

La physique de la Terre V

Julien RAMONET, septembre 2025

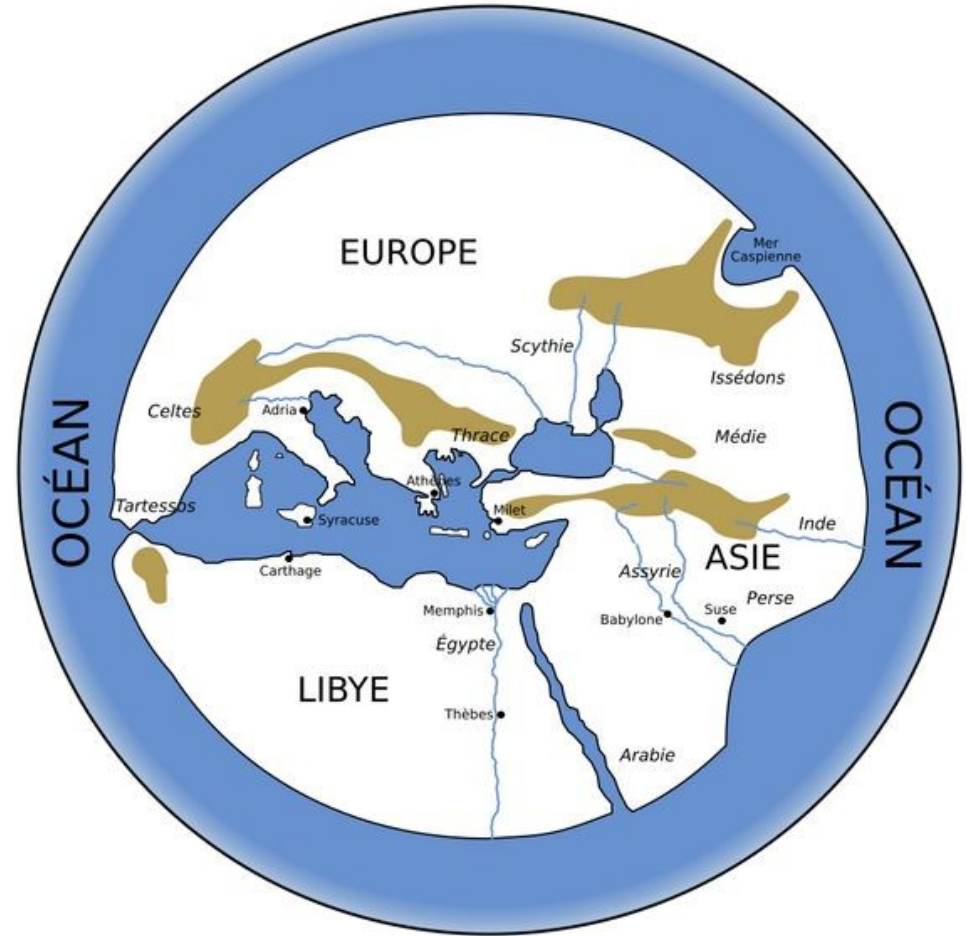
Non, la Terre n'est pas plate...

Mais elle n'est pas sphérique non plus !

Notions utilisées :

- 1. Introduction
- 7. Mécanique classique
- 17. Physique de la Terre (1)
- 18. Physique de la Terre (2)
- 19. Physique de la Terre (3)

Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées
Images : Wikipedia sauf mention contraire



Reconstitution de la carte d'Hécatée de Milet

Pourquoi c'est différent de l'étude des **missions lunaires Apollo**

- **Propriétés physiques testables d'un objet**
 - On peut le constater / mesurer soi-même !
- Apollo = étude de la **crédibilité / véracité d'un événement historique** (certes très technique) **invérifiable en pratique par qui le voudrait**
- Il est donc absurde et / ou malhonnête de faire l'amalgame entre les sceptiques...

