

# Pendules et Espace-Temps

## Ch1. Le moment Galilée

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

## Ch2. La Terre pas si ronde, et bien agitée

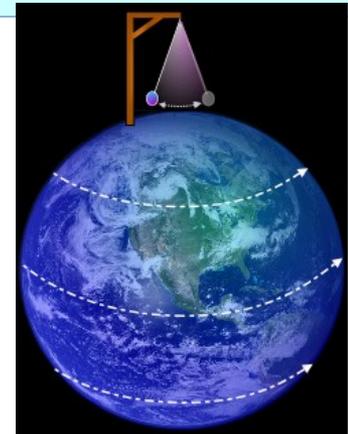
- les arpenteurs du globe: **Picard, Cassini, Delambre...**
- **Léon Foucault** au Panthéon

## Ch3. Pendule de Newton

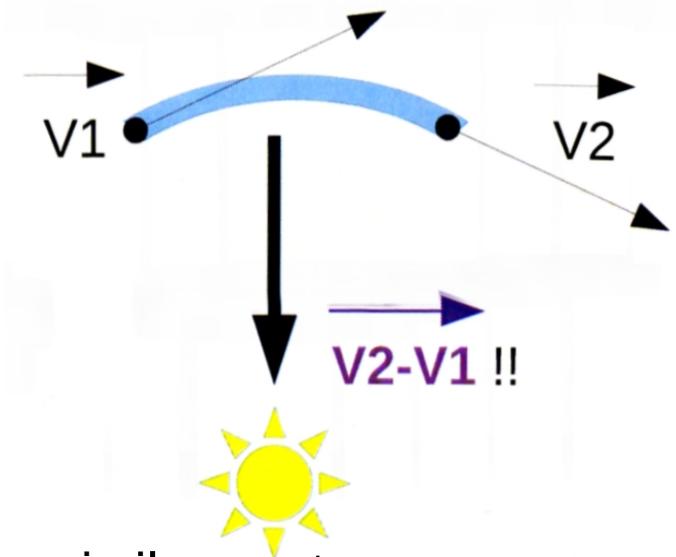
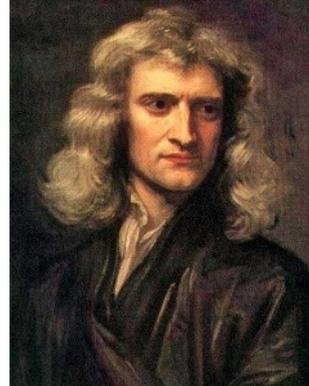
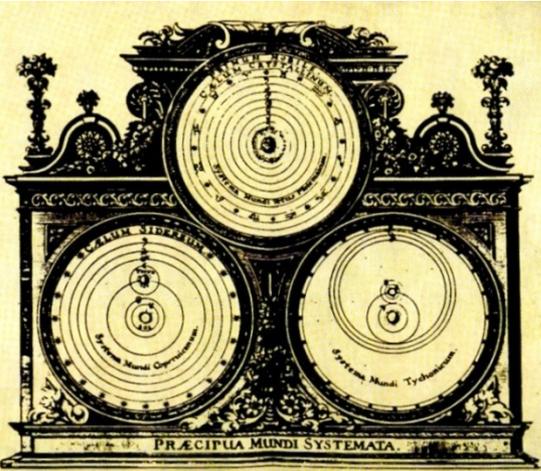
- cinq boules diaboliques
- flèche du temps : Loschmidt vs. Boltzmann
- du chaos dans les pendules (et ailleurs)

## Ch4. Physique ultra-moderne

- du pendule de lumière au temps *local*
- quantique-et-tic-et-tac (horloges atomiques et radioactives, GPS, nouveau mètre-étalon...)



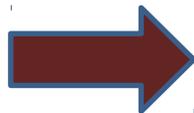
Rappel: Copernic → Galilée → Newton



Newton glose sur le “temps absolu” mais il apporte l’argument **dynamique**: c’est bien la Terre dont le mouvement est perturbé (par le soleil)



Double mouvement : **translation ET rotation propre**



*double résistance....*



# La (très) longue histoire de l'approche expérimentale

-270: **Erathostène** ! Mesure  $R_{\text{Terre}}$  (en *stades*)

-120: **Hipparcos** (mesures angulaires)

+150: Ptolémée

+990: Al-Hazen

+1250: R.Bacon

+1480: L.DeVinci

1610:

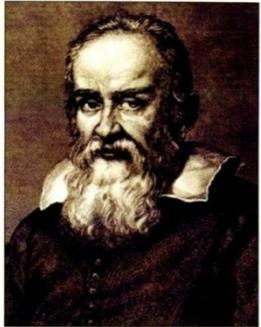
**Galilée**

1670-1750: G.Harrison (un *chronomètre* pour...les longitudes !)

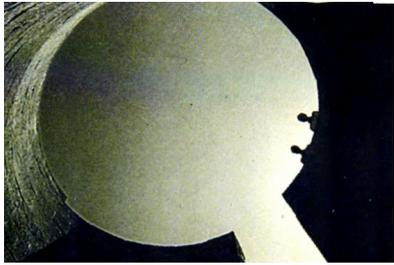
1660-1799: **Picard, Cassini, Delambre&Méchain**  
(la Terre passe sous la *toise*)

1793-99: Système "métrique" décimal  
(la Terre = *étalon* de *temps* et de *distances*)

1967-85: La "s" atomique puis le *mètre* dérivé de la **seconde**

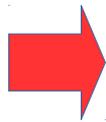


# Le coup de génie d'Erathostène...



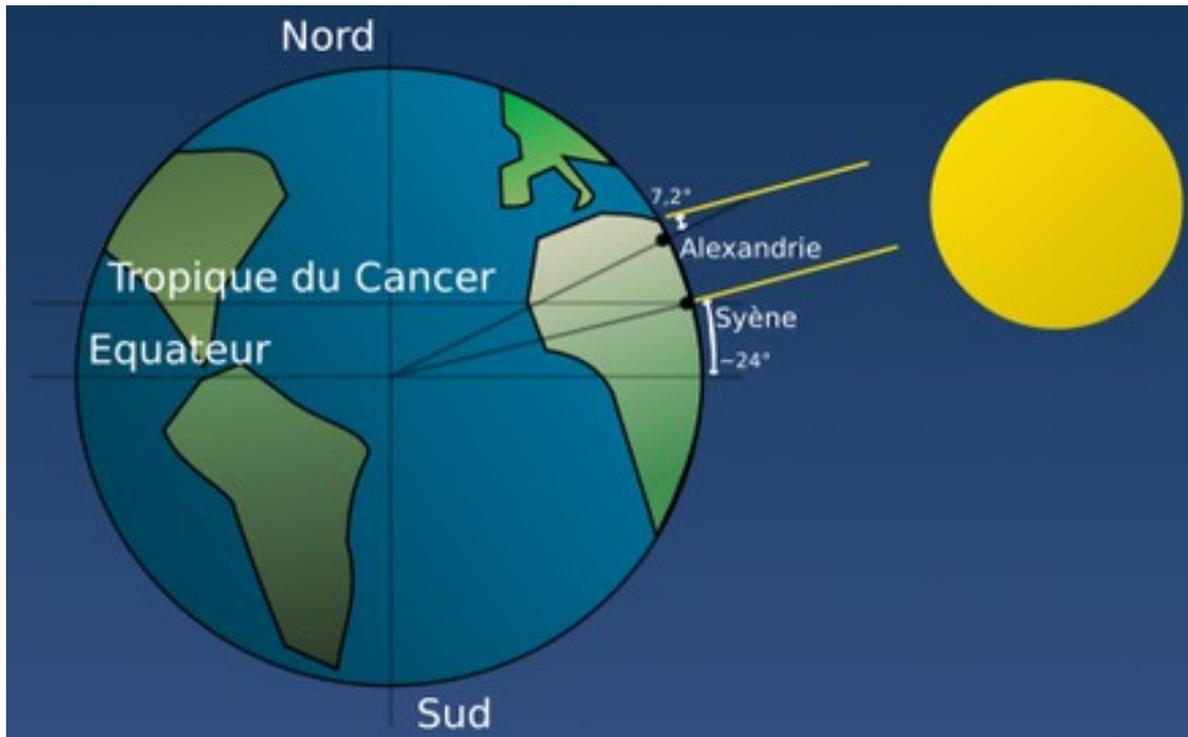
Au 1er jour de l'été:

- 1) Soleil vertical à Assouan (sur le Tropique)
- 2) ombre d'obélisque mesurable à Alexandrie



## La Terre forcément ronde !

(circonférence=250000 stades~40000 km)

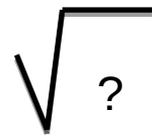


...allô les  
platistes?

# Rappel: physique du pendule

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

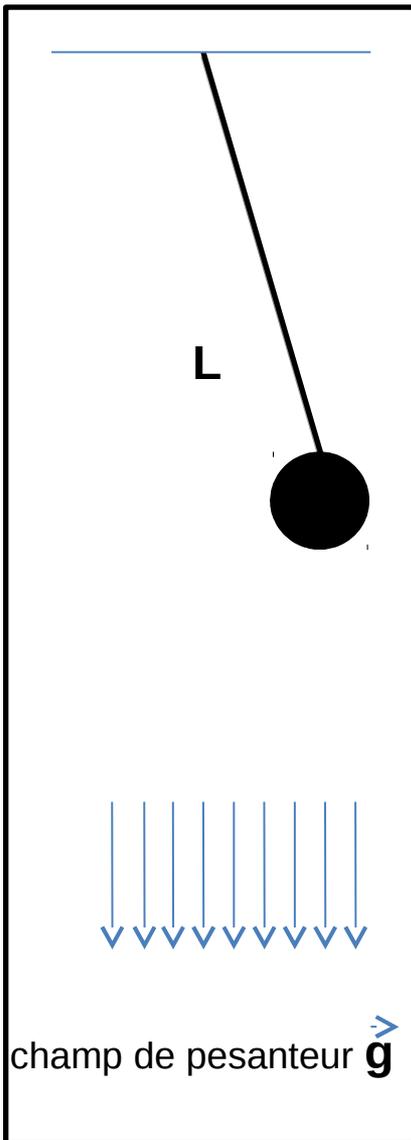
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$



Strasbourg:  $L=15 \text{ m} \rightarrow T=7,5 \text{ s}$   
(  $L \times 4 \implies T \times 2 \dots$  *bientôt !* )



➔ **seulement 2** paramètres:  $L$  et  $g$



# Ce tic-tac est-il vraiment "universel" ?

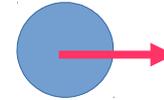


T dépend de "g"! =9,81 à Paris...  
mais "g" varie à la surface du globe !



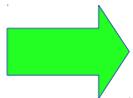
3-4 "g"

Newton traite les planètes en ramenant  
toute la masse en un point  $(F=G.M.M'/d^2)$



CEPENDANT:

- 1) masse de la Terre inconnue (la constante G aussi )
- 2) densité terrestre dépend du lieu (roches, eau, cavernes ...)
- 3) R de la Terre variable de lieu en lieu !

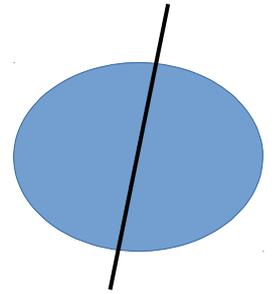


Sous Louis XV: expéditions Fr en Laponie/au Pérou  
pour mesurer  
-l'aplatissement aux pôles, donc  $g(R)$   
-les longueurs réelles de différents méridiens

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



# Picard: déjà l'Espace-Temps...



Le champ de pesanteur  $g$  est non homogène ?

➔ J.Picard se sert du pendule pour le cartographe !

Pendule oscillant très préférable à une chute libre !  
(lenteur + répétitivité)



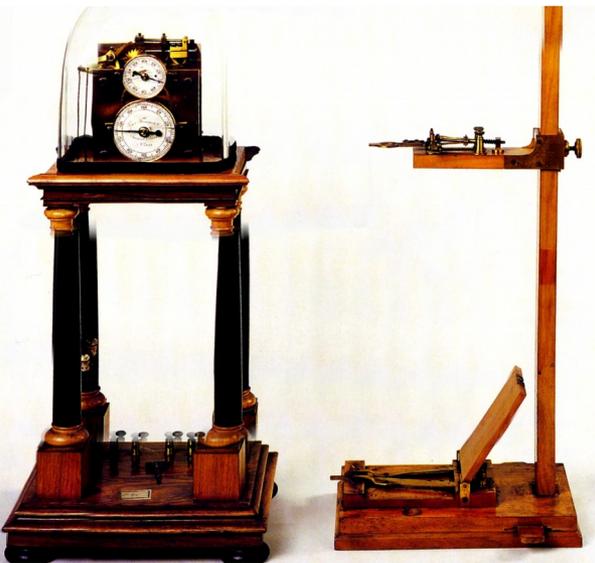
Les expéditions lointaines financées par Louis XV  
(Pérou...) auront deux familles de conséquences:



I) Géodésie !



II) Genèse du futur **systeme métrique** !



# La Physique : une science de la mesure

-Géométrie de Thalès: on ne divise que des quantités homogènes

-En physique, les « formules » ne sont vraies *que si*

1) on respecte des règles très strictes d'homogénéité avec le signe “=”

(**M T L sont irréductibles** : p.ex.  $E=mc^3$  ou  $E=m^2c^2$  sont impossibles)

2) on a précisé les unités

$$E=mc^2$$

?

