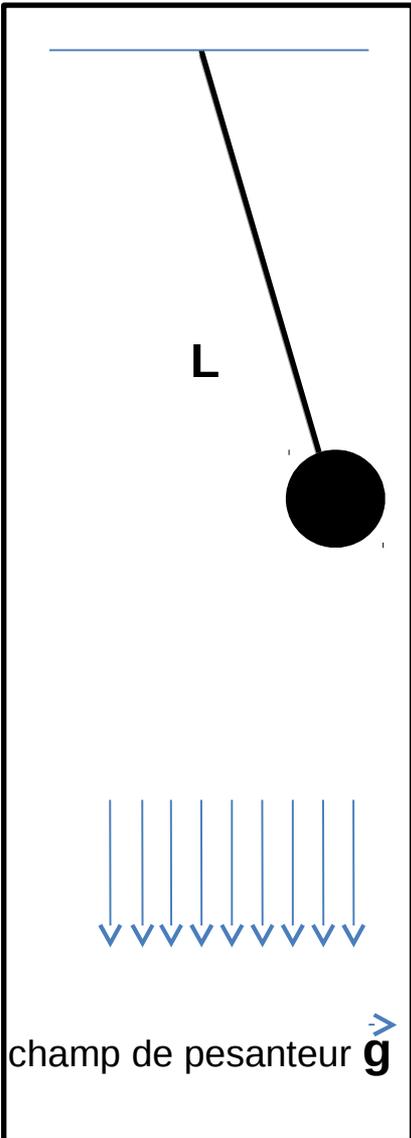
Autre question: **pourquoi** cette racine carrée??

*Galilée observe l'effet $4L \rightarrow 2T$
mais il n'explique pas cette racine carrée..*

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Début d'explication :

- force motrice : le poids $P=m.g$ (vertical)
- trajectoire de la boule: un cercle
- effet min de P à l'angle nul (repos ou v max)
- effet max à 90° : c'est la **projection** de P sur la trajectoire qui est la force agissante \rightarrow *sinus* (angle)
- à amplitude donnée, ce *sin* diminue si L augmente, la force effective diminue et T s'allonge...
- MAIS: la question de cette racine carrée subsiste

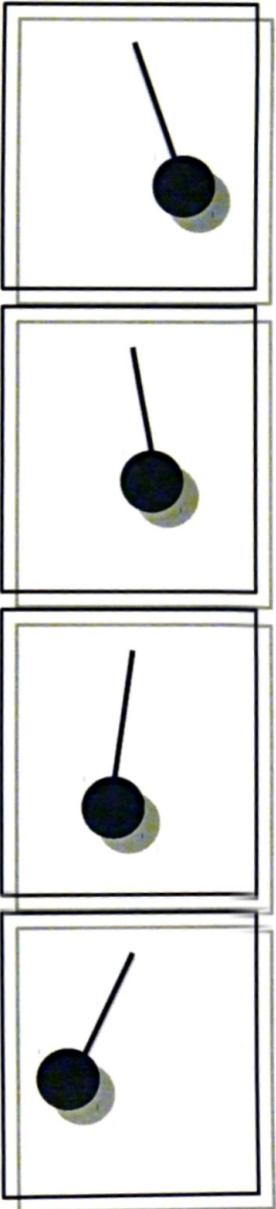


Période... quésako?

Pour des gens d'aujourd'hui, il suffit de penser à un **film**, déroulé image par image

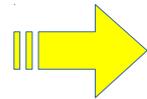
Le passé est en haut, le futur en bas

Ensuite on ajoute un repérage de la position (qu'on appelle "x" pour faire scientifique)

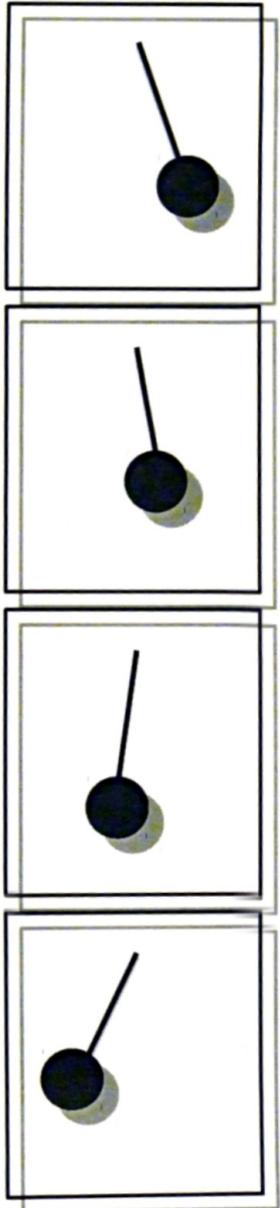
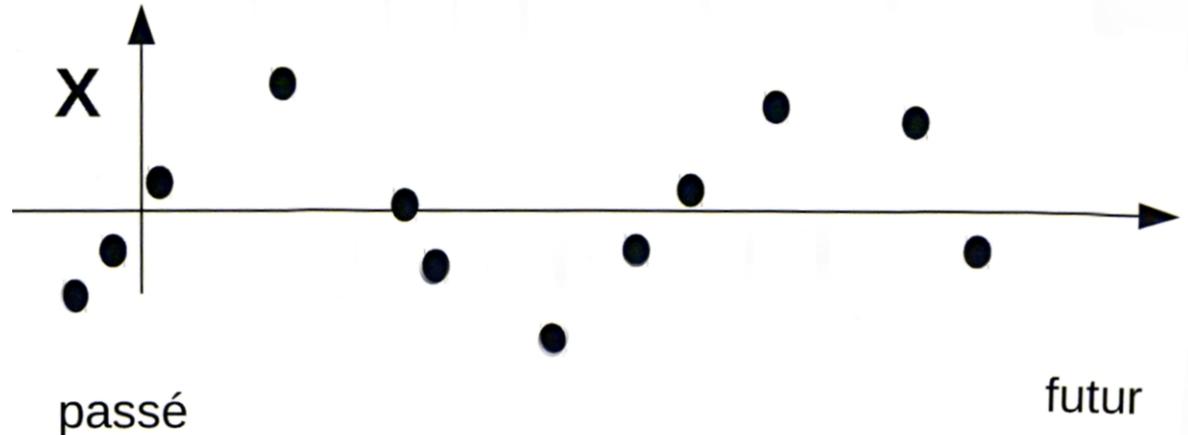


Période ?

- 1) on imagine **le film** des événements
ou alors
on “synchronise” chaque position “x” avec *une autre horloge* qui repère la suite des instants “t”
- 2) on **retourne** l’axe des x en position verticale
- 3) on définit un axe des temps horizontal

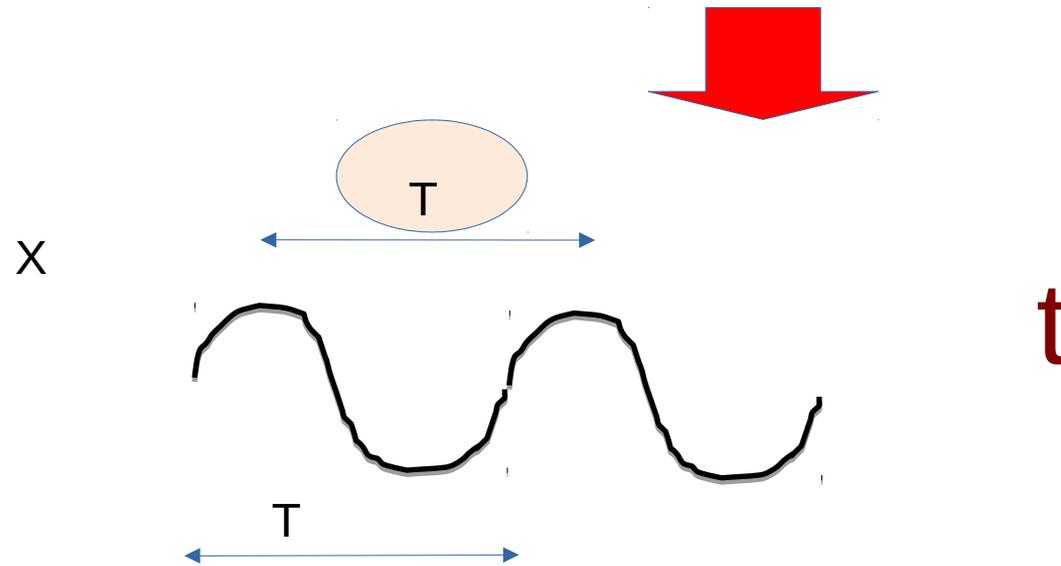


Résultat de toutes ces *opérations*:



Période? la suite !