LA ROTATION DE LA TERRE



Inception, Christopher Nolan, 2010

Jour / nuit

- Le **mouvement apparent du soleil** (et donc l'alternance de jours et de nuits) indique nécessairement une rotation de la Terre sur elle-même
 - Maintenant qu'on a abandonné l'idée que c'est l'Univers qui tourne autour de la Terre...
- De même que le mouvement apparent des étoiles la nuit → « **filé d'étoiles** »

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9dition_30_\(ISS\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9dition_30_(ISS)) (montage)



Les Visiteurs, Jean-Marie Poiré, 1993

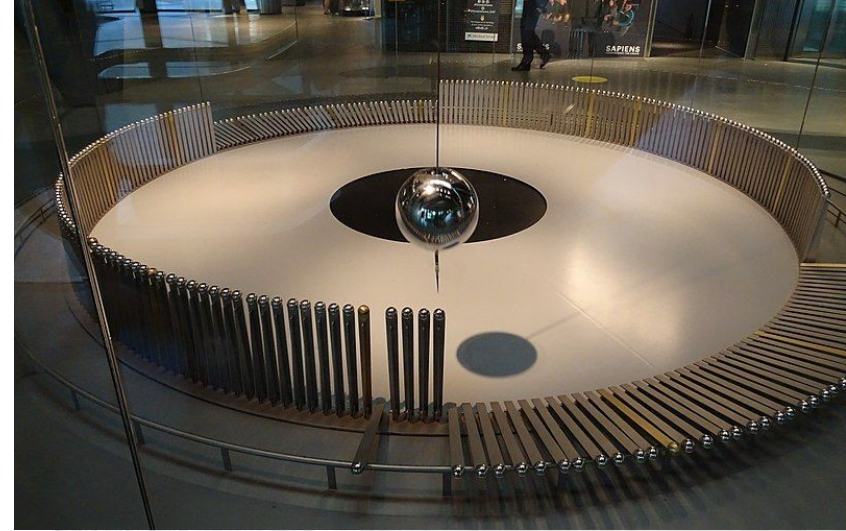


Le pendule de Foucault

« Vous êtes invités à venir voir la Terre tourner »

- Léon Foucault : inventa le gyroscope et détermina que $v=c/n$
- Destiné à mettre en évidence la **rotation de la Terre** (= référentiel **non galiléen**)
 - Mesure « **intrinsèque** » décorrélée de toute observation astronomique
- Le **plan d'oscillation d'un pendule tourne lentement autour de la verticale en raison de la rotation de la Terre**, qui entraîne l'apparition de la « **force de Coriolis** »
 - = « **force inertielle** » = force **apparente** perçue dans un référentiel non inertiel / galiléen, en raison d'une **accélération** (translation ou rotation)
 - Pas une vraie force : **force fictive**

Pour les dépressions atmosphériques mais pas les baignoires...