Si  $c$  est mesuré en AL/an,  $c=1$  : → **E=m**

Si  $E$  est mesuré en cal: → **E=4,18 mc<sup>2</sup>**

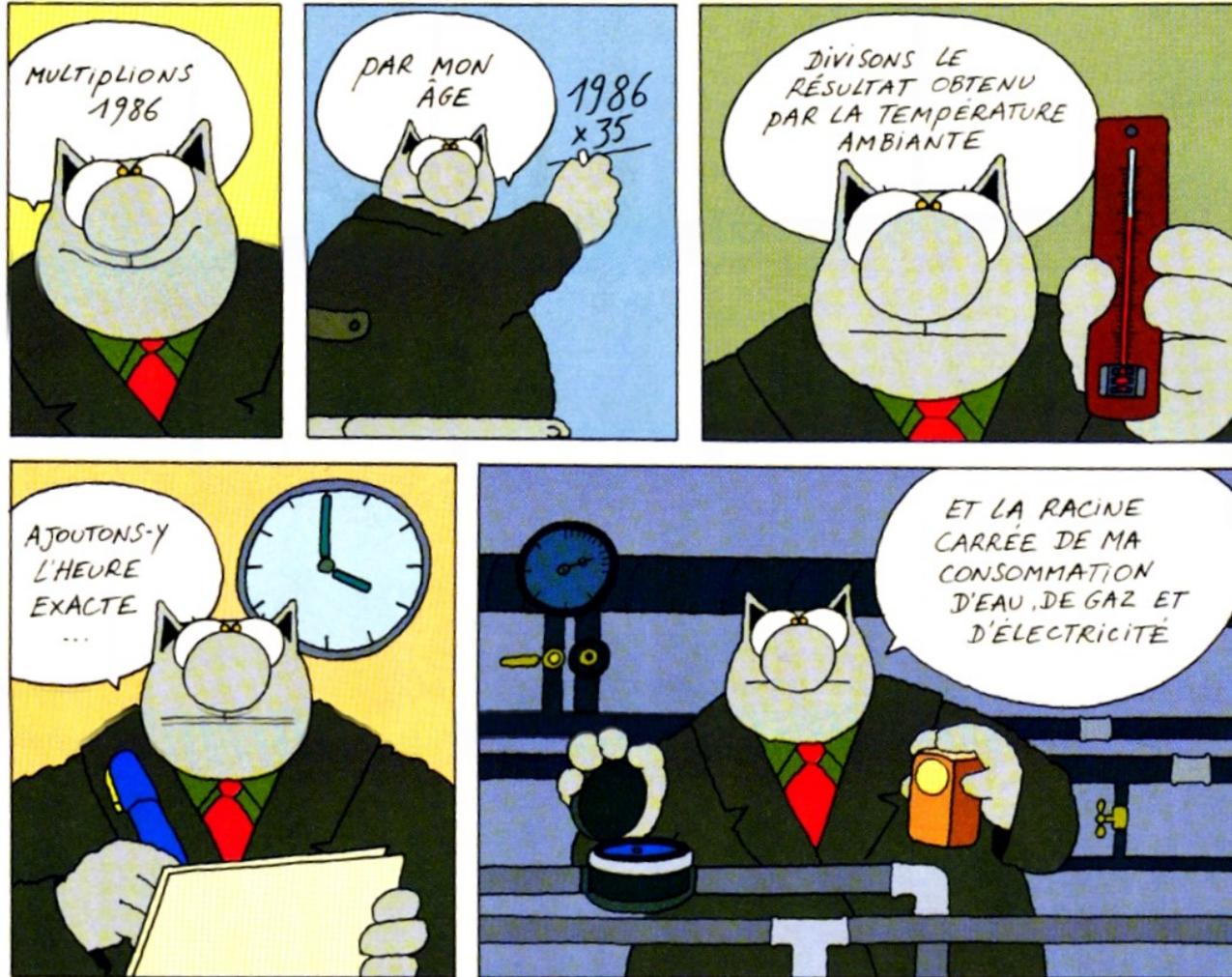
La physique est exigeante:

- définition de **grandeurs** pertinentes
- système d'**unités** cohérentes
- jeu d'**étalons** (primaires,secondaires)  
accessibles à tous les laboratoires



Le mètre de 1795

Si la discipline des physiciens vous rebute, essayez donc la non-cohérence...



En langage populaire: mélanger choux et carottes

# Unités de mesure ? *Tout* est **arbitraire** !



**Etalons** (= réalisations physiques) : **en évolution permanente !**

1967: fin du mètre physique en métal

1985: fin de la seconde =  $T_{\text{Terre}}/24/3600$

2019: fin du kg de platine de Breteuil !

-> 1 kg défini par la Balance du Watt (Kilby)...



# Harmoniser ? Tout un problème....

**Longueurs:** en France, le pied du Roi (Philippe le Bel), le pouce, l'aune, trois *lieues* nationales et **une toise différente dans chaque région !**

**Durées:** depuis Babylone LA TERRE sert d'étalon:

$$1 \text{ s} = 1 \text{ jour solaire} / 24 / 3600$$

Seule unité de **distance** calée sur LA TERRE:

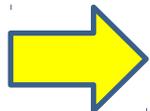
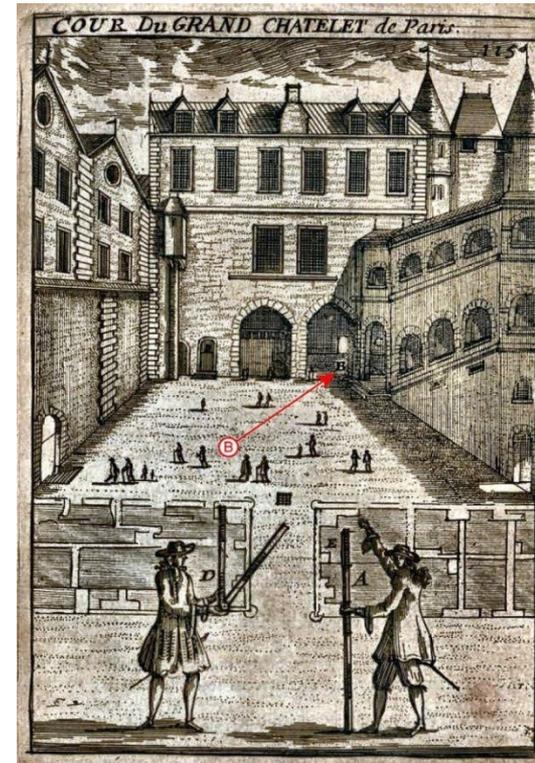
$$\begin{aligned} \text{"lieue commune"} &\Leftrightarrow 1/20 \text{ de } d^\circ \text{ d'arc} \\ &= 40000 / 360 / 20 \sim 5,5 \text{ km} \end{aligned}$$



Autre "unité": la *journée de cheval* (départements!)

Dans les métiers du bâtiment, les outils sont calés sur la **Toise du Châtelet**, l'ancêtre du mètre-étalon.

**1667:** Nouvelle "toise royale" (Colbert). Ne colle plus avec l'ancienne + effondrement au Châtelet + perte de la toise de Maupertuis...



**1735:** la **Toise du Pérou** devient la nouvelle norme nationale (80 copies envoyées à toutes les provinces)

# L'idée de Talleyrand: jolie, mais très prématurée...

Expéditions lointaines de l'Académie (Pérou, Laponie):

→ une oeuvre littéraire fameuse: *Candide*

+ naissance d'une nouvelle science : **GEODESIE:**  
Mesure des méridiens ( => "difformité" du globe ! )



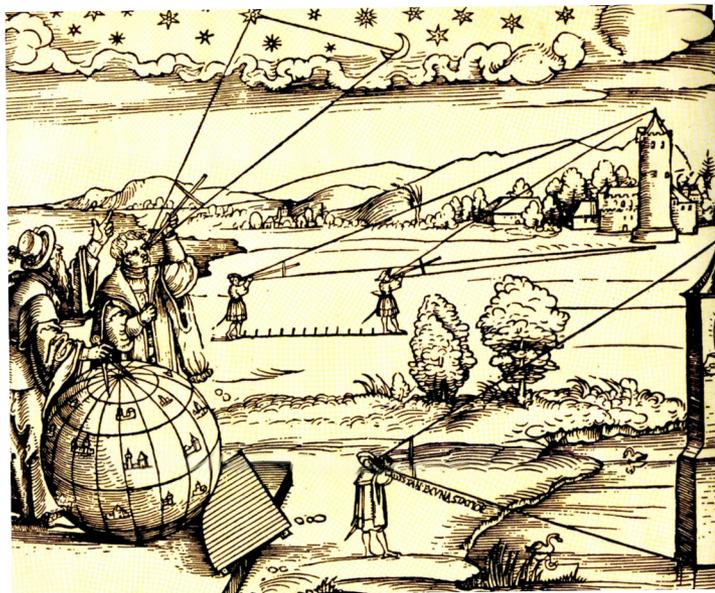
L'idée française de lier le **mètre** à la **seconde** est élégante  
(un seul artefact-étalon)

Problème: le "pendule qui bat la seconde" le fait  
différemment à Paris, Lima et partout sur Terre...

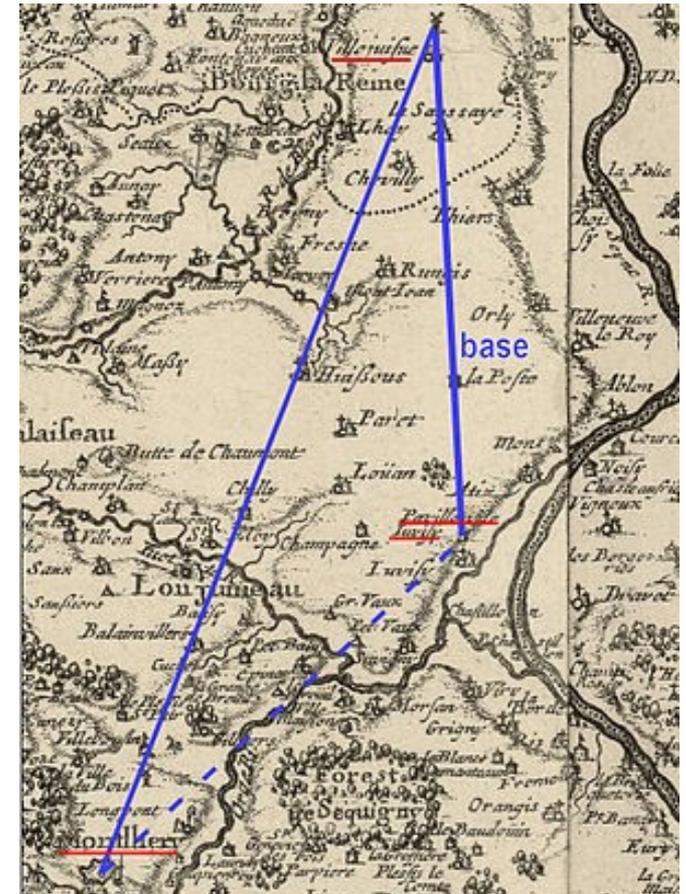
Cette idée très moderne aboutira seulement en **1985**, après  
l'invention de la Relativité et de la Mécanique Quantique..

(cf. conférence n°4)

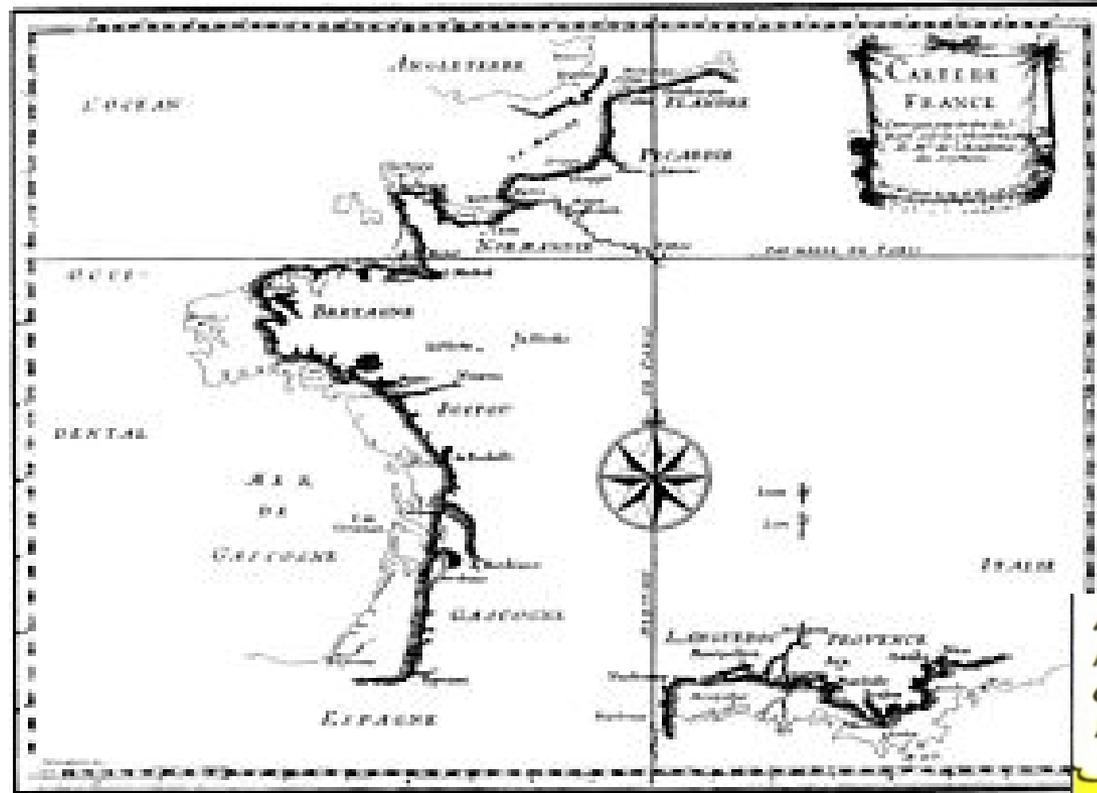
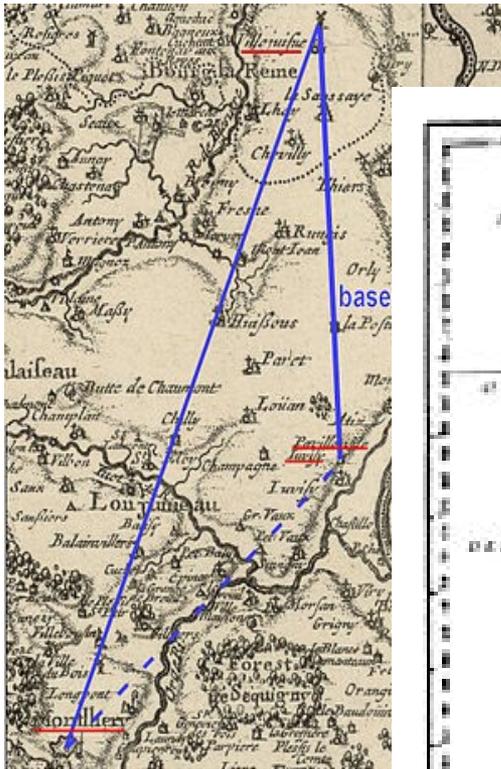
# Triangulations systématiques: débutent en fait sous **Louis XIV** (60 ans de mesures, 4 générations de Cassini)...



arbalète+  
sextant  
(théodolite)

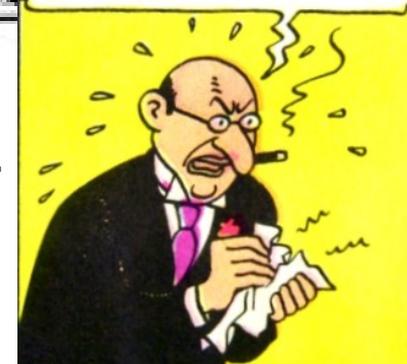


...avec parfois des conséquences **fâcheuses!!**



*Ah! les maladroits!  
Ils ont manqué leur  
coup!...Tout est à  
recommencer!*

La carte de J.Picard aboutit à **rétrécir** le royaume....