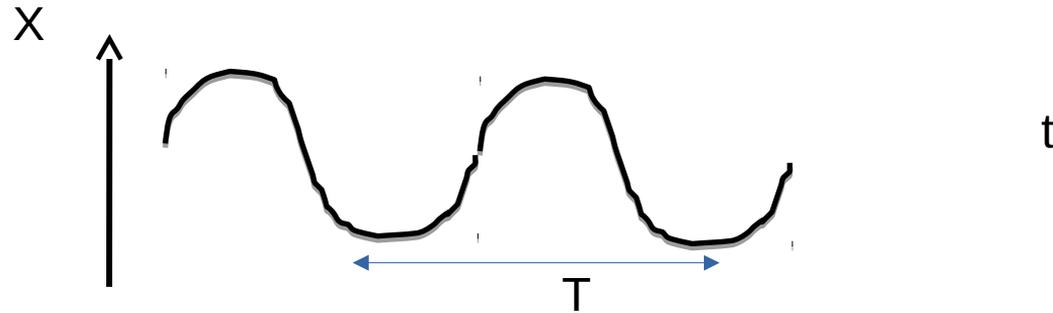
4) on **décide** que tous les “points” (x,t) manquants (non mesurés) **existent** tout de même, d'où la représentation **continue**:



Hypothèses sous-jacentes:

- la variable “t” est **mesurable** (> que repérable)
- on peut la représenter par un “*nombre réel*” (continuité)
- on peut se mettre d'accord sur une *unité* (la seconde)
- on peut construire un *étalon* (tic-tac de référence)

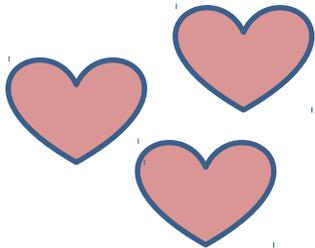
Période ! Est-ce vraiment clair ?



Petits **problèmes** connexes:

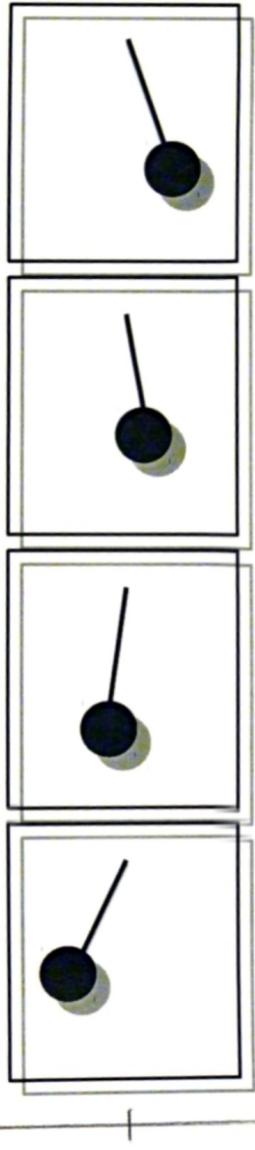
- Galilée ne connaît pas la théorie des **nombre**s réels
(pour $t_1 < t_2 \Rightarrow$ il existe toujours t_3 tel que $t_1 < t_3 < t_2$)
- Galilée est né 300 ans avant l'invention du *cinéma*
- Galilée ne dispose **d'aucune horloge** rapide et régulière à fins de comparaison (en fait, il l' **invente** !!!)

Malgré cela il entame l'étude scientifique du mouvement
(la chute libre est trop rapide ? \Rightarrow plans inclinés)

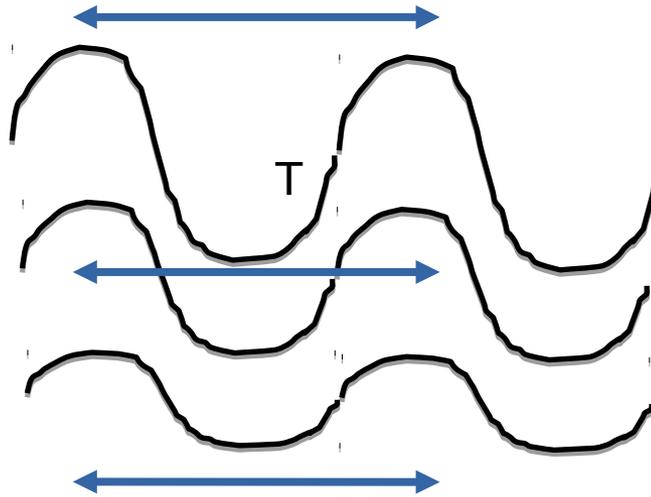


Pour vérifier l'isochronisme, il **compare** les va-et-vient du lustre de la cathédrale de Pise à... ses battements de **coeur** !!! (Attention \rightarrow *chaos..*)

Isochronisme



X



Amplitude
variable ?

Même
période !

Galilée propose une conception du temps:
1) *mécanisée* dans sa réalisation
2) *spatialisée* dans sa représentation

~~oscilloscope~~

Sa définition de l'isochronisme est
forcément **auto-référente** !

- * le pendule **définit** dorénavant le **concept** de temps
- * une horloge mécanique peut **réaliser** l'étalon



X

Quelles *alternatives* au pendule ?

a) clepsydre

Haroun al Rachid)

b) sablier

c) cadran solaire

1315: première **horloge astronomique**

(Milan puis Cologne, Paris..)

Intérêt purement *liturgique* (*Pâques*)

+ **dérives** > 1 heure/jour



Problème fondamental: écoulements “**stables**” ?? “**réguliers**”??

Et surtout: par rapport à quoi ? (pb de la référence)

a) fluides: $v=f(h)$ ou $f(P)$ (→ *Ctésibios d’Alexandrie*)

b) sablier: “physique du tas de sable” !! (très peu reproductible...)

c) 1 seconde = $1/24/3600$ du “jour solaire “ (pas du jour sidéral)

Question
impertinente

le mouvement de la Terre est-il “stable” ??



1) **Clepsydre** = écoulement fluide: NON régulier !

Théorème de Bernouilli :

$$dV/dt = (2gh)^{1/2} \cdot S \quad \rightarrow \text{donc } f(h)\dots$$



2) **Sablier** = écoulement granulaire:

-pas de dépendance $f(h)$

-loi de Beverloo:

$$dM/dt = K \cdot \mu \cdot g^a \cdot S^b \quad (\text{dim: } \rightarrow a=1/2, b=5/4)$$