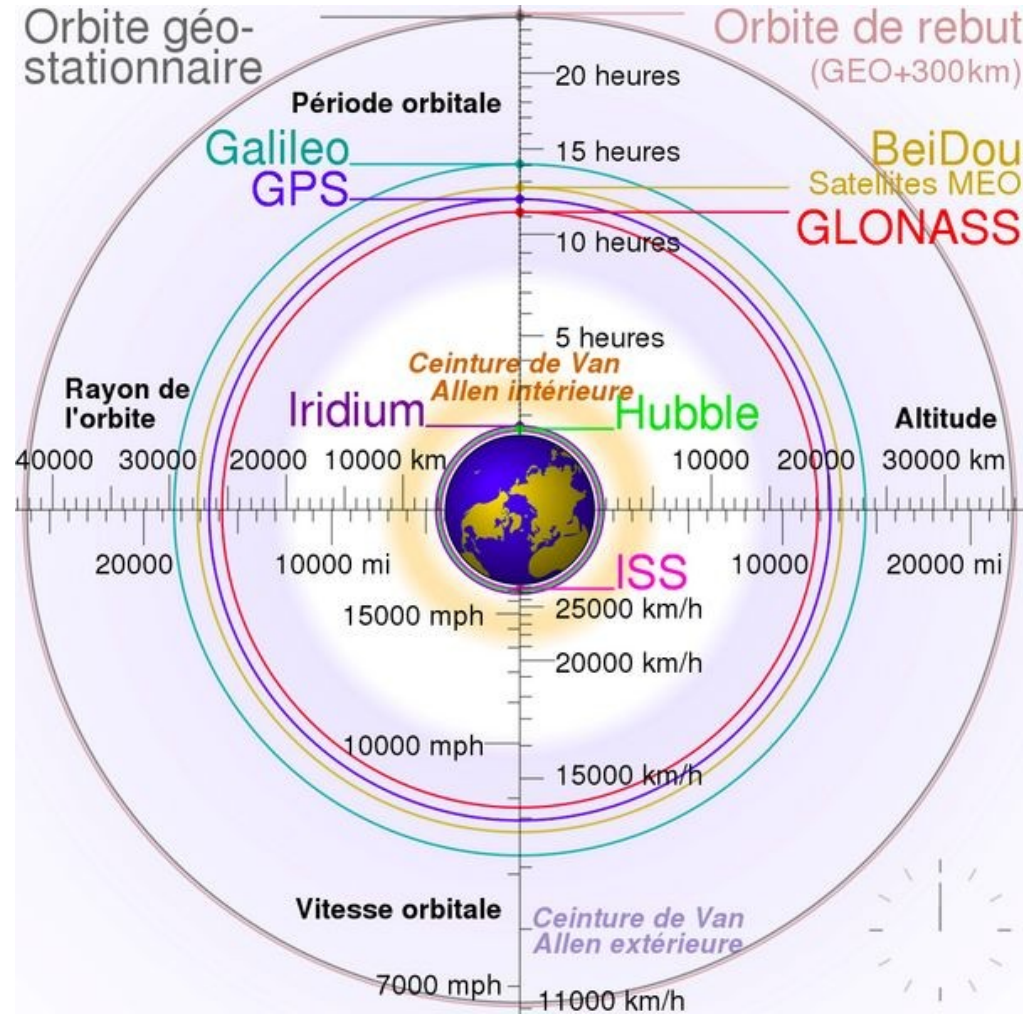
Satellites géostationnaires

- Un satellite à la distance r du centre de la Terre a une vitesse définie par :

Force centrifuge =
attraction gravitationnelle, soit

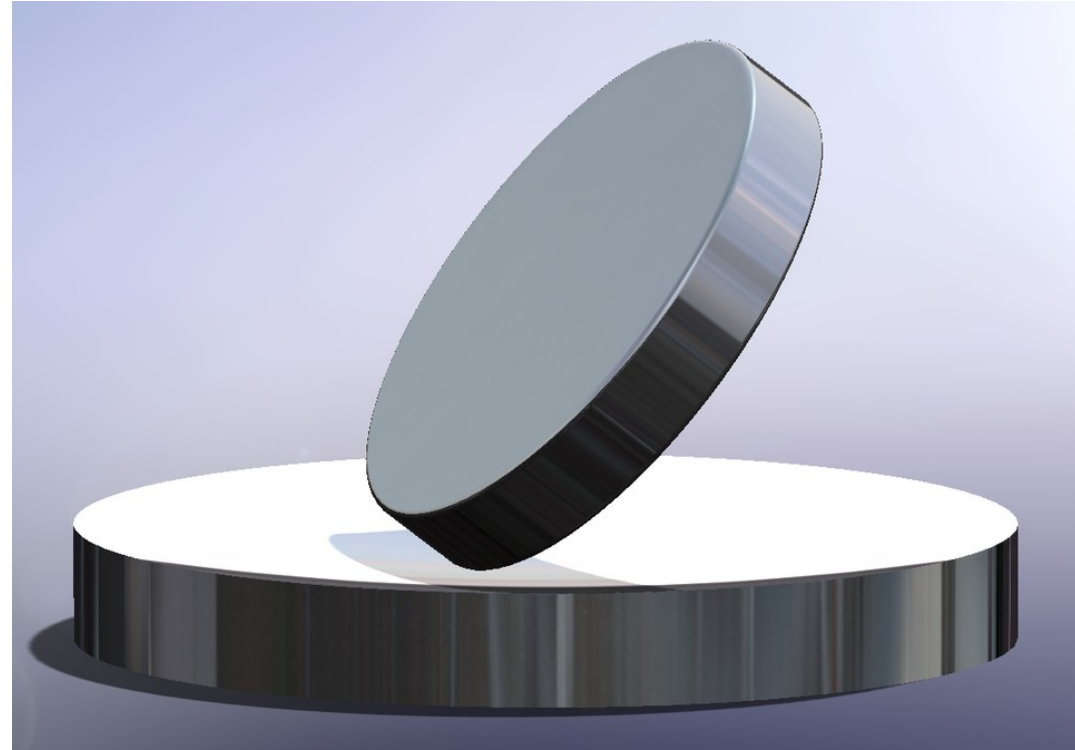
$$\frac{GMm}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