# Conséquences de fond (I)

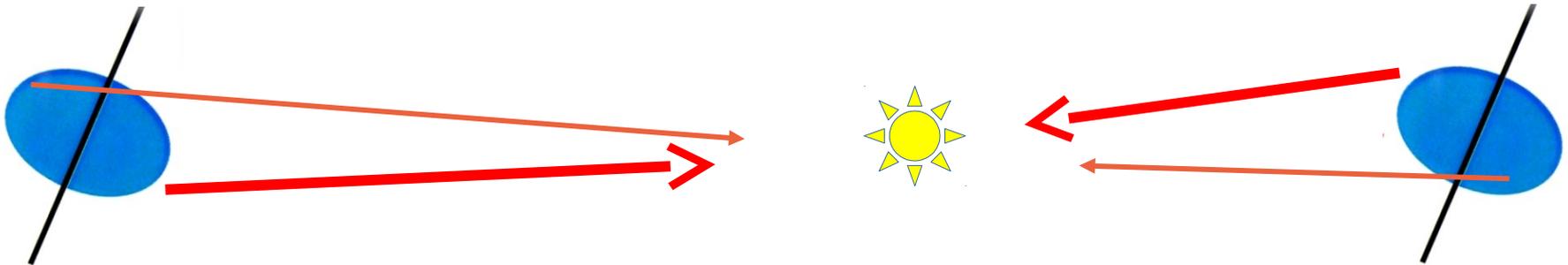
1) Les arpenteurs du globe sont formels:

la Terre n'est pas plate (OK) mais elle n'est **pas réellement sphérique** !

Moments d'inertie:  $I_3 < \{I_1, I_2\}$  : ~~“sphère”~~ → **pamplémousse...**  
(Pire encore:  $I_1$  diffère de  $I_2$  : pas de sym de révolution !)

Explication de la **PRECESSION DES EQUINOXES** (T=26000 ans)

(NB: Modèle de Ptolémée “sphère des fixes” : **aucune** explication !)

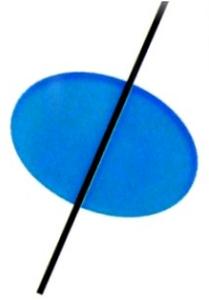


Cerise sur le gâteau: ce *mouvement de toupie* explique le mécanisme des **glaciations** passées et qui...reviendront !

(M.Milankovitch)



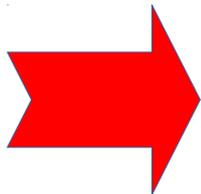
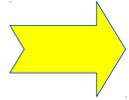
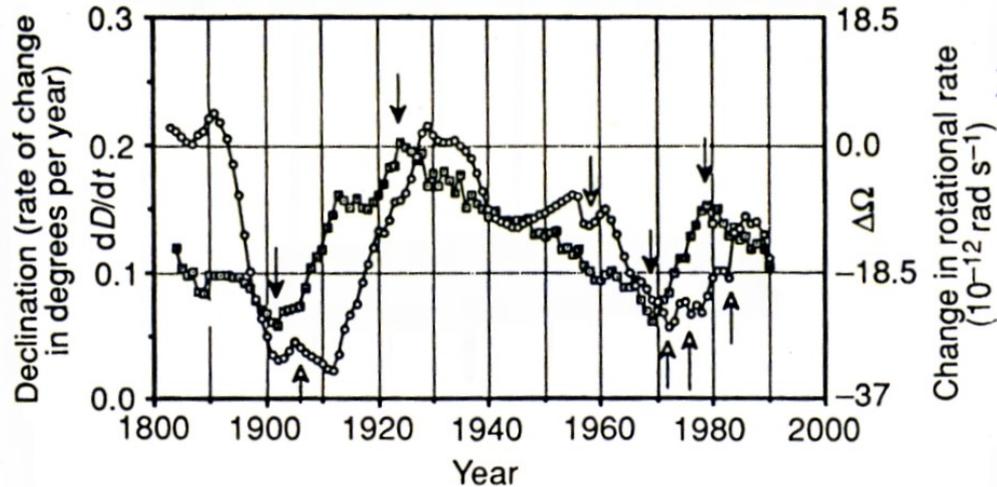
# Conséquences de fond (II)



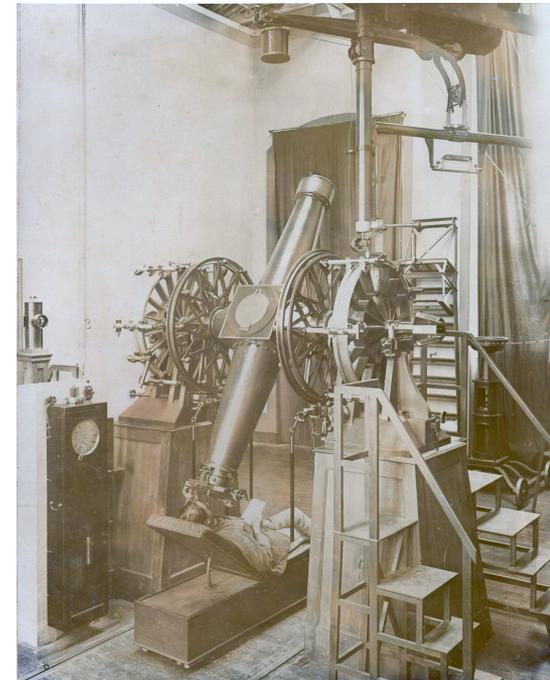
2) Le pamplemousse (asymétrique) n'est même **pas rigide** !

→ forme **changeante au fil du temps** !!

La cause: mouvements internes (noyau, manteau, croûte) + océans, atmosphère



Fin programmée du TU basé sur l'observation astronomique !

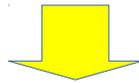


# Malgré le “pamplémousse”: le METRE, enfin....

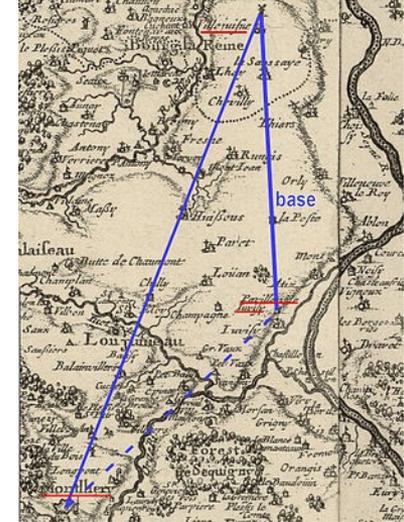
La Révolution tente d'abolir les anciens repères de **temps** et d'**espace**.

- Calendrier: semaine de 10 jours (Fabre d'Eglantine)
- Système des poids et mesures: haro sur l'Ancien Régime (et toujours UNE motivation principale : cadastre → impôt...)

Talleyrand propose le “**pendule** à la seconde”: **abandonné**.



Seul étalon “*universel*” disponible pour tous les humains:  
**la Terre\***



Delambre et Méchain reprennent les travaux des Cassini.

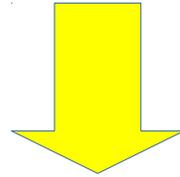
- **DIX ans** de triangulations → méridien de Paris, de **Lille à Barcelone** (!)
- *Milliers* de mesures!! → **K.F.Gauss** intervient avec l'outil statistique...

- D&M mesurent le diamètre terrestre en **toises** (WHAT ELSE ? !!)

→ **1799**: Définition du mètre: **pile 1/10000 du quart de méridien...de Paris\***

## Partie II

- 1799:** Le globe terrestre sert maintenant d'étalon de **durées** et de **longueur**.
- 1804 : Napoléon crée l'Ecole Polytechnique, la France à l'avant-garde de la science européenne (Laplace, Biot, Lagrange, Champollion...)
- 1815:** En France, "Restauration" (de l'ordre ancien)  
→ Galilée reste un hérétique (1870: dogme de l'infaillibilité papale...)



**1850:**  
La *réalité* du  
**mouvement de la Terre**  
fait encore et toujours  
**débat** (!!!!!)

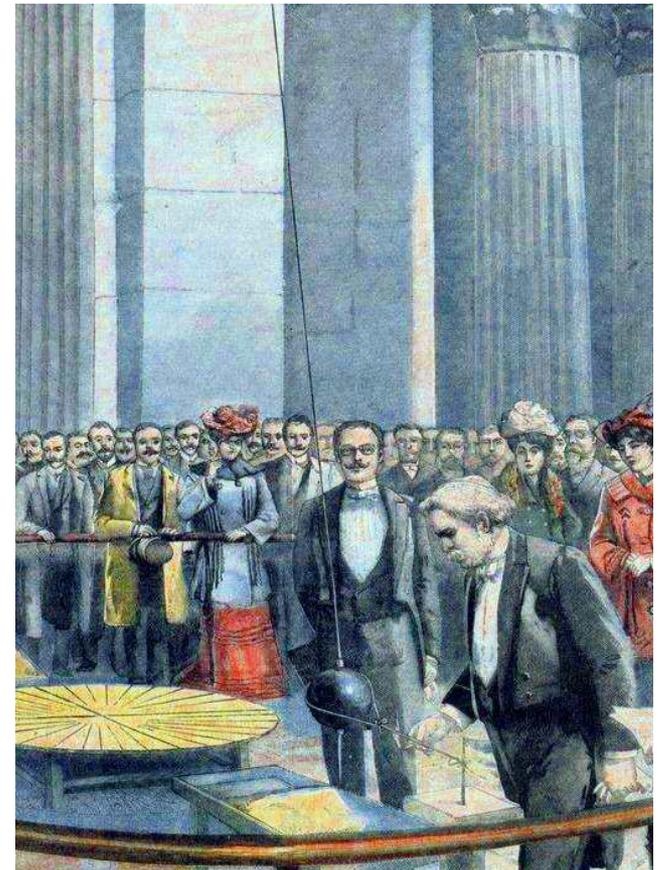


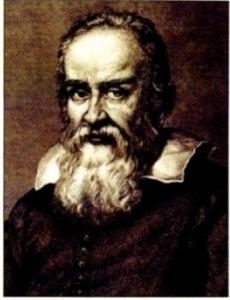
Avant son coup d'Etat de décembre **1851**, Louis-Napoléon Bonaparte se présente comme un ardent **républicain** (*Victor Hugo, Napoléon-le-Petit*).

L'église du **Panthéon** est *désacralisée* par la II République...

Nef de **80 m** de hauteur : idéale pour accueillir la

**1ère expérience de physique  
pour le grand public !**

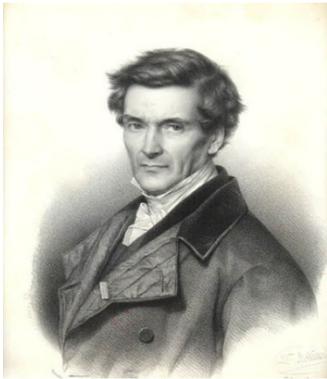




**Référentiels « galiléens »**  
=seuls postes d'observation  
légitimes (sinon: F d'inertie..)

*Suggestion: jouer à des jeux de balle  
sur un manège tournant...*

**SI** elle tourne, la Terre  
n'est **PAS**  
un référentiel galiléen !!



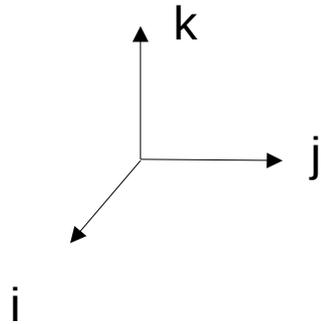
**G. Coriolis**, ingénieur de la marine, météorologue.  
Etudie l'effet de la rotation de la Terre  
sur les courants atmosphériques (1835)



**Léon Foucault**, astronome à l'Observatoire de Paris.  
Etudie *dans sa cave* rue d'Assas  
l'effet de la rotation de la Terre sur...