$$= K \cdot \mu \cdot (gR)^{1/2} \cdot S \quad (h \text{ devient } R!)$$



Problèmes: abrasion + phénomènes TRES complexes

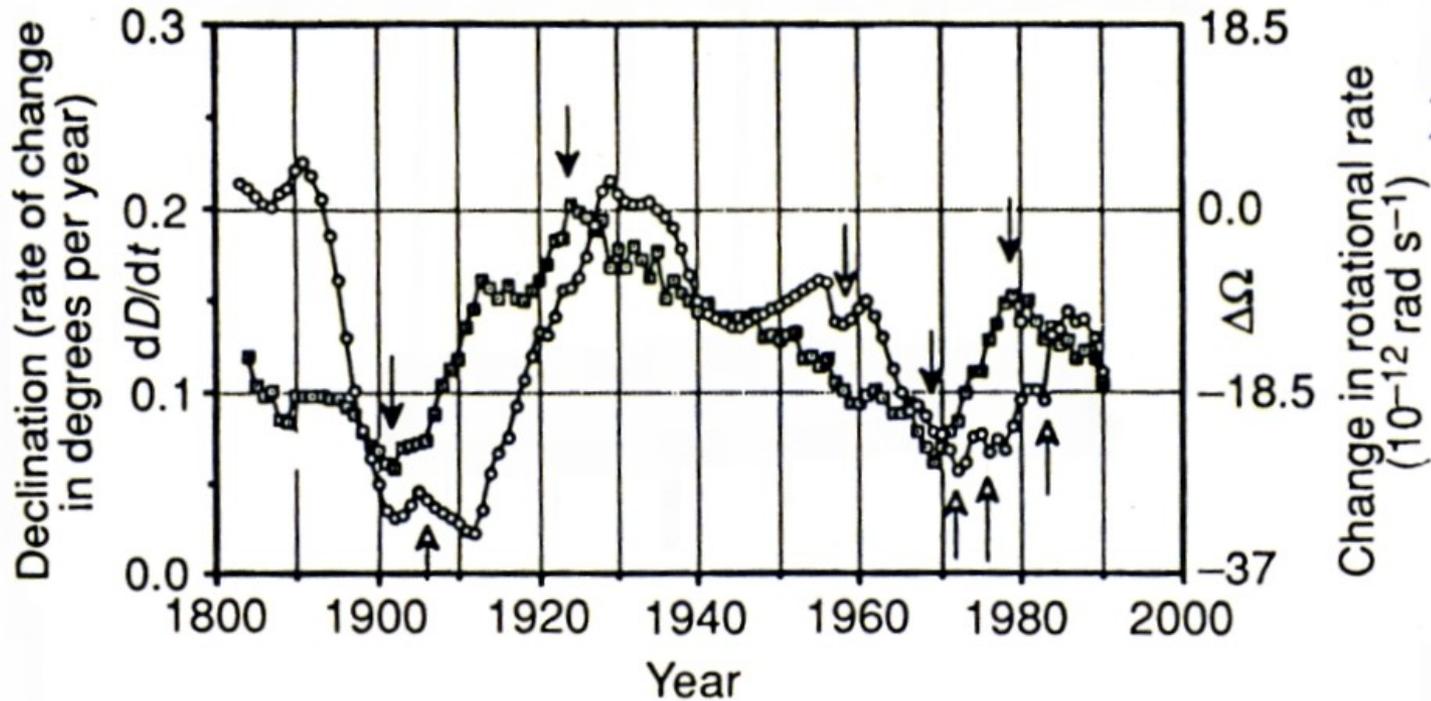
(ponts, « physique du tas de sable »): typiquement **3 min +/- 6s**



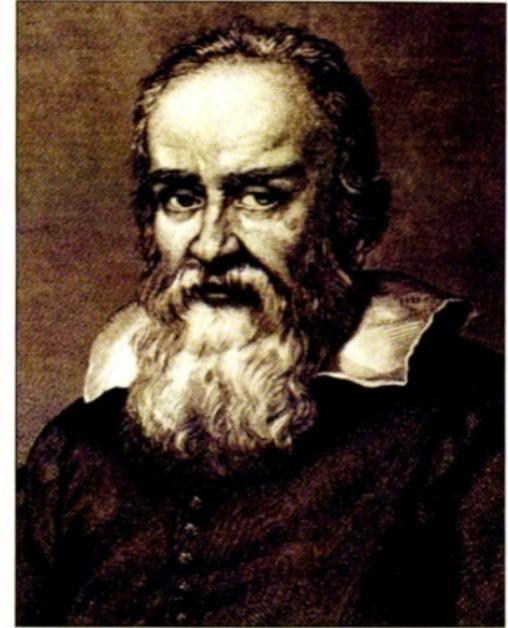
3) Rotation de la Terre NON régulière !

(mouvements fluides internes, météorites, ...)

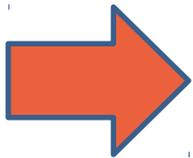
→ On rajoute régulièrement + ou - 1s au **TU** le 30 juin ou le 31 déc...



”Il me faut un “garde-temps” stable&précis
Seul le pendule est légitime, car
lui **seul** réalise l’*isochronisme*”



Une difficulté *théorique*: seules les
“petites” amplitudes sont isochrones
(Ch. Huygens travaille sur l’échappement
+ un système absolument isochrone)



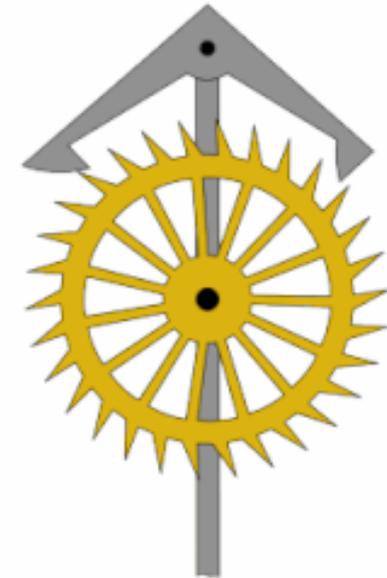
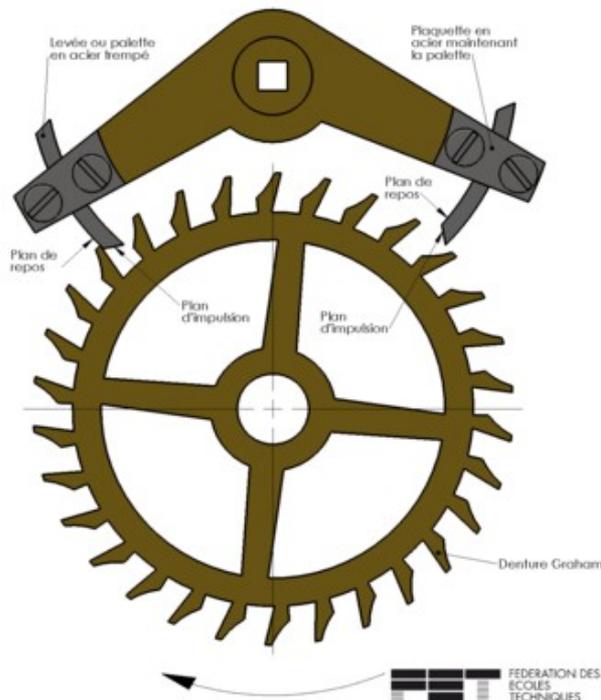
Les vraies difficultés sont d’ordre *pratique*:

- 1) entretien du mouvement (**ancree** !!)
- 2) variations de L (avec la t°)
- 3) variations de g (avec le lieu)

Une pièce d'horlogerie essentielle manque à Galilée

L'ANCRE à échappement (George Graham, 1673-1751)

- 1) transforme une oscillation en rotation ralentie (pas à pas)
- 2) lestée d'un poids, la roue crantée repousse l'ancre à chaque $\frac{1}{2}$ oscillation et entretient le mouvement



Critère de répétabilité (pb n°1)

$T=f(L)$ mais L dépend de la t° !

Un bon “garde-temps” doit osciller avec la même période **à toute température**

Astuce pour le balancier:

alliage InVar

ou

balancier bilame*
(John Harrison)

*alternance de métaux différents
à coefficients de dilatation opposés



Critère de répétabilité (pb n°2):

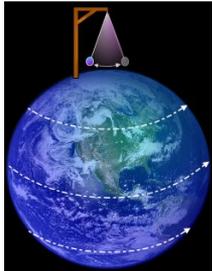
$T=f(g)$ et $g=9,81$ à Paris... mais " g " varie à la surface du globe !

Newton (+ Théorème de Gauss!) permet de traiter certains problèmes en ramenant toute la masse en un point **($F=G.M.M'/d^2$)**



CEPENDANT:

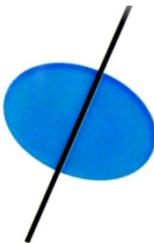
- 1) masse de la Terre inconnue (ou \Leftrightarrow la constante $G \sim 10^{-11}$)
- 2) densité terrestre variable de lieu en lieu (roches, eau, cavernes ...)
- 3) R de la Terre variable de lieu en lieu !



- ➔ Expéditions en Laponie/au Pérou pour mesurer
- a) l'aplatissement aux pôles, donc $g(R)$
 - b) les longueurs réelles de différents méridiens

J.Picard (1671) *Mesure de la figure de la Terre....*





Problème de la mesure de “ g ”

Champ de pesanteur g non homogène
→ quelle valeur privilégier ?