- Il ne peut pas être immobile, il doit être en « **chute libre** » (sur une « géodésique » en RG)
- Un satellite géostationnaire a une période égale à celle de rotation de la Terre (jour sidéral = 23h56m4s) → $r = 42200$ km, altitude = 35800 km



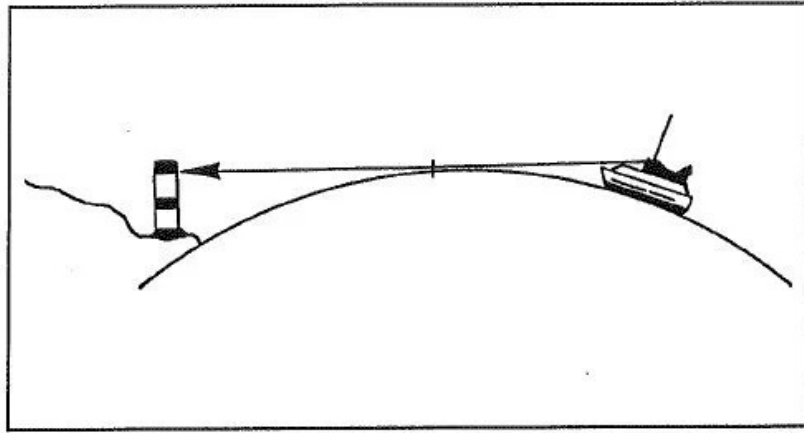
Mais...

Ça prouve que la Terre tourne, pas qu'elle est sphérique...



Disque d'Euler

LA SPHÉRICITÉ DE LA TERRE



Portée d'un phare

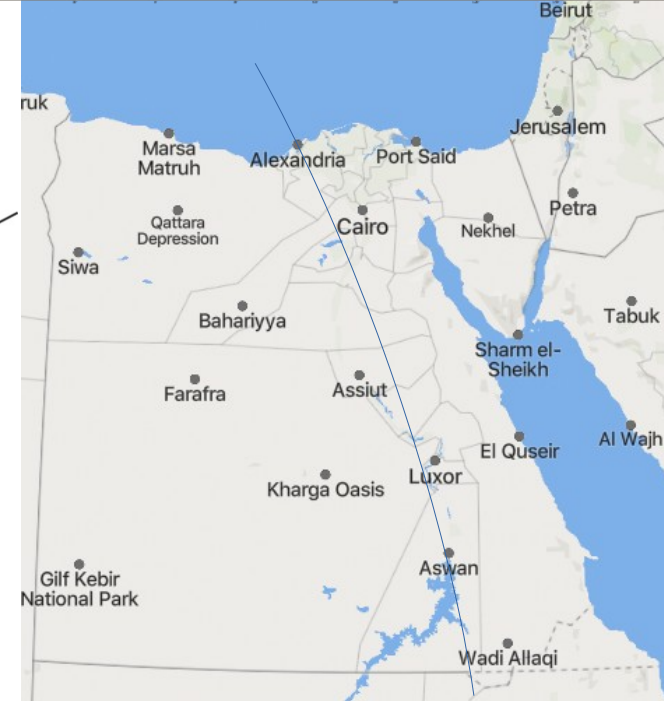
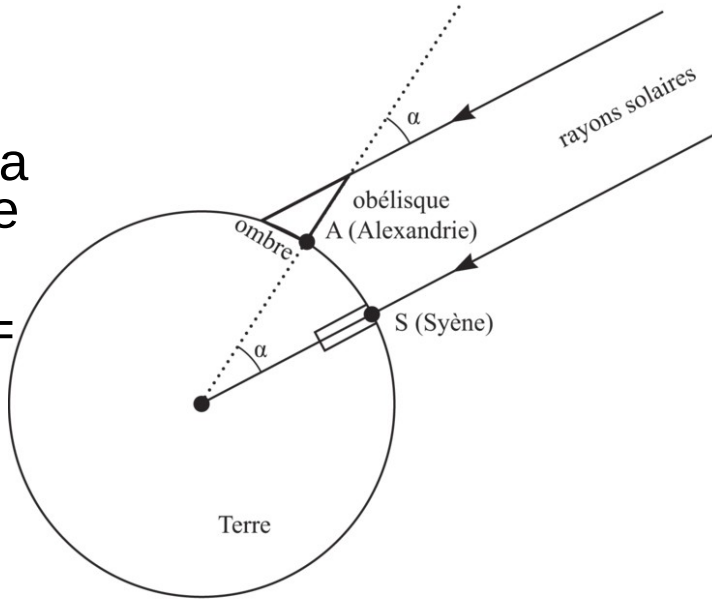
<https://lecoledelamer.com/2025/03/02/%F0%9F%91%89-tout-savoir-sur-la-portee-des-phares-pour-le-permis-hauturier/>