...**le pendule** (1850)

Encart technique:  
le produit **v**ectoriel

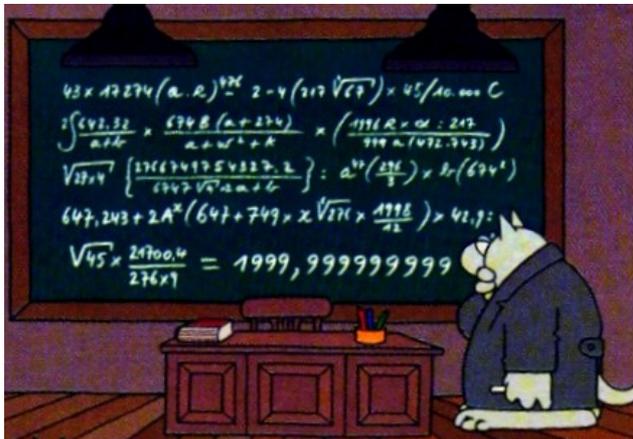
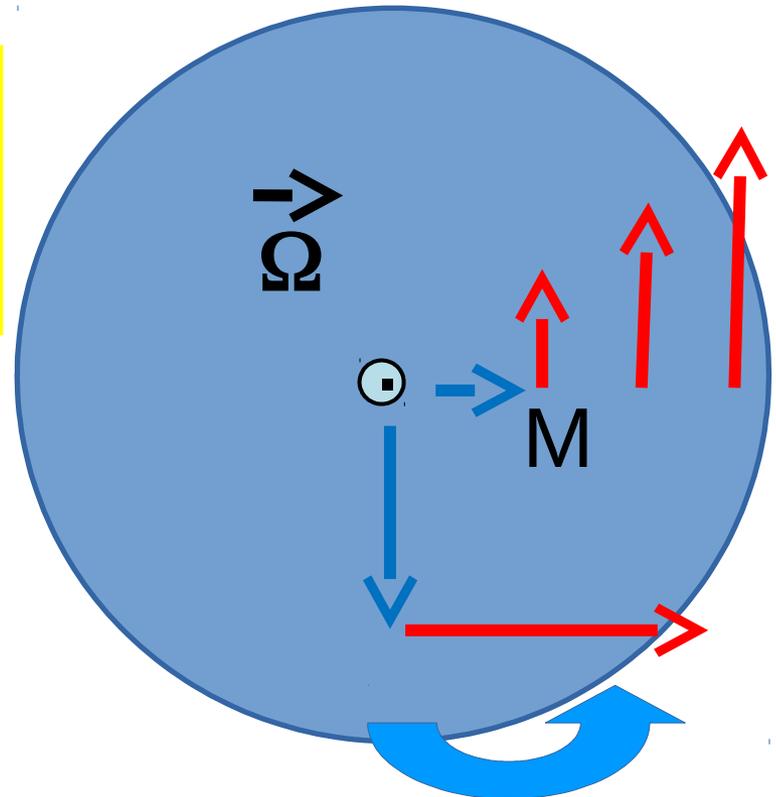


$$\vec{i} \times \vec{j} = \vec{k}$$

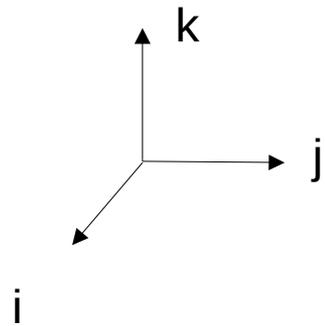
Exemple: **solide en rotation**.  
Le champ des vitesses est  
donné par le produit vectoriel

$$\vec{v}(M) = \vec{\Omega} \times \vec{OM}$$

Le résultat du produit vectoriel  
est **ORTHOGONAL**  
au plan des deux vecteurs



# Encart technique: le produit vectoriel

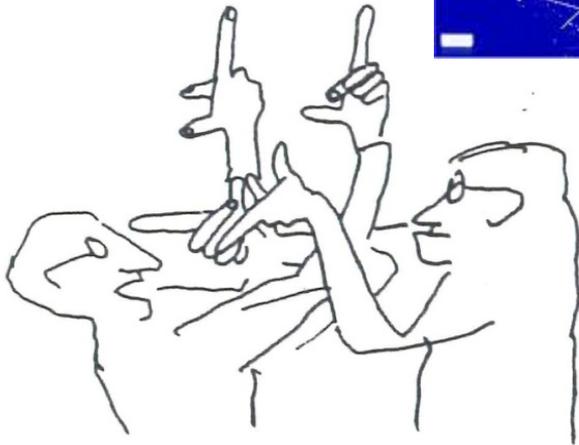
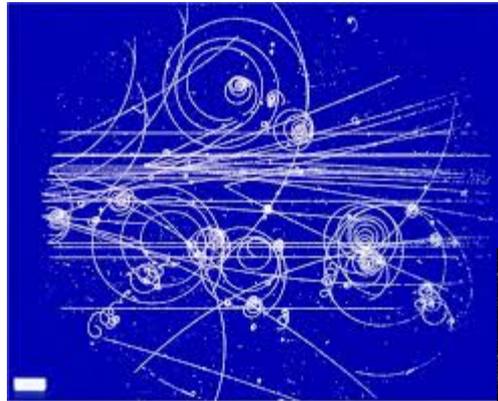


Le résultat du produit vectoriel est **ORTHOGONAL** au plan des deux vecteurs

Exemple: F magnétique donnée par le produit vectoriel



$$\mathbf{F} = q\mathbf{V} \times \mathbf{B}$$

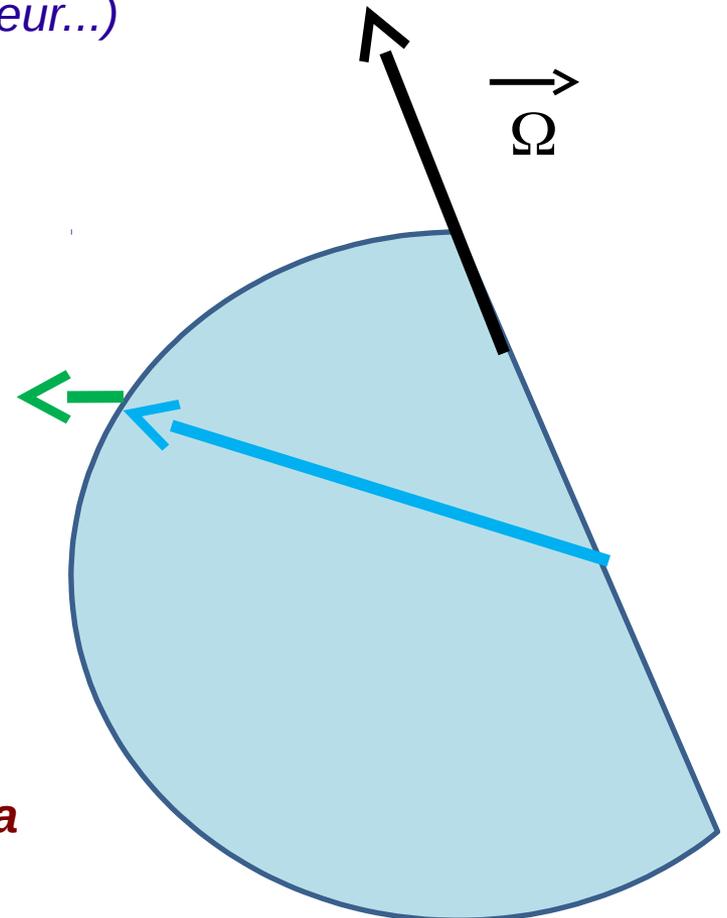
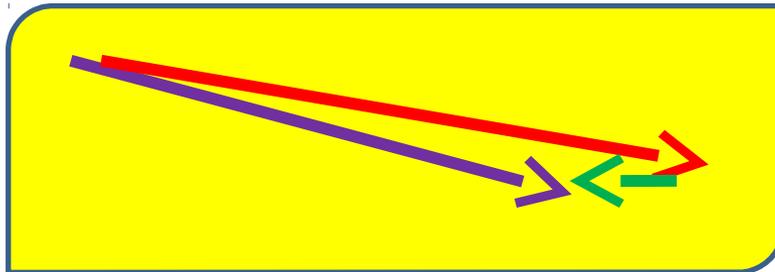


MAQNETIC DISCUSSION

# Sur Terre (référentiel tournant), les deux “forces d’inertie” se calculent avec un produit vectoriel

1. Observateur Statique: (**la verticale**=le fil à plomb)  
ne pointe PAS vers le centre de la Terre  
*(et on se sent plus léger à l'Equateur...)*

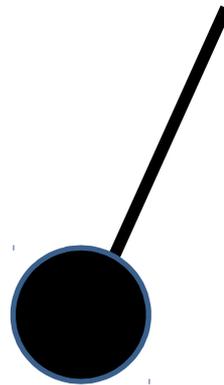
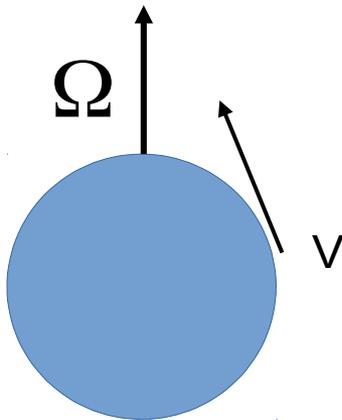
$\vec{g}_{\text{local}} = \vec{g}_{\text{vers Centre}} - \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{OM})$



*(entre nous: heureusement que la Terre ne tourne pas plus vite....)*

# Sur Terre (référentiel tournant), les deux “forces d’inertie” se calculent avec un produit vectoriel

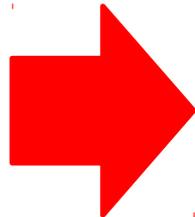
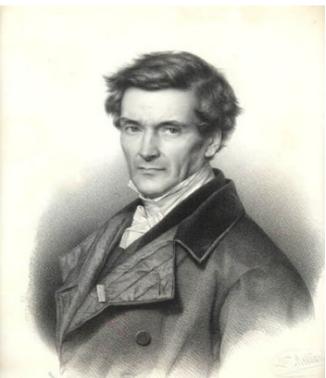
2. *Mouvement sur Terre*: apparition d’une force d’inertie **TRANVERSE**  
(à essayer: jonglage sur un manège en rotation...)



Terme de Coriolis:

$$- 2\vec{\Omega} \times \vec{v}$$

ORTHOGONAL  
au plan du mouvement !



Tout mouvement **à la surface** de la Terre est **dévié**  
a) vers sa droite (hém.Nord)  
b) vers sa gauche (hém Sud)

# Panthéon de Paris, 31 mars 1851



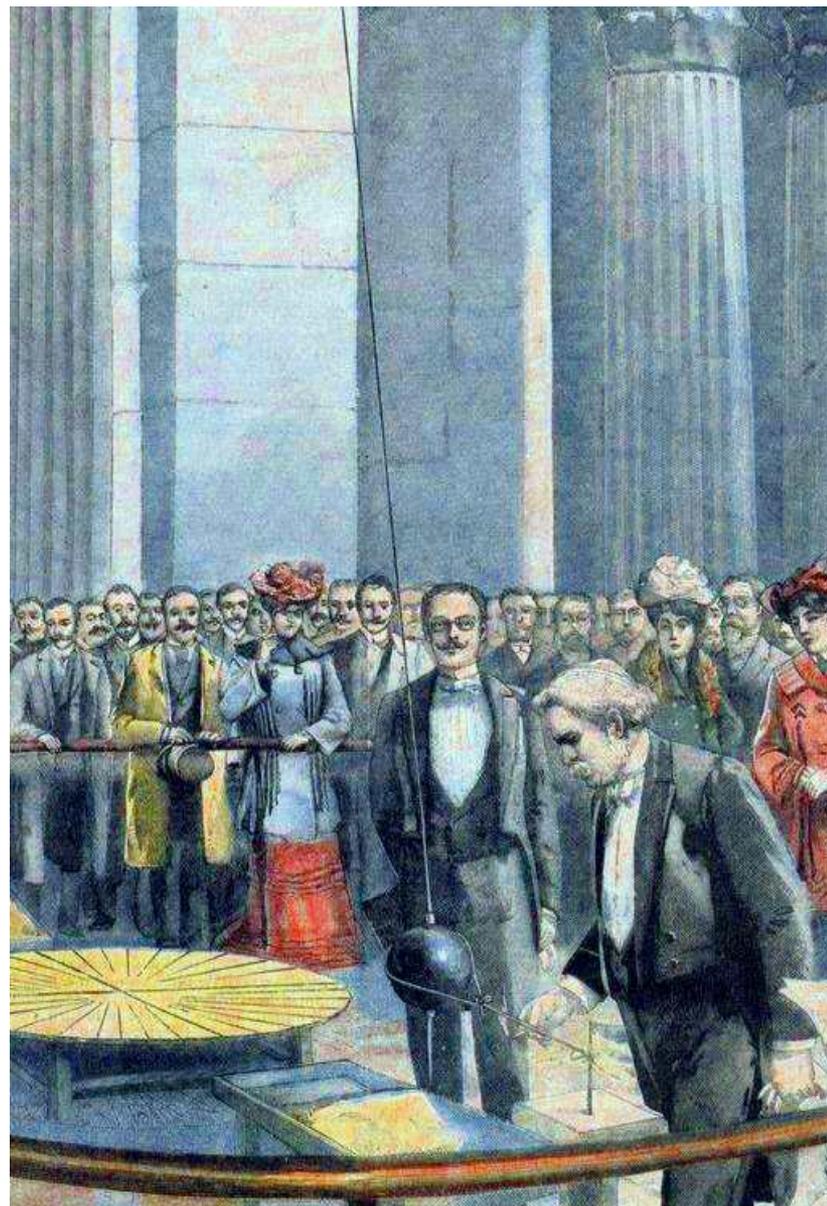
“Le mouvement se développe avec calme, il est fatal, irrésistible. On sent qu’il n’est pas au pouvoir de l’expérimentateur d’en hâter ni retarder la manifestation. Tout homme mis en présence du fait demeure pensif et silencieux, et quand il se retire, il emporte par-devers lui un sentiment plus vif de notre incessante mobilité dans l’Espace”

*Léon Foucault*

**Été 1851** (on est encore en République):  
installations géantes à NY, Dublin, Londres, Rio...

Décembre 1851: coup d’Etat, le Panthéon  
est rendu au culte catholique

1855: Exposition Universelle (→ Musée Arts&Métiers)



**MANIP !!!**



# 1995: retour du pendule au Panthéon



$L=67\text{m}$  →  $T=16\text{ s}$  : déviation latérale de  $2.5\text{ mm}$  à chaque aller-retour !