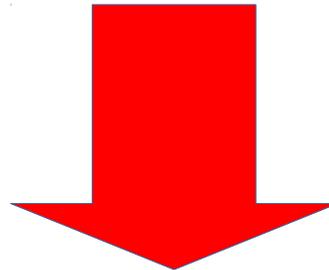
Le pendule ! >> chute libre !
Oscillations lentes + répétitivité (donc précision)



Expéditions Laponie/Pérou => deux grandes conséquences:



I) Géodésie (voir chap.2)



II) Genèse du **systeme métrique** !

Genèse du système métrique

(déjà l'ESPACE-TEMPS !)

Exercice préliminaire:

Entrer $L=1$ et $g=9,81$ dans la formule de $T...$

1393 (Châtelet) ; 1667 (Colbert):

1 toise ("tendere") = 6 pieds (~1,95 m)

1766: Toise du Pérou (80 copies)

1789 Proposition de Talleyrand aux Anglais:
définir comme *étalon* universel la longueur
L1 du "pendule qui bat la seconde"

(...Réponse exercice: $T=2,005$ s)

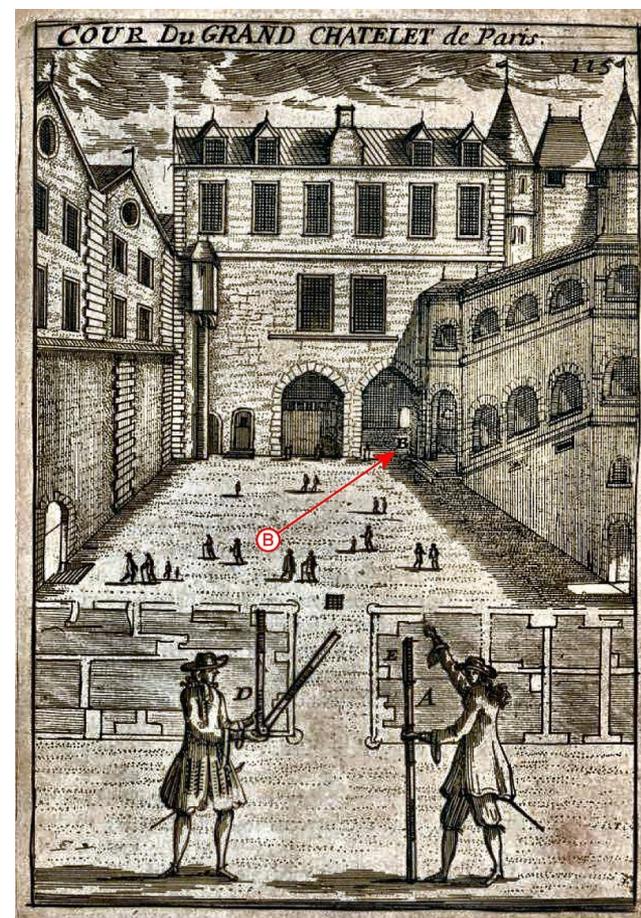
Pbs *insolubles...* - 45è parallèle ou latitude de Paris?

- méridien de Paris ou Greenwich?? -> "No" britannique !

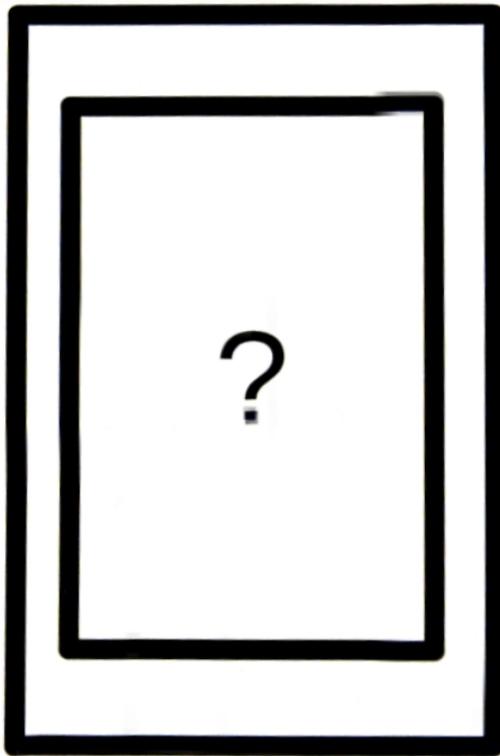
Cavalier seul de la France révolutionnaire:

- 1793 puis 1799: système métrique décimal

- 1875: Convention du Mètre, BIPM (1985 ! Wait ch4)



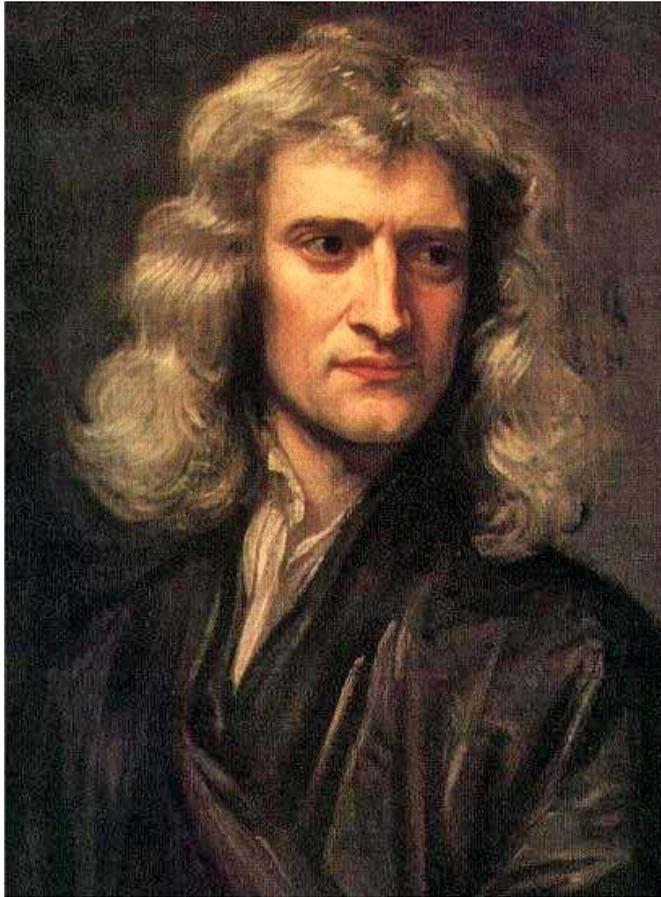
Galilée meurt en **1642**, l'année de naissance d'un certain...



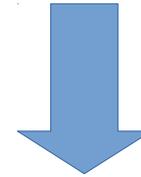
un
indice:



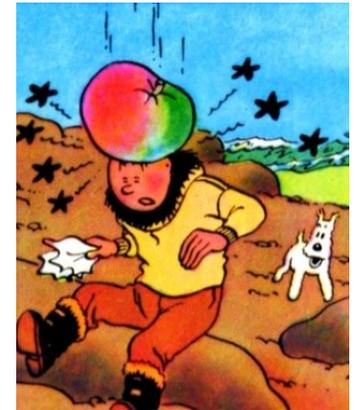
Isaac Newton (1642-1727)



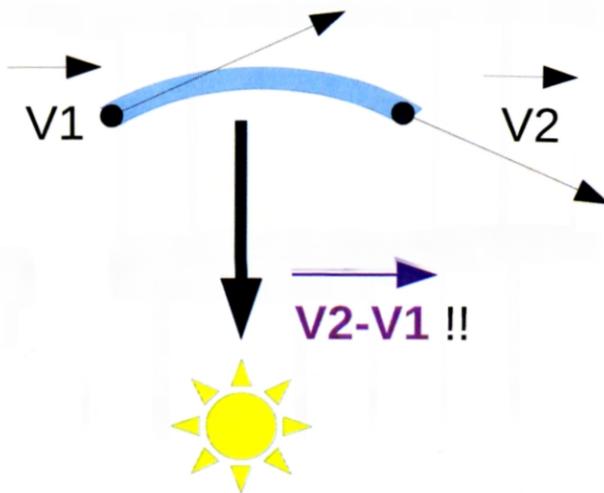
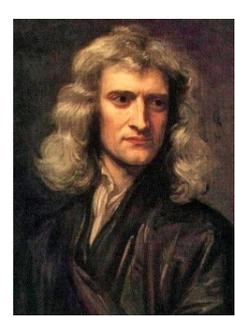
(merci
Edmund !)