Parc éolien offshore de Thorntonbank, à 28 km des côtes belges en mer du Nord

Rayon de la Terre

- Mesure par **Ératosthène** au **III^e siècle avant J.-C.**
- Hypothèse : **rayons du Soleil parallèles**
- Le jour du **solstice d'été**, les rayons sont verticaux à midi à Syène (Assouan), c'est-à-dire sur le tropique du Cancer
- À Alexandrie, les rayons sont inclinés de **1/50^e de cercle**
- Donc la circonférence de la terre est 50 fois la distance Syène-Alexandrie
- → Longueur du méridien = 39 500 km, $r = 6\,286$ km
- **Précision de 2 % !**

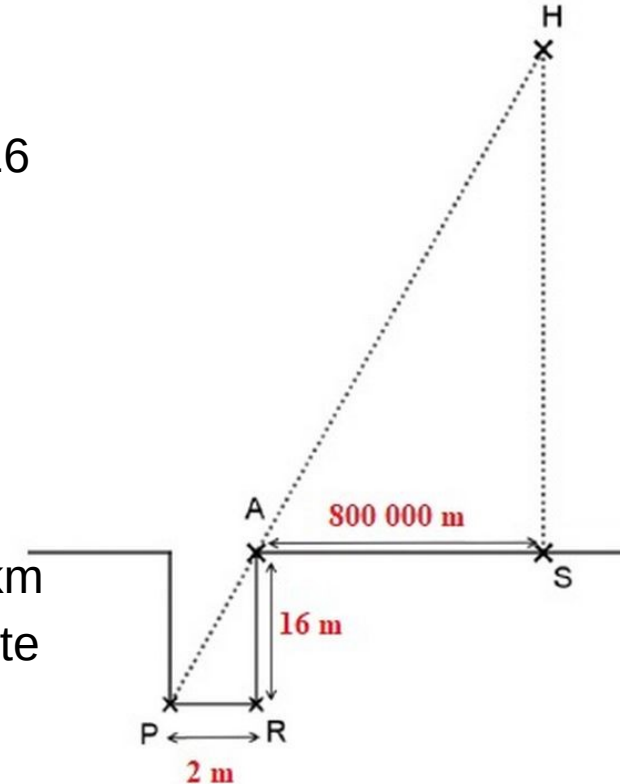
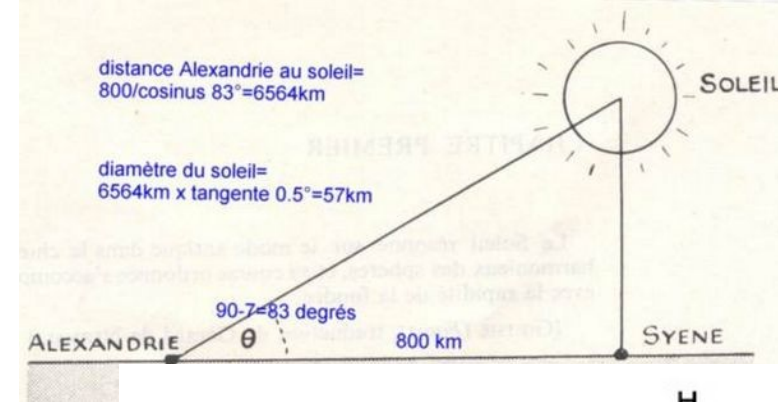