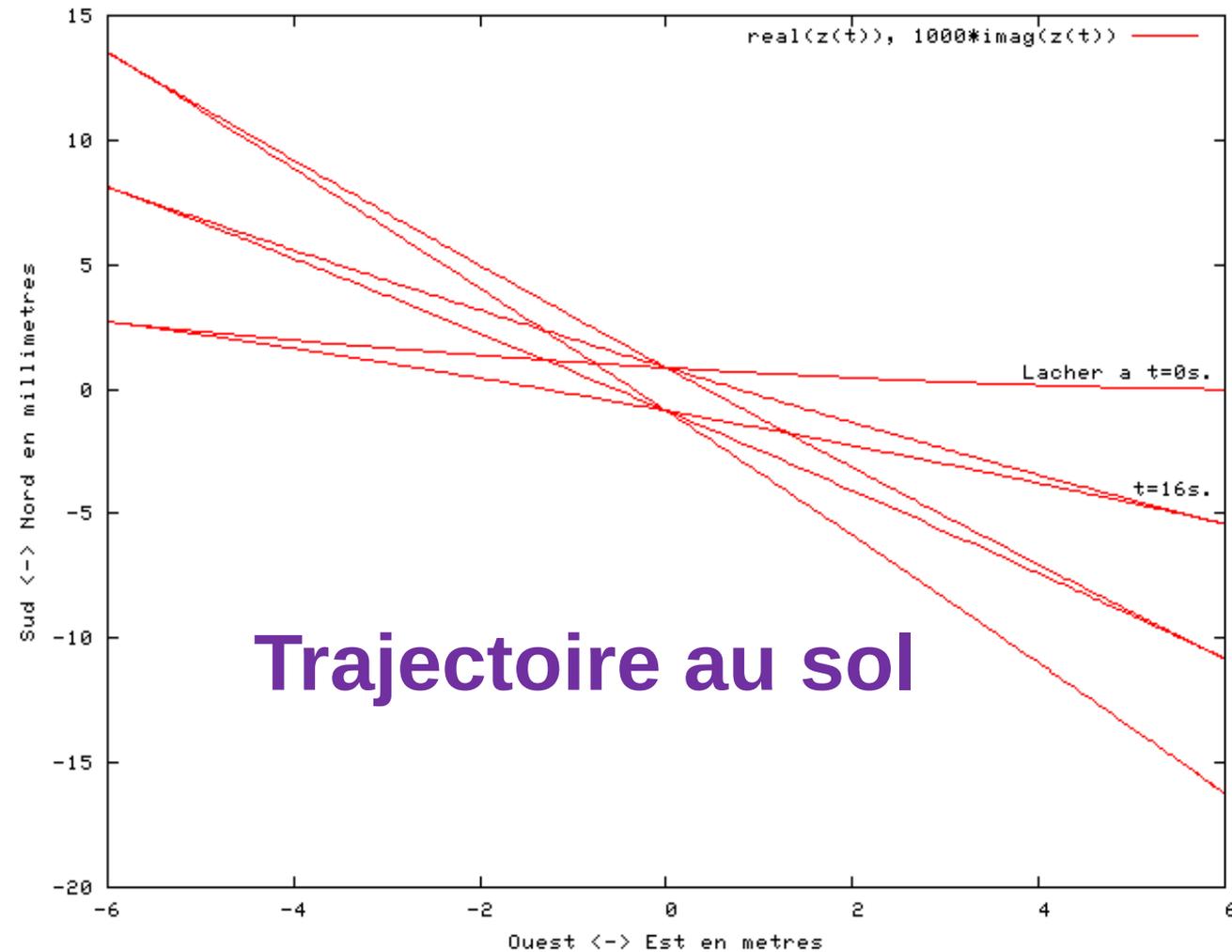
**Durée pour un tour complet du plan d'oscillation ?**

Le calcul donne: **24h / sinus (  $\lambda$  )**

à Strasbourg  
( $\lambda = 48,573^\circ$  N):

**~ 32 heures**

(5,6° en 30 min)



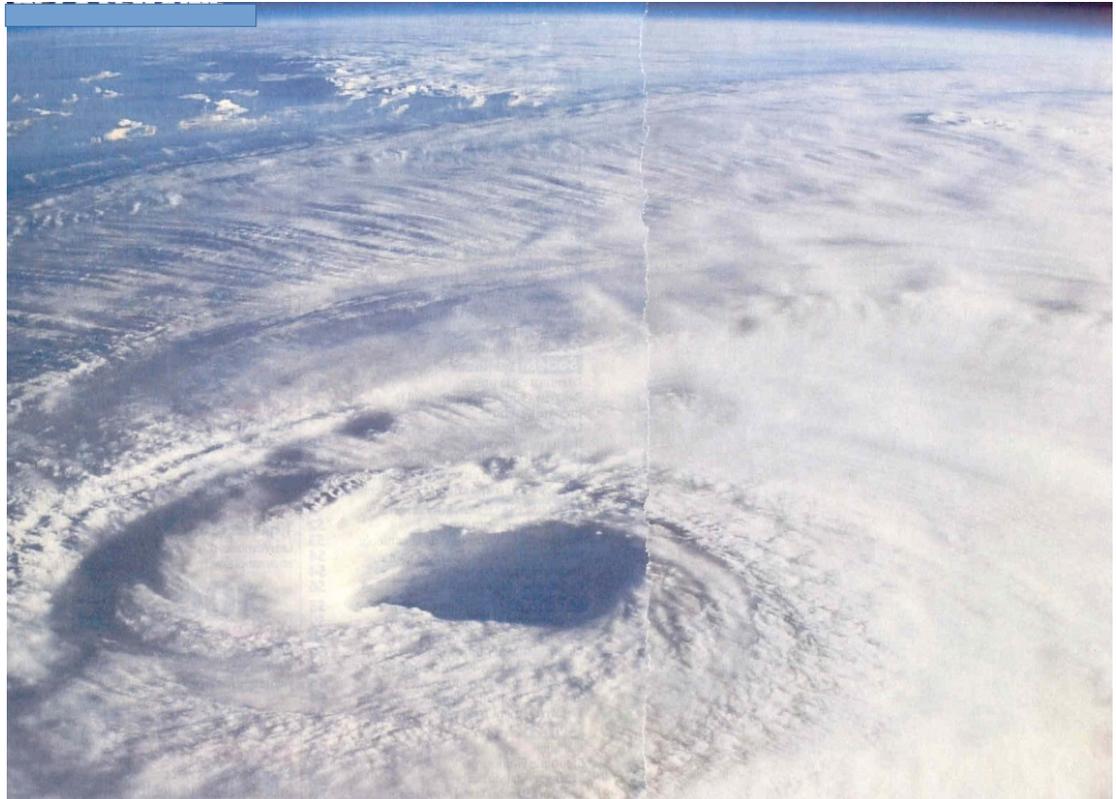
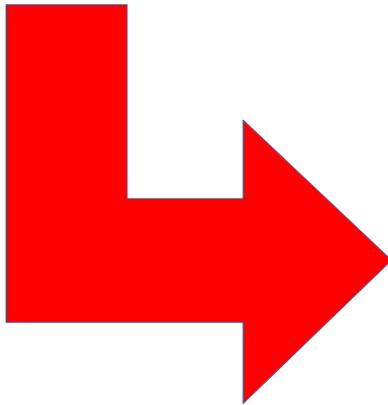
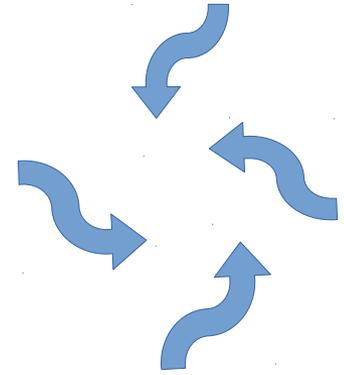
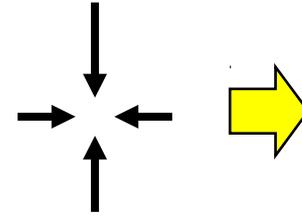
# Coriolis à grande échelle (1)

## Mécanisme des cyclones:

Océans chauds

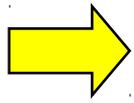
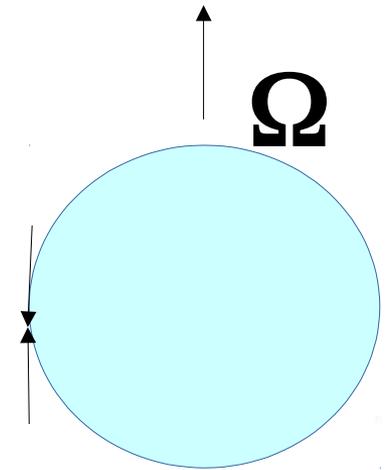
- ascendances verticales (cellule de Hadley)
- points de basse pression qui attirent les vents
- → convergence des vitesses, mais...

**...défléchies à droite ! (comme le pendule)**

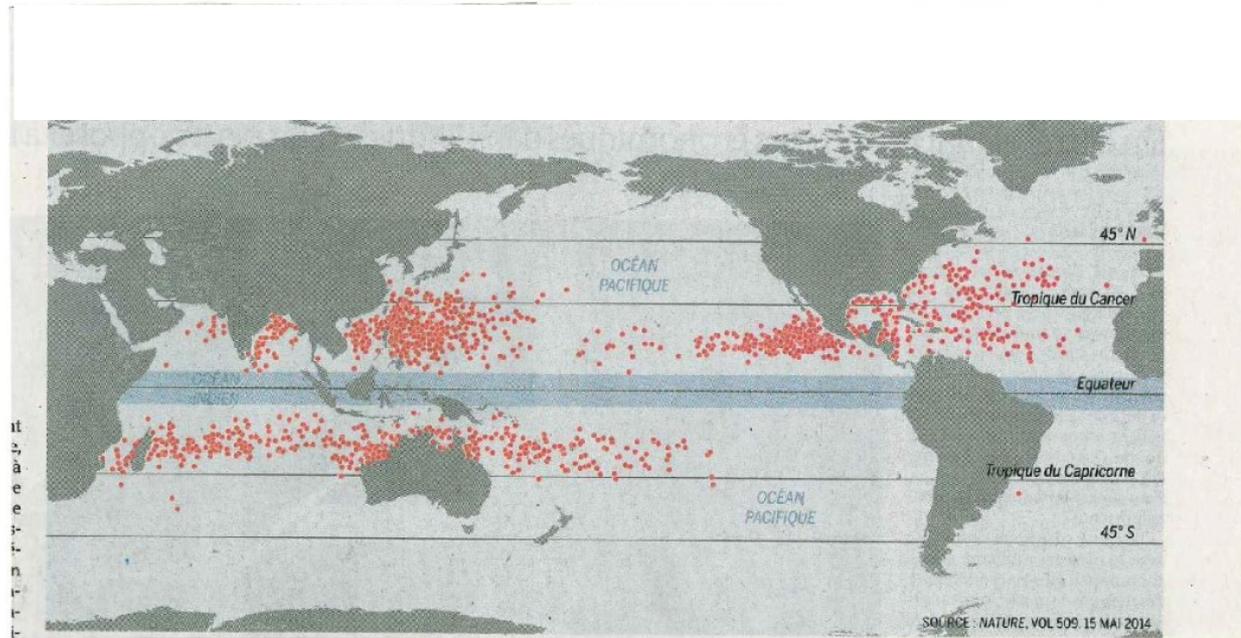


## Coriolis à grande échelle (2)

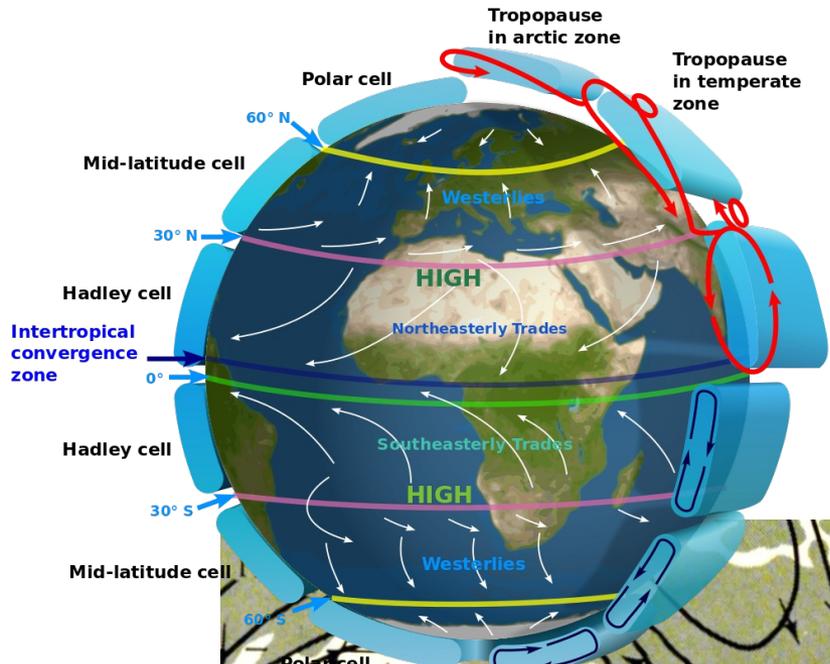
- La déviation de Coriolis est un **produit vectoriel** !
- **Pile sur l'Equateur**:  $V$  vents = cellule Hadley  
→ → l'effet de Coriolis est **NUL**



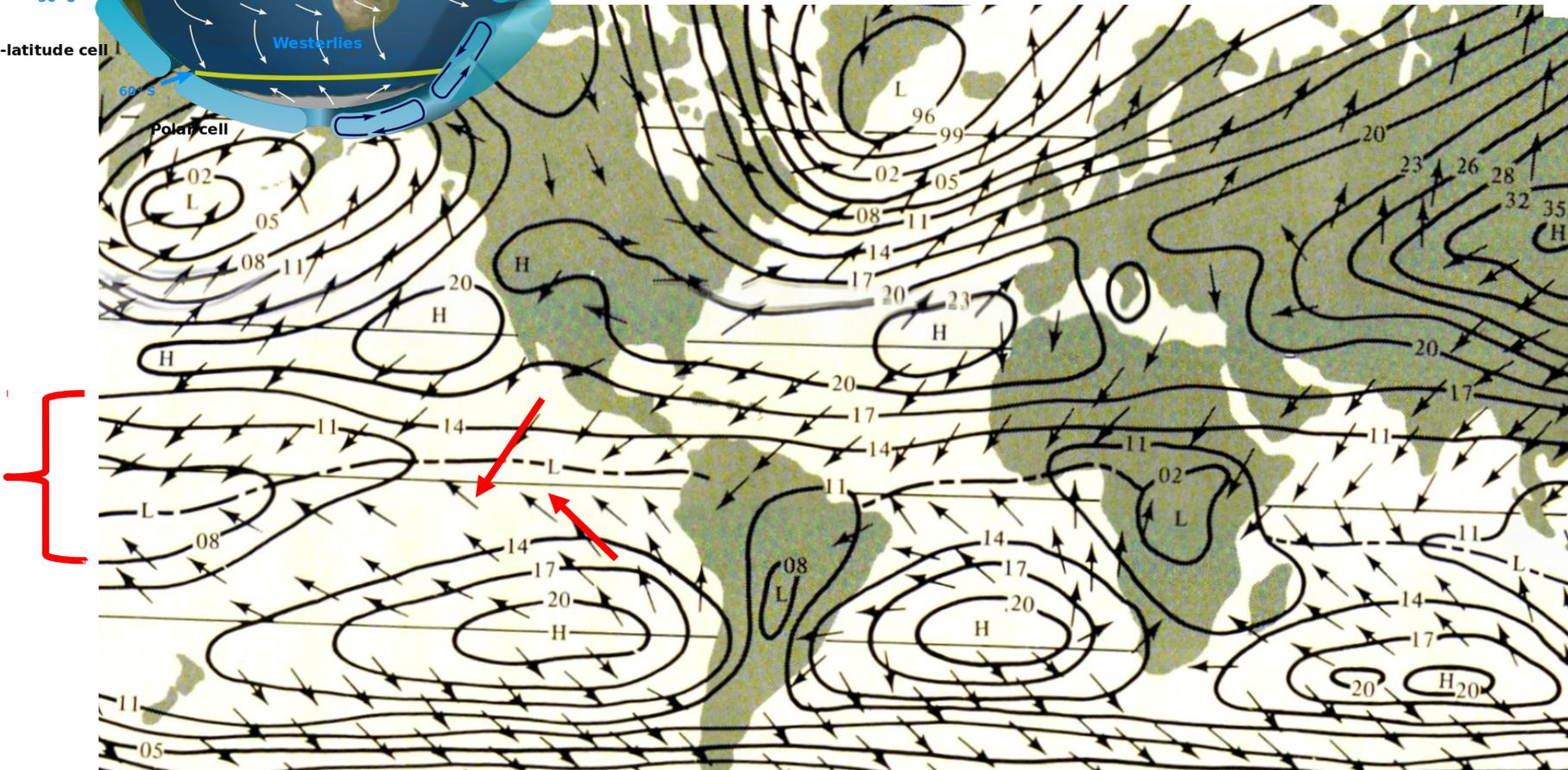
L'explication de Coriolis prédit que tous les **cyclones** sont concentrés dans la **zone INTERTROPICALE....**



# Coriolis à grande échelle (3): vents d'alizés



cellule de Hadley



# Coriolis à TRES grande échelle (4)

*(et ailleurs que sur Terre...)*

cyclones  
"perpétuels"  
sur Jupiter,  
Saturne...