=

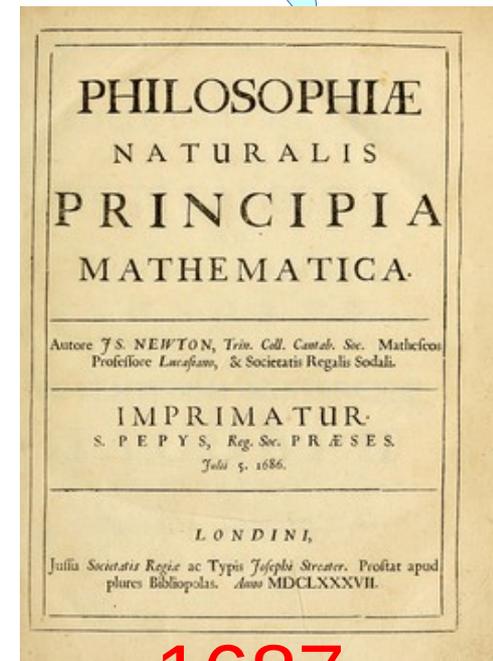


...et donc: $F = G \cdot M \cdot M' / d^2$

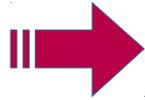


What does he say ??

- formalise (en latin) le Principe d’Inertie (Galilée)
(*le mouvement se poursuit même sans force*)
- la “force” ce n’est pas le mouvement mais
les *modifications* du mouvement : $F \sim \Delta v / \Delta t$
- “fluxions” = passage à la **limite** des
“*très petits intervalles de temps*”
(invention du calcul infinitésimal)

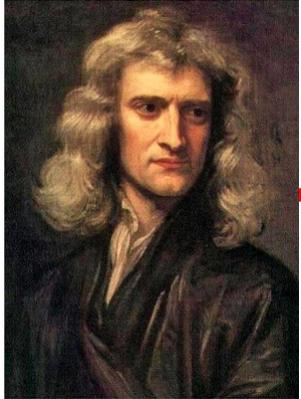


1687



Nécessité d’un cadre à priori:
Newton pose comme *prérequis* l’espace et le **temps**

“Le temps mathématique, absolu et vrai, sans relation à rien d’extérieur, coule uniformément, et s’appelle la durée”



Même en restant dans le domaine de la mécanique rationnelle:

TOUT, dans cet énoncé, pose **problème**

1) Quelle relation entre un « être *mathématique* » et la REALITE ?

\mathbb{R}

2) 1830: théorème de Zermelo (« axiome du choix »)

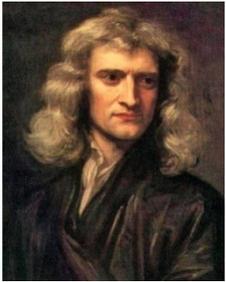
→ → **impossibilité** d’établir l’*égalité* de deux nombres réels donnés !!

3) « Uniformément » ?? ($dt/dt = 1$?) Encore une *tautologie*...

4) Nombre « t » = repérage (“instant”) **MAIS** durée = intervalle $\Delta t = t_2 - t_1$

5) 1905-1915: Einstein porte le coup de grâce à la prétention de l’ABSOLU (wait for Chap.4...)

“Le temps mathématique, absolu et vrai, sans relation à rien d’extérieur, coule uniformément, et s’appelle la durée...”



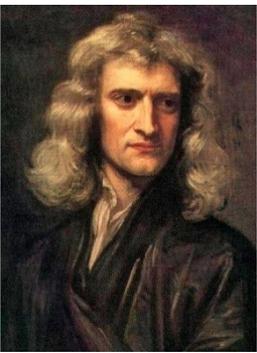
Philosophie “naturelle” ?
Ou **artificielle** ?????



La suite:

“ ...Le temps vulgaire, relatif ou apparent, est cette mesure sensible et extérieure d'une partie de durée quelconque prise du mouvement, et dont on se sert ordinairement à la place du temps vrai.”





Si on accepte

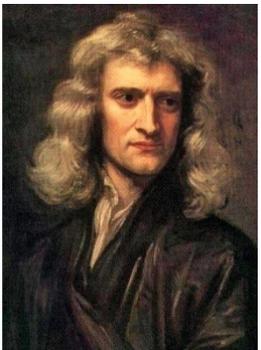
- 1) ce temps « absolu » extérieur à tout (les théologiens renâclent...)
- 2) son écoulement « uniforme » (par rapport à quoi??)
- 3) des intervalles Δt infiniment petits (les géomètres grognent...)

...on obtient en échange une **théorie surpuissante** !!



Équations différentielles « de la variable t » : $\Theta'' + g/L \cdot \sin(\Theta) = 0$

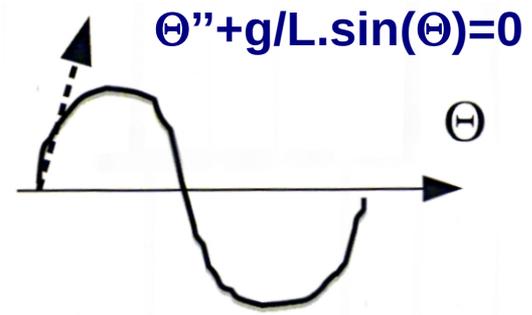
- 
- théorie générale des oscillateurs (harmoniques ou pas)
même aux grandes amplitudes, même avec amortissement
 - trajectoires des planètes, astéroïdes, comètes (Halley...)
 - hauteur des marées, forme de la Terre, etc, etc etc....
- 
- 



Au passage, la boîte à outils mathématique créée de toutes pièces par Newton permet de *démontrer* la formule:

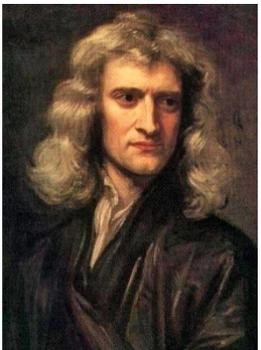
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

(ainsi que ses *limites*...)



Origine de l' "isochronisme"?
 une simple propriété
 mathématique de la fonction sinus...
 → *une vulgaire approximation !!*

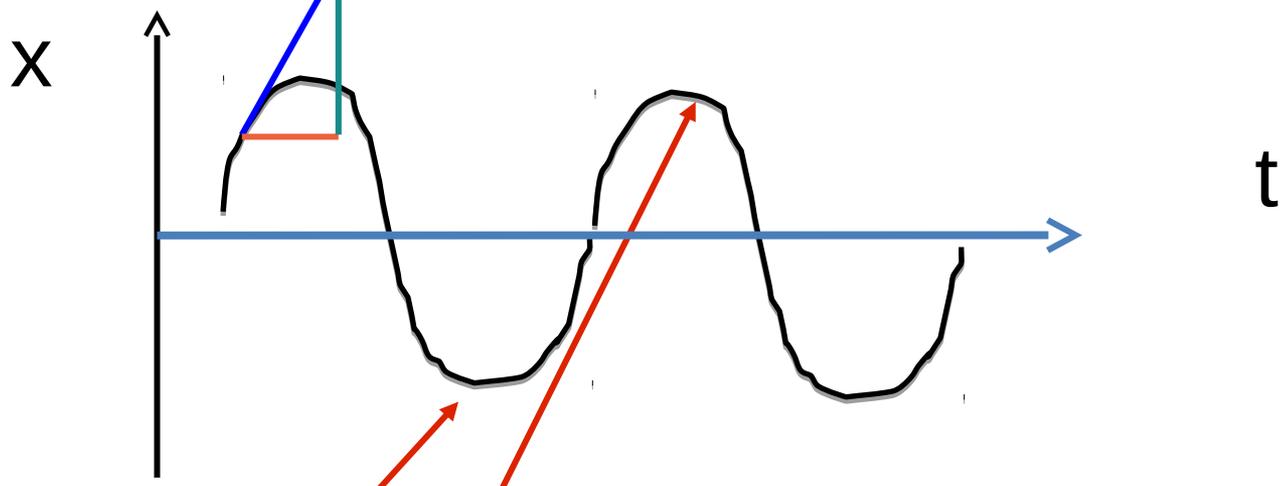




Un vieux paradoxe décidément récalcitrant :
aux sommets de sa trajectoire,
la vitesse du pendule est... NULLE !



$$v = \lim (\Delta x / \Delta t) \text{ pour } \Delta t \rightarrow 0$$

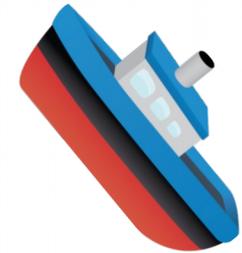


Vitesse NULLE ???
(Zénon, sors de ce corps!!)