Modèle d'Anaxagore

- Mais ! **Autre possibilité géométrique...**
- Deux siècles avant Ératosthène
- Anaxagore (-500 ; -428) avait entendu que :
 - Le jour du solstice d'été, les rayons sont verticaux à midi à Syène (Assouan), c'est-à-dire sur le tropique du Cancer
 - Les rayons du Soleil éclairent un puits de 2 m de large sur 16 m de profondeur à Alexandrie (800 km de là)
- Théorème de Thalès : (HS) // (AR) = verticales

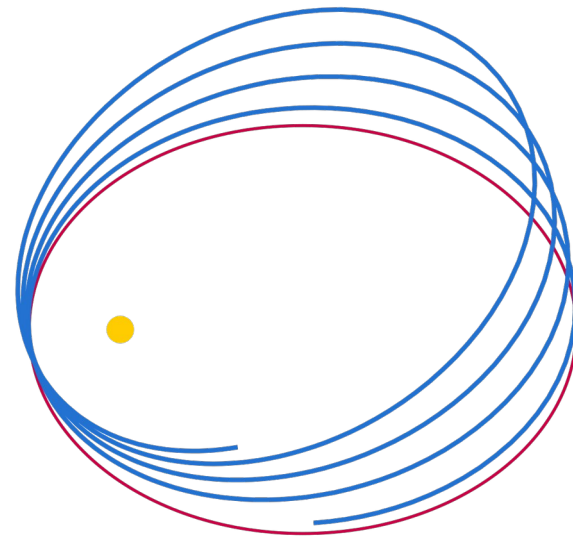
$$\frac{HS}{AR} = \frac{AS}{PR} \Rightarrow HS = \frac{AR}{PR} \times AS = \frac{16}{2} \times 800 = 6400 \text{ km (} = \text{rayon de la Terre...)}$$

- Géométriquement possible mais il faudrait revoir :
 - Mouvements des planètes, distance Terre-Lune = 380 000 km
 - Soleil : $0,5^\circ \rightarrow$ taille = 57 km $\ll$ 6400 km $\rightarrow$ il faut revoir toute la physique nucléaire et ses applications...



Avance du périhélie de Mercure

- L'orbite de Mercure (et des autres planètes) n'est **pas parfaitement elliptique** : la position du périhélie (point le plus proche du Soleil) « avance » à chaque orbite
- Cette avance est mesurée par Le Verrier en 1859 : $\varphi_{\text{exp}} = 574,8 \pm 0,4 \text{ sec. / siècle}$
- **Inexplicable par la mécanique classique** : $\varphi_{\text{Newton}} = 531,7 \pm 0,2 \text{ sec. / siècle}$ (avec prise en compte de l'aplatissement du Soleil aux pôles)



- $\Delta\varphi_{\text{Newton}} = 43,1 \pm 0,4 \text{ sec. / siècle}$

- La RG donne :