# Foucault, saison 2

Malgré le succès mondial de l'expérience de Foucault, les grincheux (platistes, fundamentalistes) **contestent** encore la réalité de la rotation de la Terre (!!)

“ Propriété (inconnue) des pendules ?? ”



Léon Foucault retourne dans son laboratoire et revient avec un...gyroscope !

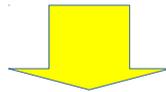


# Que dit le gyroscope ?

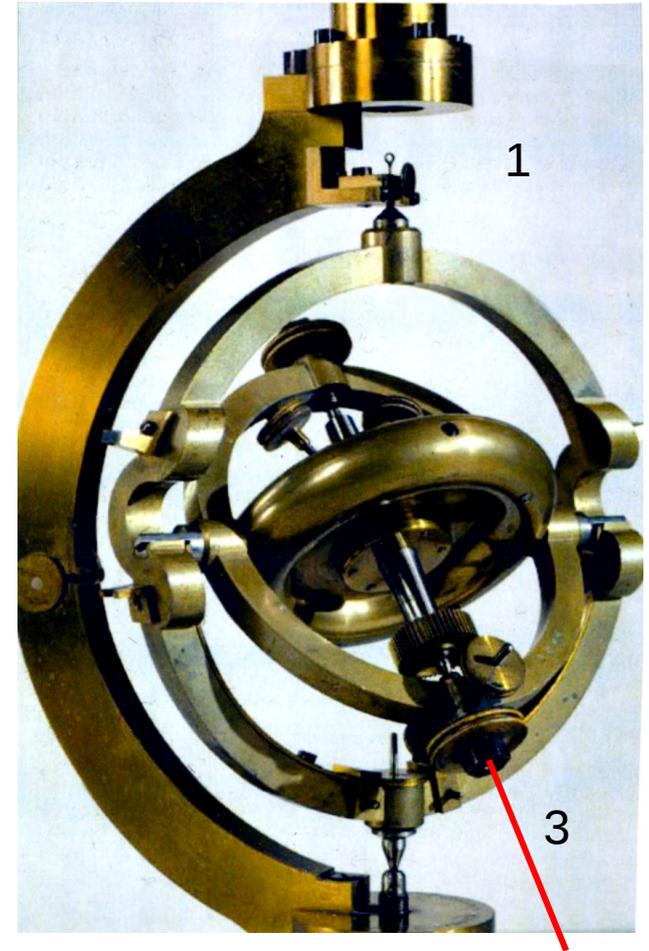
Avec une suspension 3D “type **Cardan**”,  
**l'axe** de rotation 3 du gyroscope est  
complètement **libre** de toute tension.

Observations:

- Axe 1 fixe (référentiel du labo)
- Lente rotation de l'axe 2 / axe 1...  
 $T_{\text{obs}} = 23\text{h}56$ , et *sans effet de latitude*
- L'axe 3 garde une direction fixe/cosmos...



C'est le laboratoire qui tourne,  
entraîné par...la TERRE !



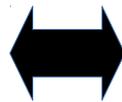
*Fin de la discussion ? Presque.....*

Sérieusement  
maintenant !



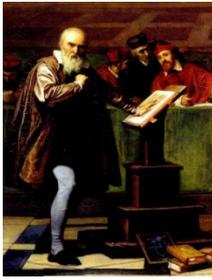
La Terre est-elle  
**RELLEMENT**  
en mouvement ?

$$\begin{aligned} X_t &= R \cos(\omega.t) + X_s \\ Y_t &= R \sin(\omega.t) + Y_s \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} X_s &= -R \cos(\omega.t) + X_t \\ Y_s &= -R \sin(\omega.t) + Y_t \end{aligned}$$

Stricte **équivalence** du point de vue **cinématique**....

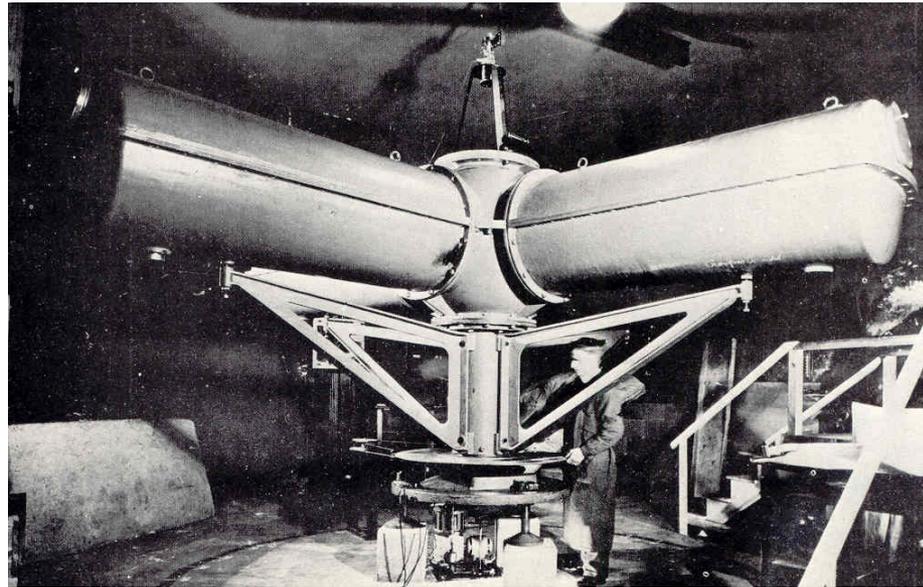


Rotation propre



Mouvement **orbital** / Soleil

1881



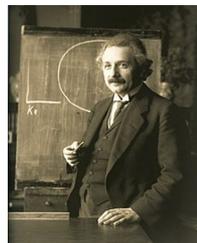
A. Michelson *croit* échouer (ne **détecte** pas de mouvement) :  
En fait, il oublie le Principe de Relativité (de Galilée)

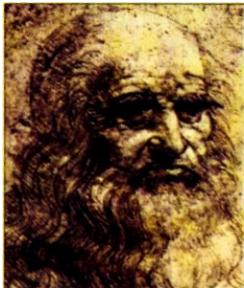
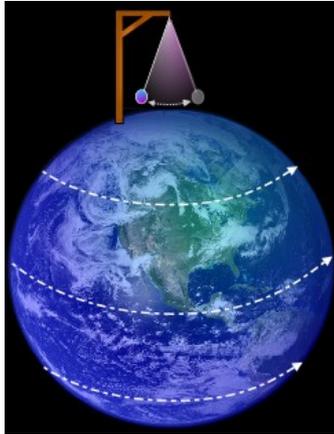


*Solution stupide: prendre la Bible "à la lettre" (créationnisme)*

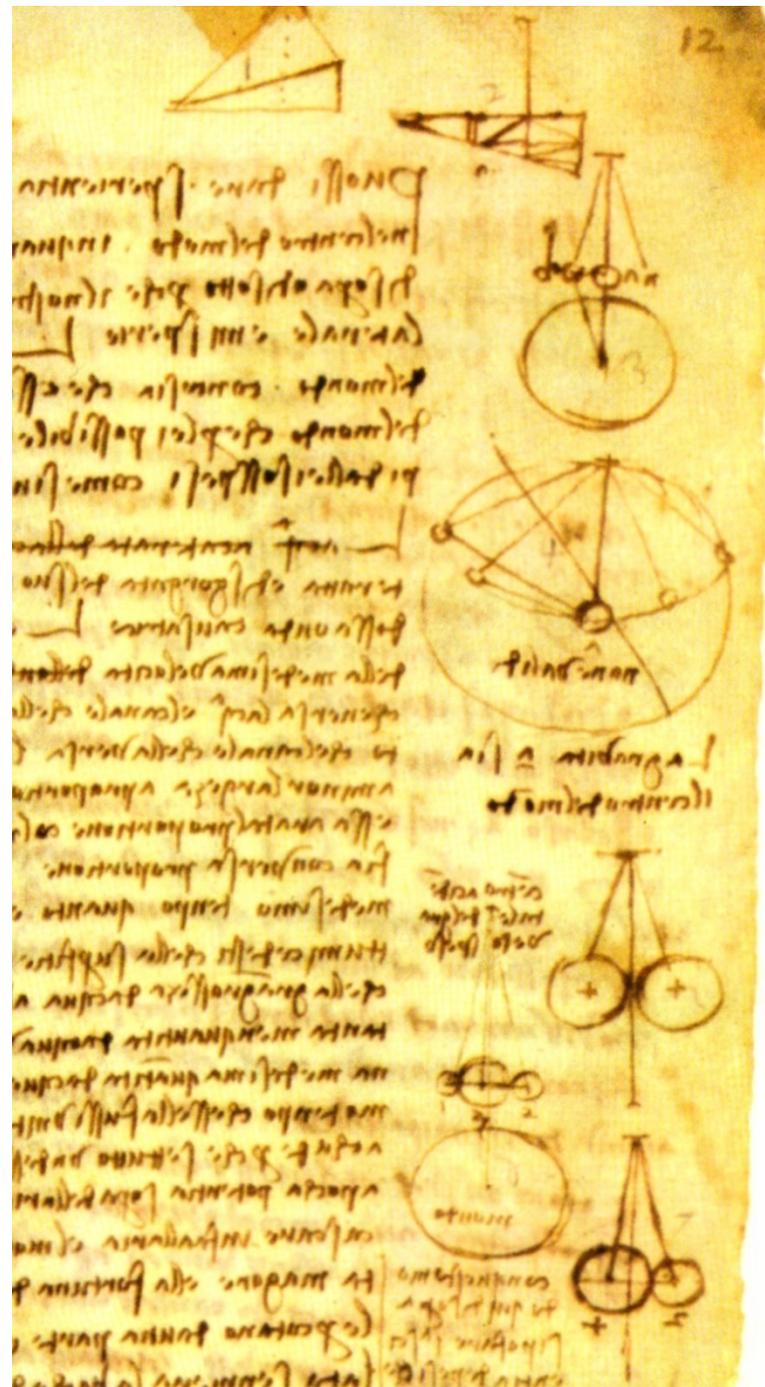


Solution correcte: **attendre le Chapitre 4...**

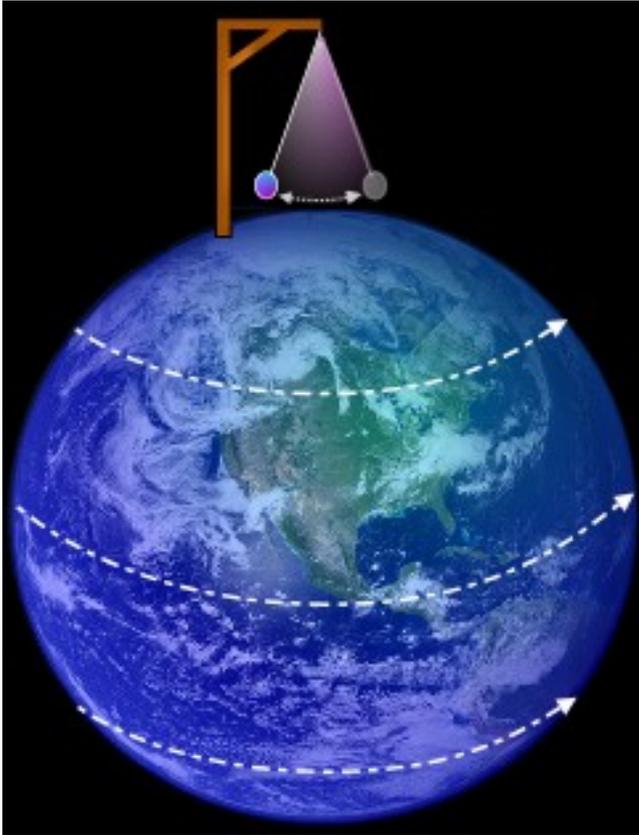




~ 1480  
un précurseur ??



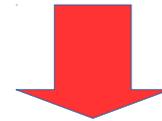
# Le pendule au pôle Nord: vertige de l'infini



Au pôle, la notion de force de Coriolis semble inutile: il suffit de dire que la Terre tourne “sous” le pendule sans l’affecter (simple “inertie”).

Mais alors: **vers quoi** pointe le plan d’oscillation ?  
Axe Nord-Sud ? Etoiles “fixes” ??

En réalité RIEN n’est fixe !