Newton distingue surtout son temps « mathématique absolu et vrai » du temps « vulgaire » des *horloges très imparfaites* de son époque

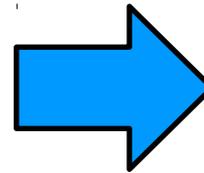
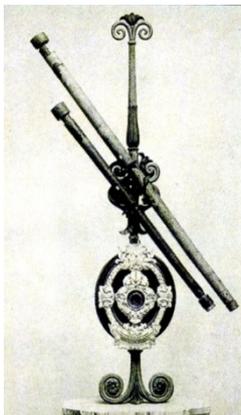
1666: **Colbert** crée l'Académie des Sciences puis l'Observatoire de Paris
Mission principale: résoudre le **problème des longitudes**



Problème technique: aucune « horloge de marine » ne fonctionne!



Solution : les 4 lunes de Jupiter = une horloge céleste universelle !



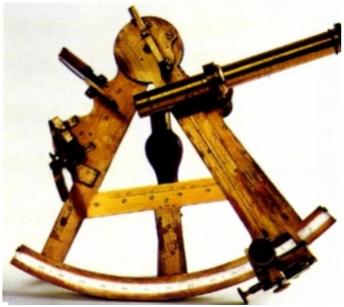
Tables de Cassini

Römer !

(Cours n°4 à suivre...)

Problème des longitudes marines

(encore une histoire d'**Espace-Temps**)



Latitudes: facile !
étoile polaire **FIXE**

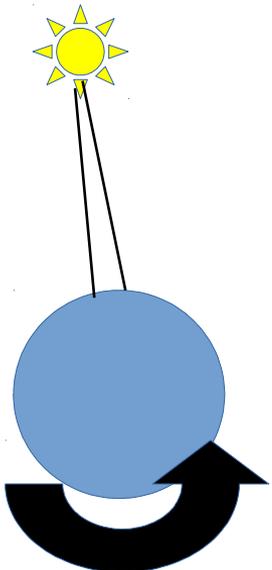
“Chacun voit midi à sa porte”

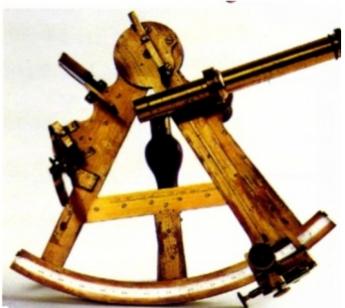
MIDI = le soleil au zénith... du lieu
→ fuseaux horaires

Ex: Distance Strasbourg-Brest: 1000 km
= $360^\circ \times 1000/40000 = 9^\circ$ d'arc
= 24 h x 1000/40000 = 36 min. de retard

Si je peux téléphoner en Bretagne: 36 **min** → $9^\circ = 1000$ **km**

Sur mer, pas de repère géographique!
Sans radio/téléphone, connaître sa longitude exige...
...DEUX horloges : - une à l'heure locale
- une à l'heure du méridien référence





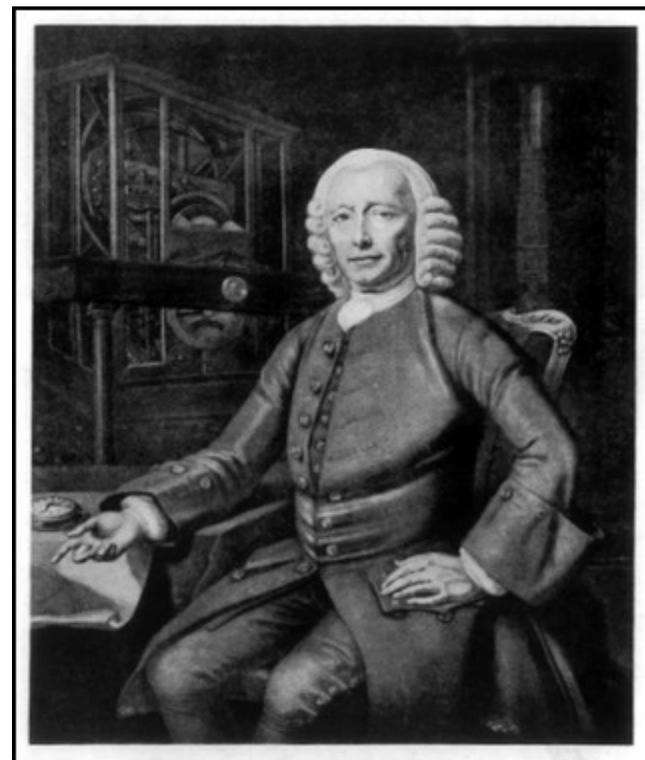
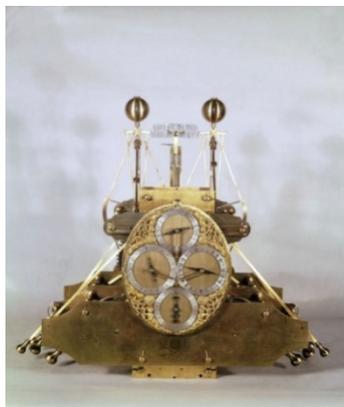
Problème des longitudes marines

Pas de téléphone, pas de GPS, même pas d'horloge...
1716: Henri Sully construit un premier prototype en France

1714: « **Longitude Act** »

Le Parlement anglais offre 20000 livres (300000 francs-or)
pour **une horloge de marine** qui fonctionnerait sur un navire

John Harrison (1693-1776),
ébéniste et horloger amateur, consacre
une *vie entière* à relever le défi...





1730-1735: prototype **H1**

Idée principale:

~~balancier~~

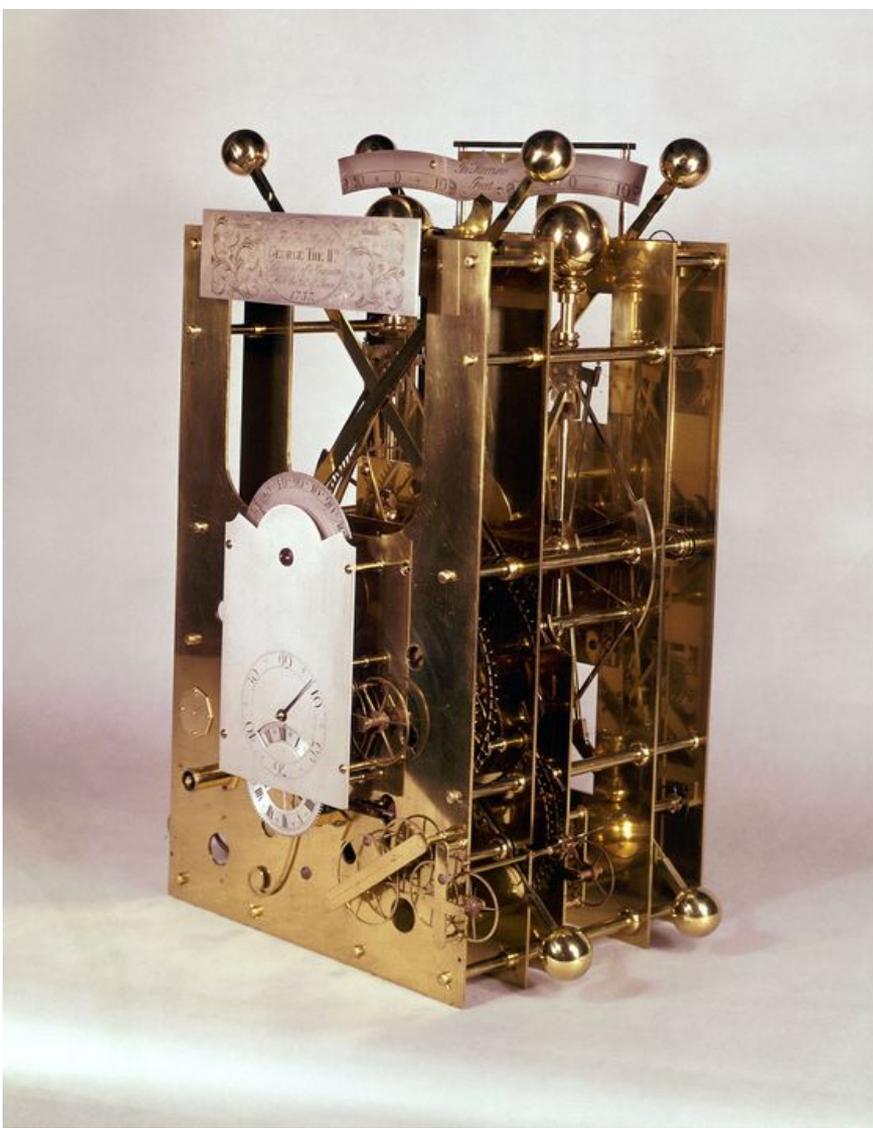


ressort spiral !