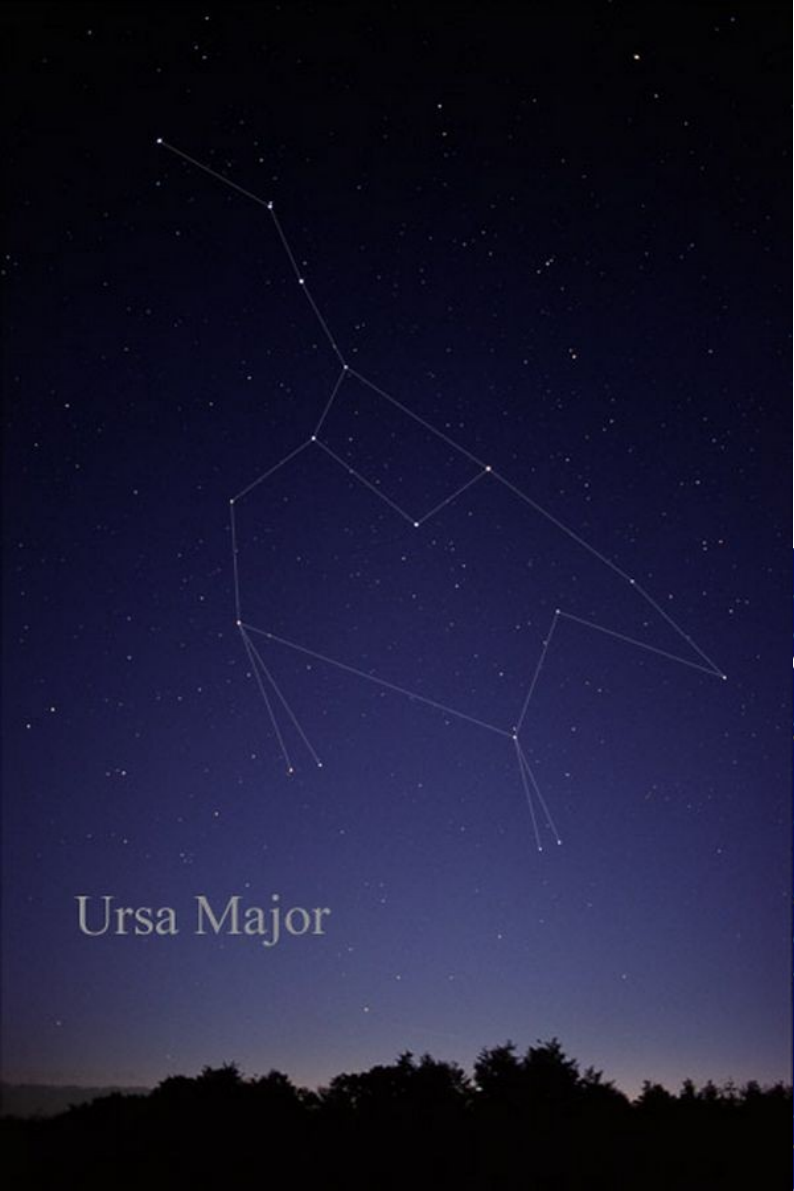
$$\Delta\varphi = \frac{6\pi G M_{\odot}}{a(1-e^2)c^2}$$

- $\Delta\varphi_{\text{RG}} = 0,07 \pm 0,45$

- Preuve du modèle héliocentrique

- $\Delta\varphi$ = avance du périhélie par orbite
- G : constante de la gravitation universelle
- M : masse du Soleil
- a : demi-grand axe de l'orbite de Mercure = 57 900 000 km
- e : excentricité de l'orbite de Mercure
- c : vitesse de la lumière

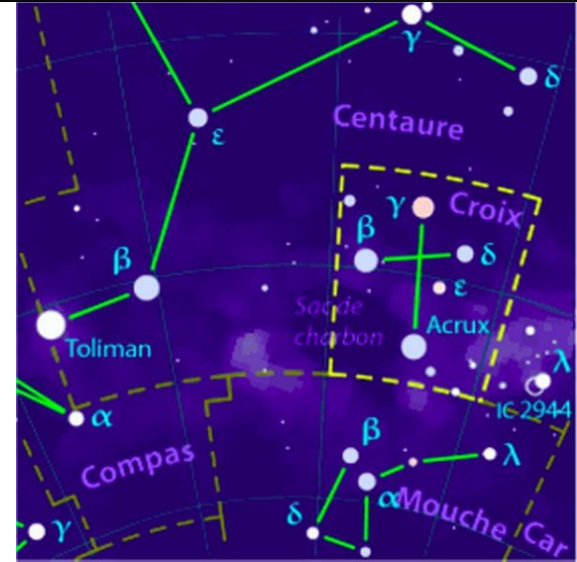
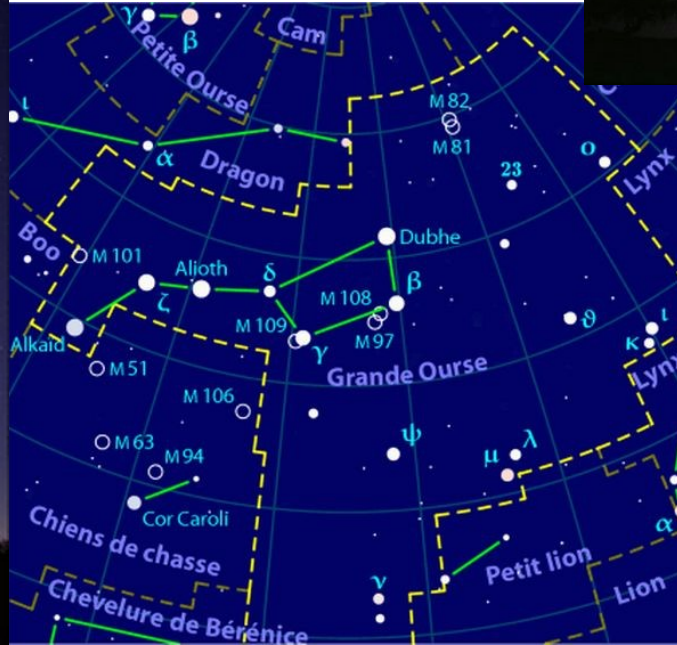
L'orientation des étoiles