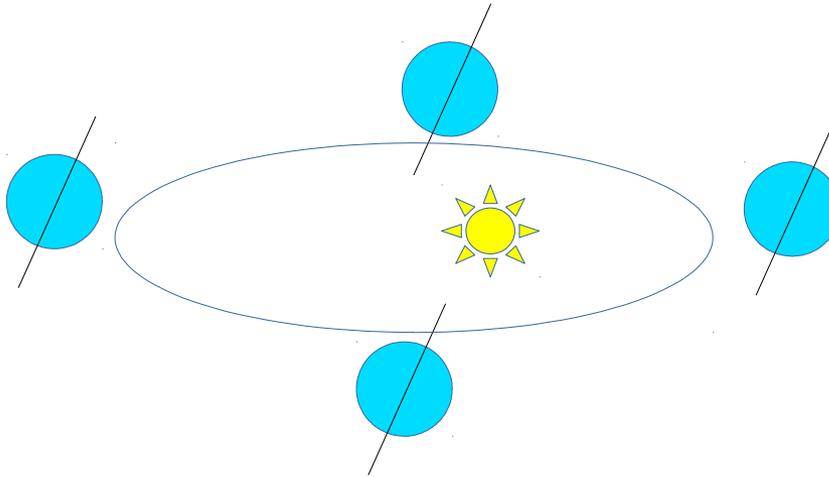


1) “Etoile Polaire” ?? état très provisoire...

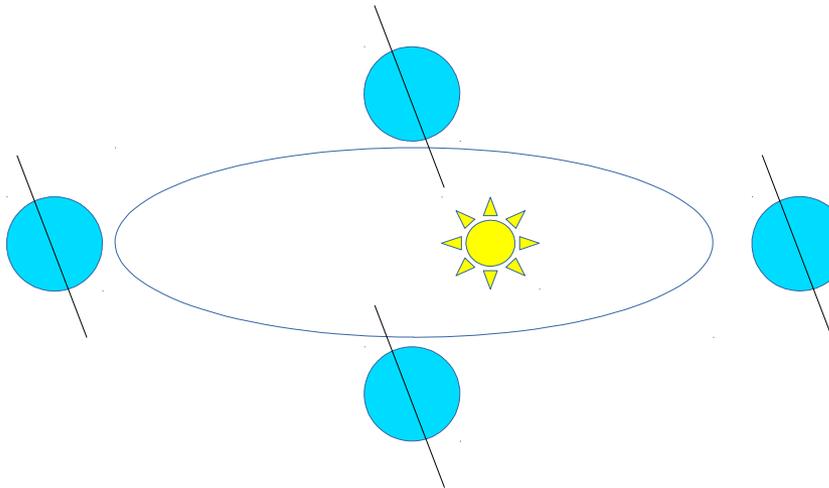
2) Les constellations se déforment à l’échelle du MA, car toutes les étoiles proches tournent autour du TN Sag A\* (centre de la Galaxie)

# 1) La prétendue “étoile polaire” n’est **pas** un vrai pôle Nord céleste !

Auj:



dans  
13000  
ans



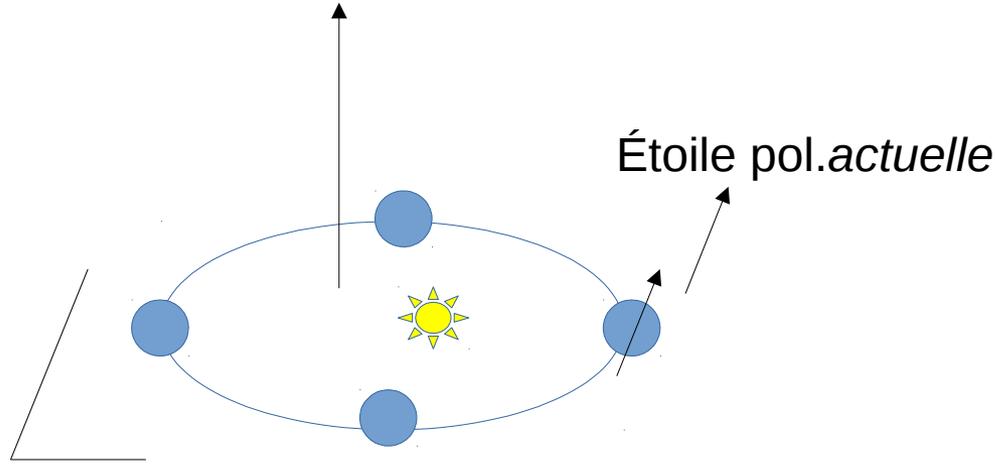
Précession des  
Equinoxes !

*Hipparque de Nicée  
(127 av. JC)*

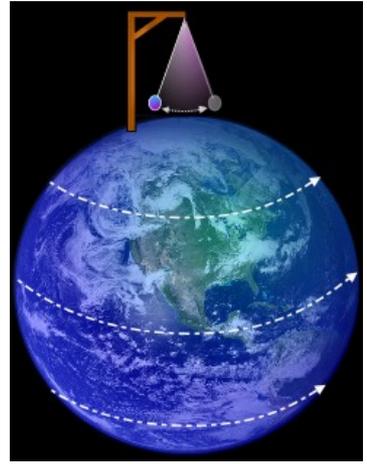


A l'échelle de 26000 ans,  
la constellation du DRAGON  
est le vrai "pôle nord" de  
l'Ecliptique

- le vrai "plan fixe" ne passe pas par la Petite Ourse
- l'axe du **gyroscope** de Foucault pointe en vrai vers *delta-draconis*

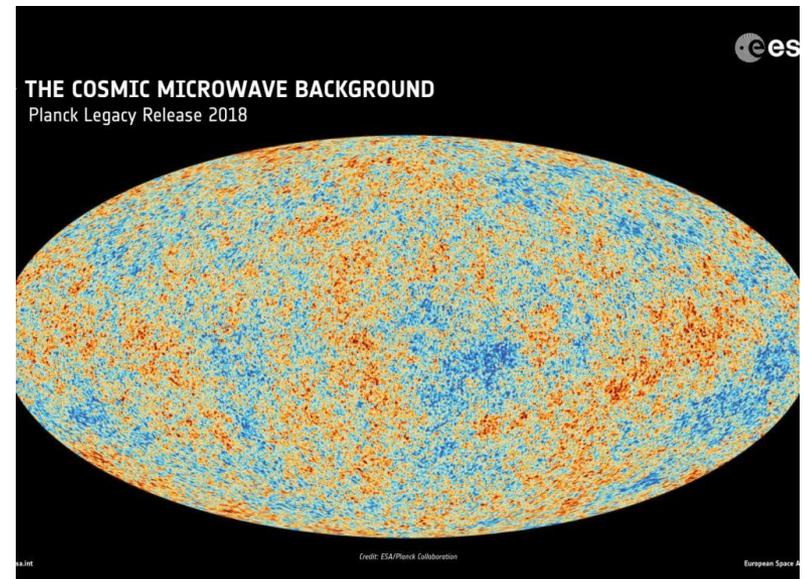
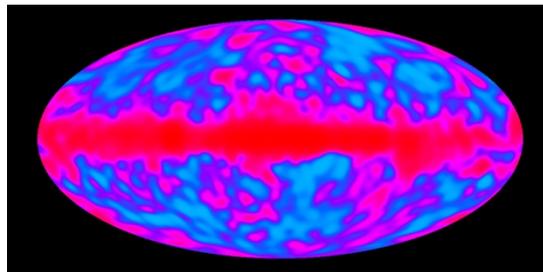
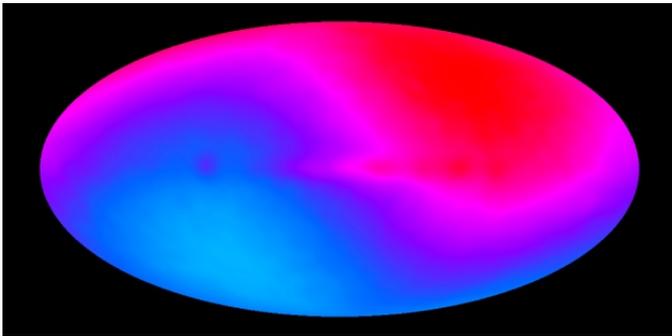


Plan  
écliptique



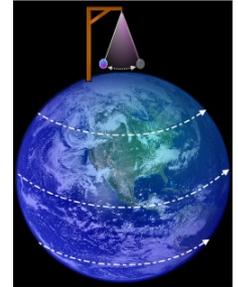
## 2) Les “étoiles fixes” n’existent pas !

Les images sensationnelles du CMB de COBE/WMAP/Planck doivent être corrigées du **dipôle fondamental**, témoin du mouvement du Soleil / CDM des galaxies du Groupe Local

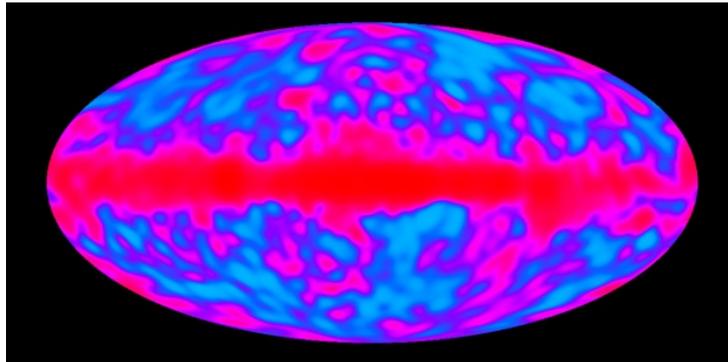
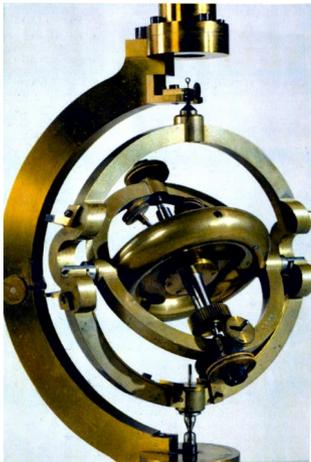


# Conclusion

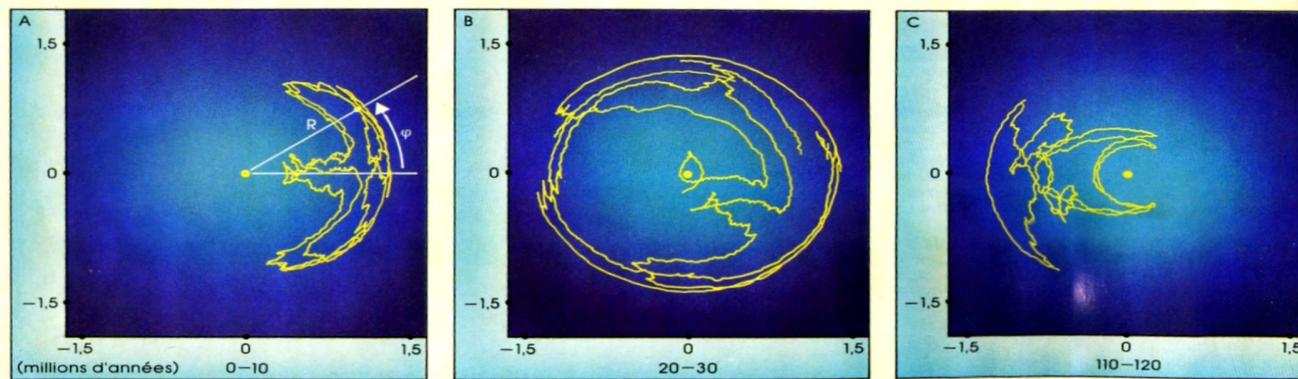
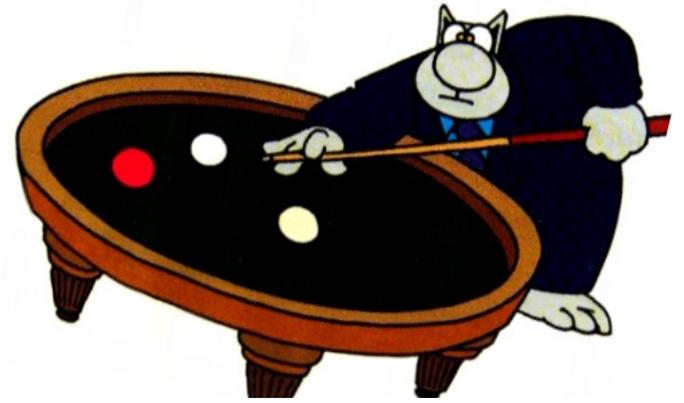
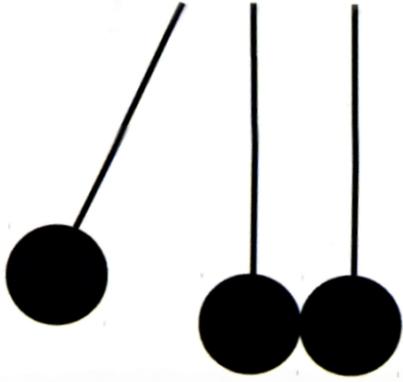
Le pendule de Foucault, si simple en apparence, nous projette:  
- dans les **espaces cosmiques** (qu'est-ce qui est **“fixe”** ?)  
- dans les **durées cosmiques** (26000 ans pour commencer..)



..puis, *in fine* vers l' <<instant>> du **découplage** lumière-matière (380000 après le “début” de l'histoire du cosmos) dans la bulle de rayonnement micro-onde ( $T_{\text{actuelle}} \sim 3^{\circ}\text{K}$ ) qui remplit l'Univers...