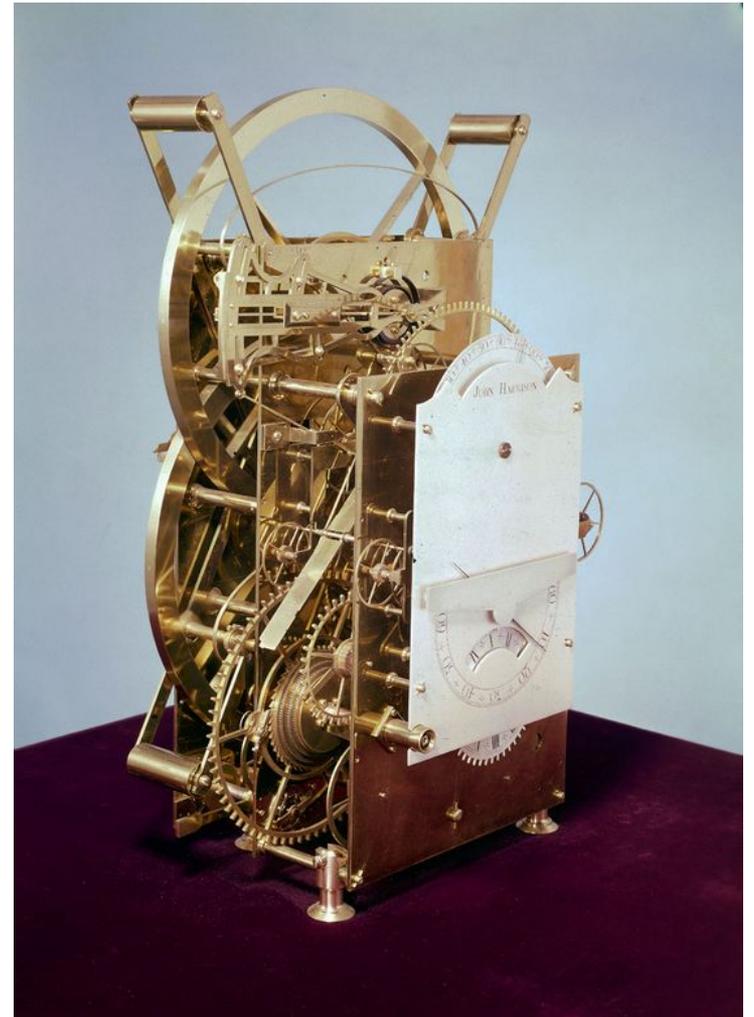
- Dépendance $f(g)$ éliminée
- Solution anti-roulis

MAIS

- 1) Dérive 3 s en 24 h
- 2) Dépendance de T°



1739: H2
Invention du *remontoir*
(régulation force ressort)



1741: H3
-balanciers circulaires
-compensation T°

1760-1772: H4 et H5

Freq: 5 Hz (5 battements/s)



5,2 pouces !



Dérive: **5 s en 2 mois !**
(erreur longitude 1,25' d'arc=1 mille marin)
Démontré en 1761 sur un test
transatlantique (contesté par le Parlement)

Nouveau voyage: 39 s (erreur pos.=15 km)
(méthode orbite lunaire: erreur 48 km !)

1765: le Parlement *refuse* le prix à JH
qui en appelle au roi George III
récompense en **1773**



La suite au prochain épisode ! !

Avant de nous quitter....

7 s



5 s



Avec ces deux sabliers,
comment réussir une cuisson
de **13 secondes ?**

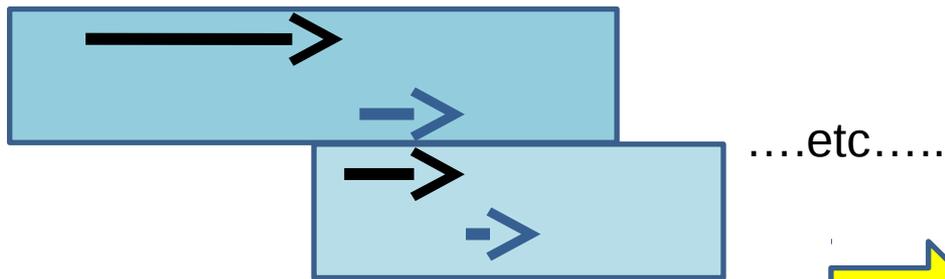
(un indice: ça ne marcherait pas avec des horloges à eau)

Pour les petits curieux (et les grands...)

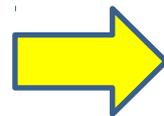
- Zénon
- amortissement
- approx $\sin(x)$
- tour de Pise
- temps psychologique; que dit l'expérience ?
- le pendule de Strasbourg: détails de l'analyse

ZENON:

” Achille aux pieds ailés (~Usain Bolt)
ne rattrape *jamais* la tortue”



....etc.....

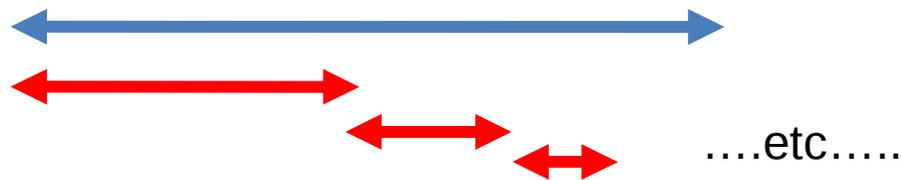


Sa conclusion (absurde?)

« Le mouvement n'existe pas ! »



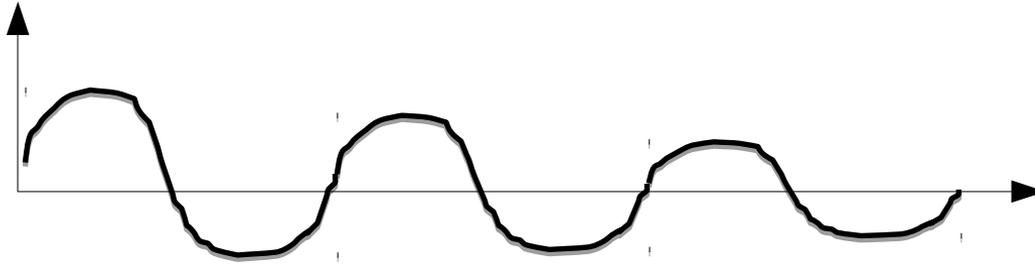
Autre “preuve”: la flèche d'Apollon:



....etc.....

$S=1/2+1/4+1/8+\dots$ ne tend vers UN que pour une *infinité* de termes

(démonstration: $S=1/2 \cdot (S'-1)$; à l'infini, $S'=S$ et alors $S=1$)



Pendule réel: *toujours* amorti...(mais aucun problème)

Se calcule parfaitement avec la physique de Newton

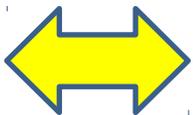
Résultat : **isochronisme** encore ! (cf. notre petit film)

$$\text{avec } T_{\text{amorti}} = T_{\text{pur}} / \sqrt{1 - F_{\text{amortissement}}}$$

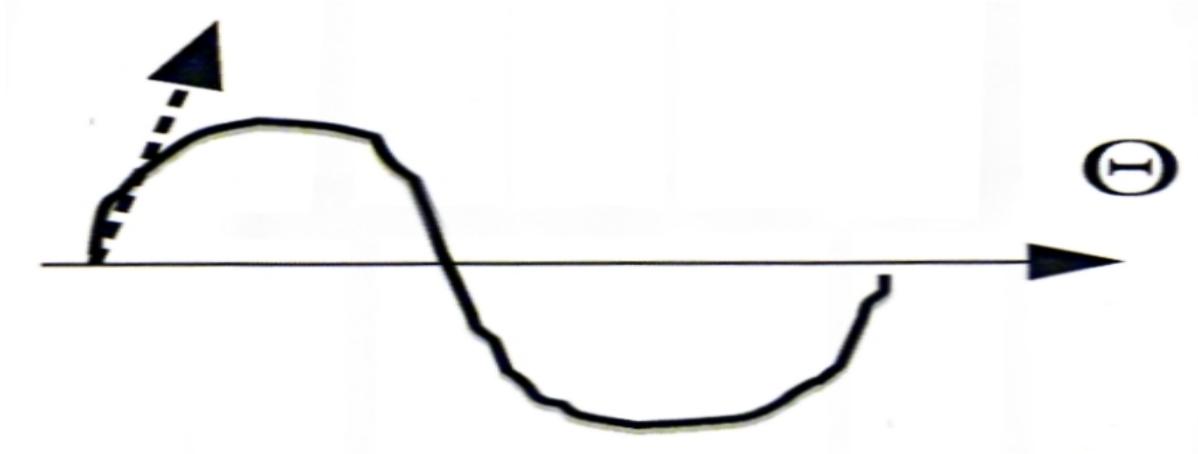
Galilée n'a peut-être jamais fait la manip...

... mais il invente
l'expérience de pensée

(plus que convaincante !)



Valeurs approchées: formalisme des **développements limités**
(ex. vos calculettes)



$$\sin (x) = x - x^3/6 + x^5/120 - \dots$$

Isochronisme = une approximation !!

(pour $x = 12^\circ$, l'erreur faite en posant $\sin(x)=x$ est $\sim 5\%$)

Temps subjectif: que dit l'expérience ?

Mc Wittmann, Frontiers in Integr. Neurosc 5,66 (2011)

Il existe différents *niveaux* de “processing” par le cerveau (evts auditifs /visuels/tact) pour le jugement (consc) de **simultanéité** ($t_A = t_B$) ou de **succession** ($t_A < t_B$)

- Brique de base de la perception temporelle: le “moment fonctionnel” (~ ms)
- Niveau 2: ”expérience-moment” = intégration sur plusieurs secondes
(→ conduit à l'expérience consc. du “moment” qui dure)

Les différents syst. sensoriels ont différentes *résolutions* temporelles:

audio **2-3 ms** ($t_A = t_B$ ou non?) ; visu/tactile ~ **20-30 ms** ; intermodal > **100 ms**

S.Dehaene: le CV crée des *états* a-temporels (unités *discrètes*) dans lesquels toute info nouvelle est traitée comme co-temporelle

Horloge de “processing”: rythmée par trois boucles thalamo-corticales
 γ (40 Hz), puis α (10 Hz) et enfin β (4-8 Hz)

Existence de **seuils** en-dessous desquels soit l'**unité de l'evt** (30 ms) soit la **succession** de deux evts (100-300 ms) ne sont **pas** perçus **consciemment**

Le CV conscient en échec: non-égalité n'implique PAS décision $t_A < t_B$ (ou $>$) !
et $t_A < t_B$ n'implique pas une claire estimation de la valeur de la durée $[t_A, t_B]$

Mesures **réelles** sur le pendule de Strasbourg

1) Observation fondamentale: la dispersion de déclenchement du stop chrono est **inévitable** (même avec des dispositifs sophistiqués)

→ mesures répétées + traitement statistique ($\Delta T \rightarrow \sigma_T$)

2) Erreur ΔT sur une T : **incompressible** (avec un dispositif donné)

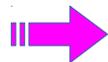
→ on mesure plutôt 10 périodes

→ ΔT s'applique à $10T$ (minimise l'erreur relative en %)

Résultat : $T = 7.675 \pm 0.051$ s

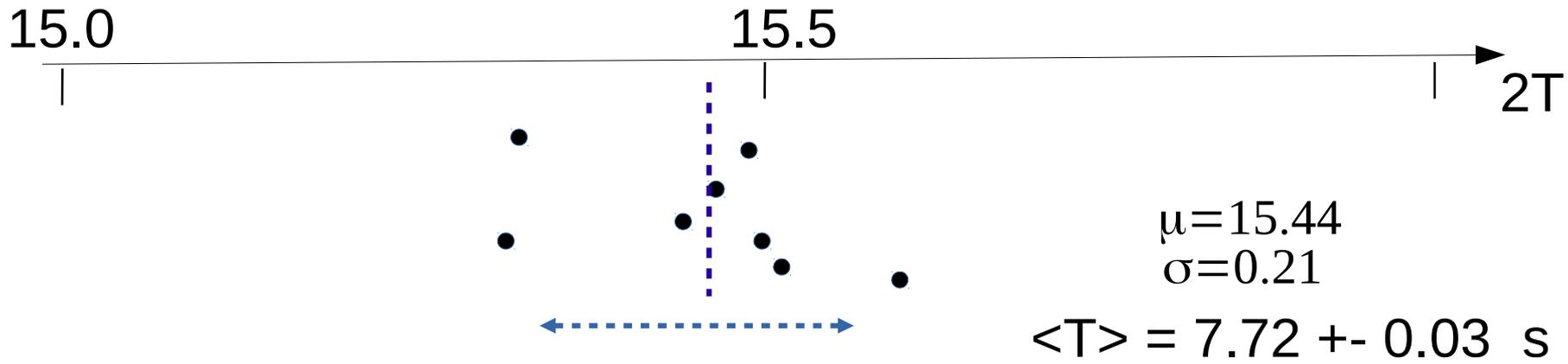
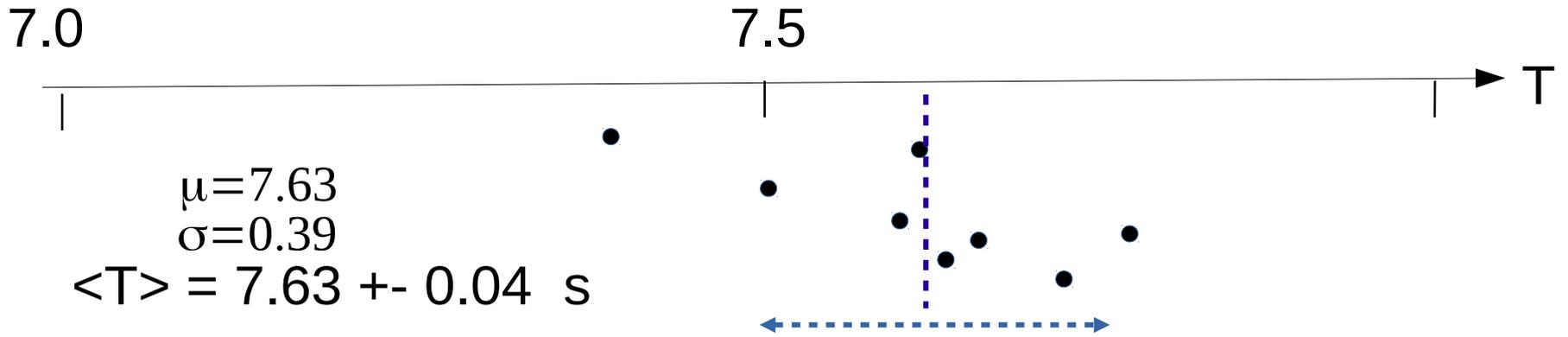
(toute mesure physique ne peut prendre QUE cette forme)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

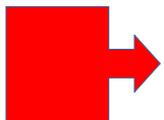


$$L = 14.64 \pm 0.19 \text{ m}$$





Moyenne combinée: $T = 7.675 \pm 0.051 \text{ s}$



NB: il n'existe pas de "vraie" valeur....