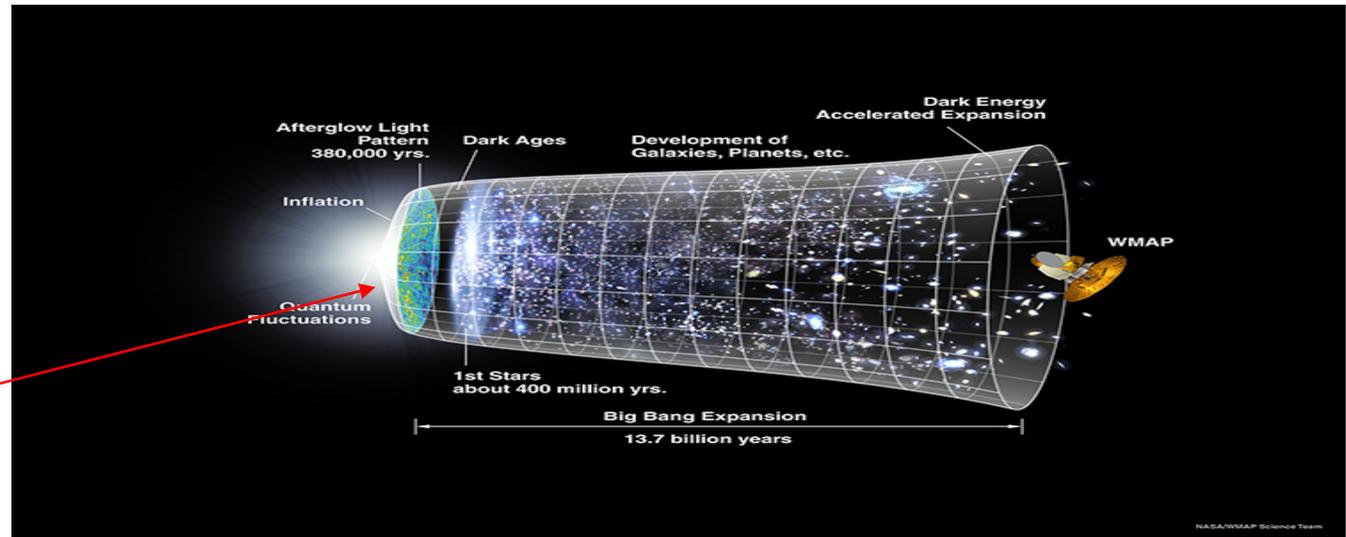
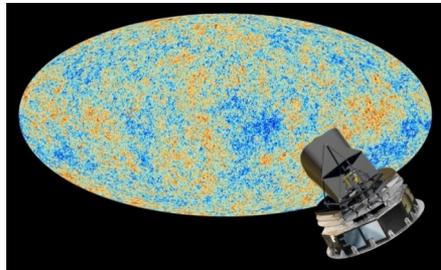


Next  
week...



irréversibilité et chaos (même dans les pendules !)

# Digressions cosmologiques.....



→ t(s)



Même si on adopte la projection mentale (naïve) d'un axe des temps continu de  $t=0$  (!) à aujourd'hui, il faut mentionner **sept** points très très très critiques...

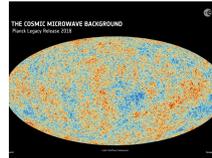
les 3' très fameuses



$t < 0$

$t = 0$

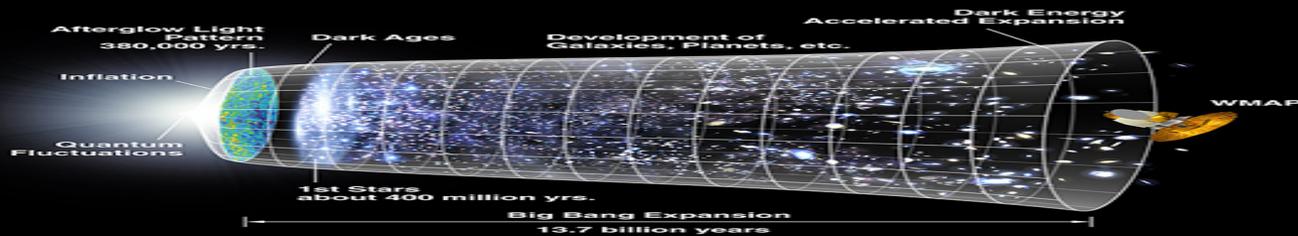
$t_p = 10^{-43}$  s



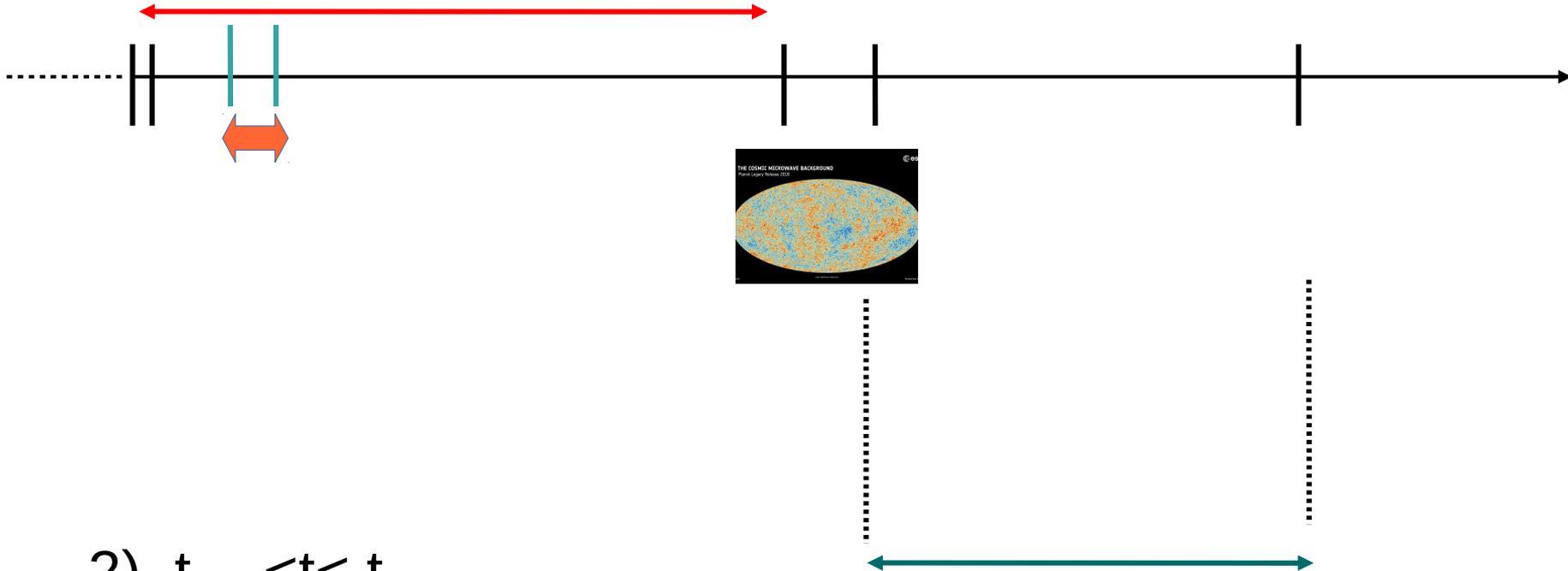
$t_{\text{CBR}} = 380000$  "ans"  
( $T \sim 3000$  °K)

$t_e$

1ère étoile



- 1)  $t < t_{\text{CBR}}$
- l'U est un plasma chaud et opaque
  - rien ne sera jamais directement "visible"
  - $\{^2\text{H}/^1\text{H}; \text{He}, \text{Li}\}$  /  $\nu$  / ondes G primordiales?

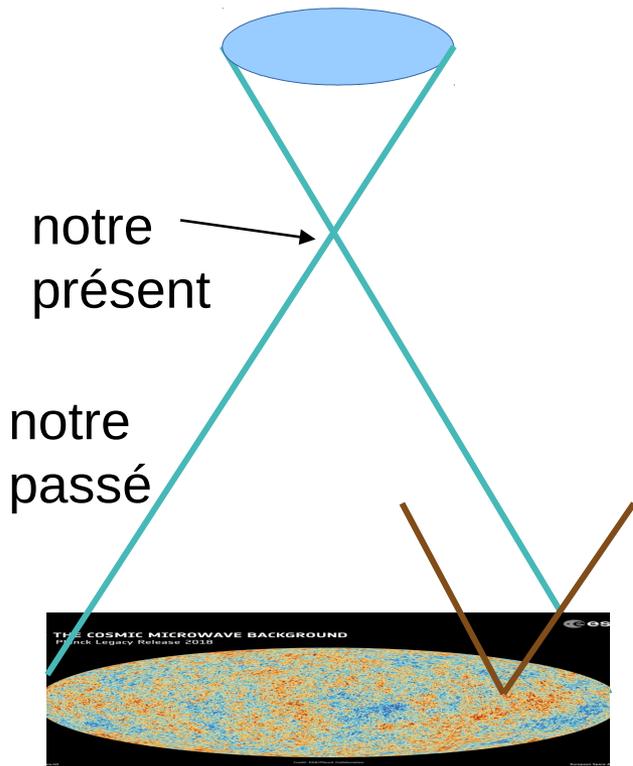
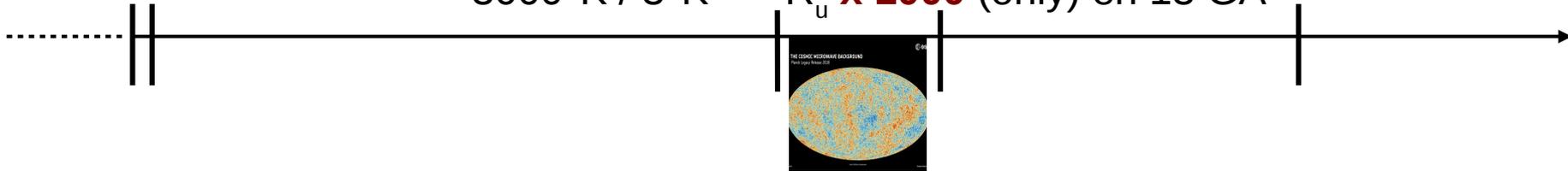


2)  $t_{\text{CBR}} < t < t_{\text{étoile}}$

- aucun objet macroscopique (hyp: "étoiles" de matière noire??)
- l'Univers est transparent mais parfaitement noir (rien à voir !!)

3)  $t = t_{\text{CBR}}$

- $t_{\text{CBR}}$  n'est pas un "instant", mais un *long* intervalle  $\Delta t \sim 100000$  "ans" (neutralisations  $\Leftrightarrow$  ionisations success.)
- $3000^\circ\text{K} / 3^\circ\text{K} \rightarrow R_u \times 1000$  (only) en 13 GA



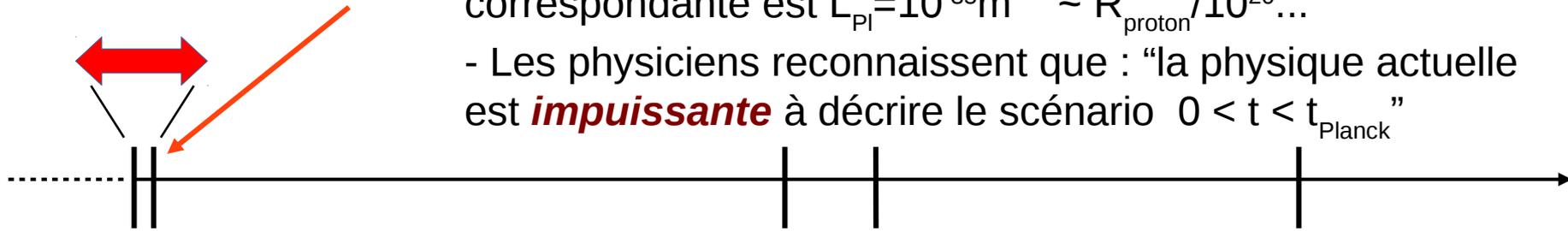
4) la Terre d'aujourd'hui ne voit qu'une *infime* fraction de ce rayonnement fossile !

(et pourtant, tout le modèle  $\Lambda_{\text{CDM}}$  est basé sur ce petit échantillon...)

5)  $t = t_{\text{Planck}}$

- Ne pas confondre l'instant  $t_{\text{pl}}$  "après  $t=0$ " et un intervalle quelconque très court  $\Delta t = 10^{-43}$  s. Au labo, la longueur correspondante est  $L_{\text{pl}} = 10^{-35}$  m  $\sim R_{\text{proton}} / 10^{20}$  ...

- Les physiciens reconnaissent que : "la physique actuelle est **impuissante** à décrire le scénario  $0 < t < t_{\text{Planck}}$ "



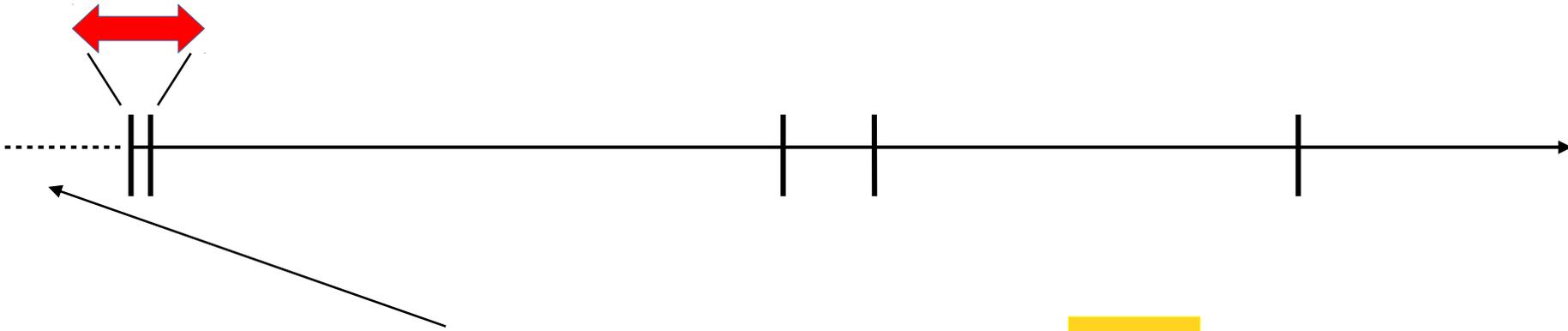
6) *Quid* de ce fameux "instant origine"  $t = 0$  (?)

- singularité en RG = "bord" de l'Espace-Temps
- prop. amendée par la MQ:  $\Delta t \cdot \Delta E > h$  (Heisenberg)

Réponse du  
philosophe

*<< Si l'Univers est l'ensemble de tous les événements qui ont eu lieu "depuis toujours", alors même s'il est borné (d'âge fini), l'Univers existe depuis toujours >>*

Alan Grünberg



7) *Et “avant” l’instant origine* :  $t < 0$  (???)

- avec Heisenberg on saute par-dessus la singularité
- on invente l’ “inflation” (A.Guth)
- on travaille à la **Gravité Quantique** (C.Rovelli) où le “temps” ne serait qu’une *propriété émergente*
- on développe des scénarii d’Univers en rebond, ou de **multi-vers** dont le notre, âgé de 13.6 GA, ne serait qu’un avatar **local** particulier (ayant engendré l’être humain angoissé qui se console avec le “*Principe Anthropique*”)