Ursa Major

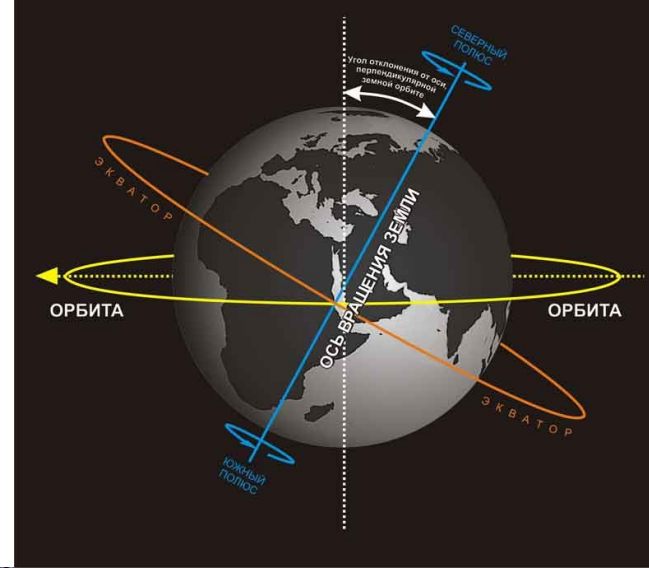


Crux



Filés d'étoiles

- Un « filé d'étoiles » en cercles indique la direction de l'axe de rotation
- Si on peut le voir, c'est qu'on n'est ni
 - **Parallèle** (allongé sur une Terre plate) : sinon on ne verrait que des traces parallèles
 - **Perpendiculaire** (debout sur une terre plate) : on ne verrait que des 1/2 cercles



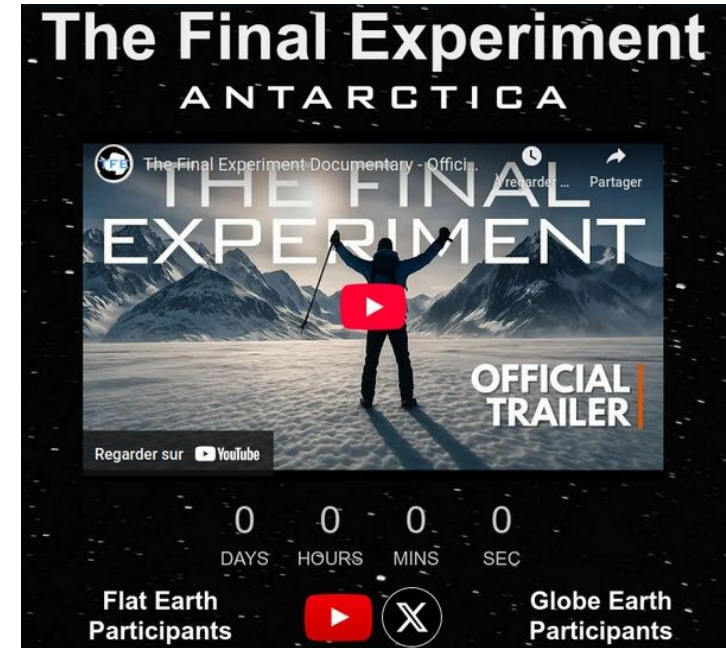
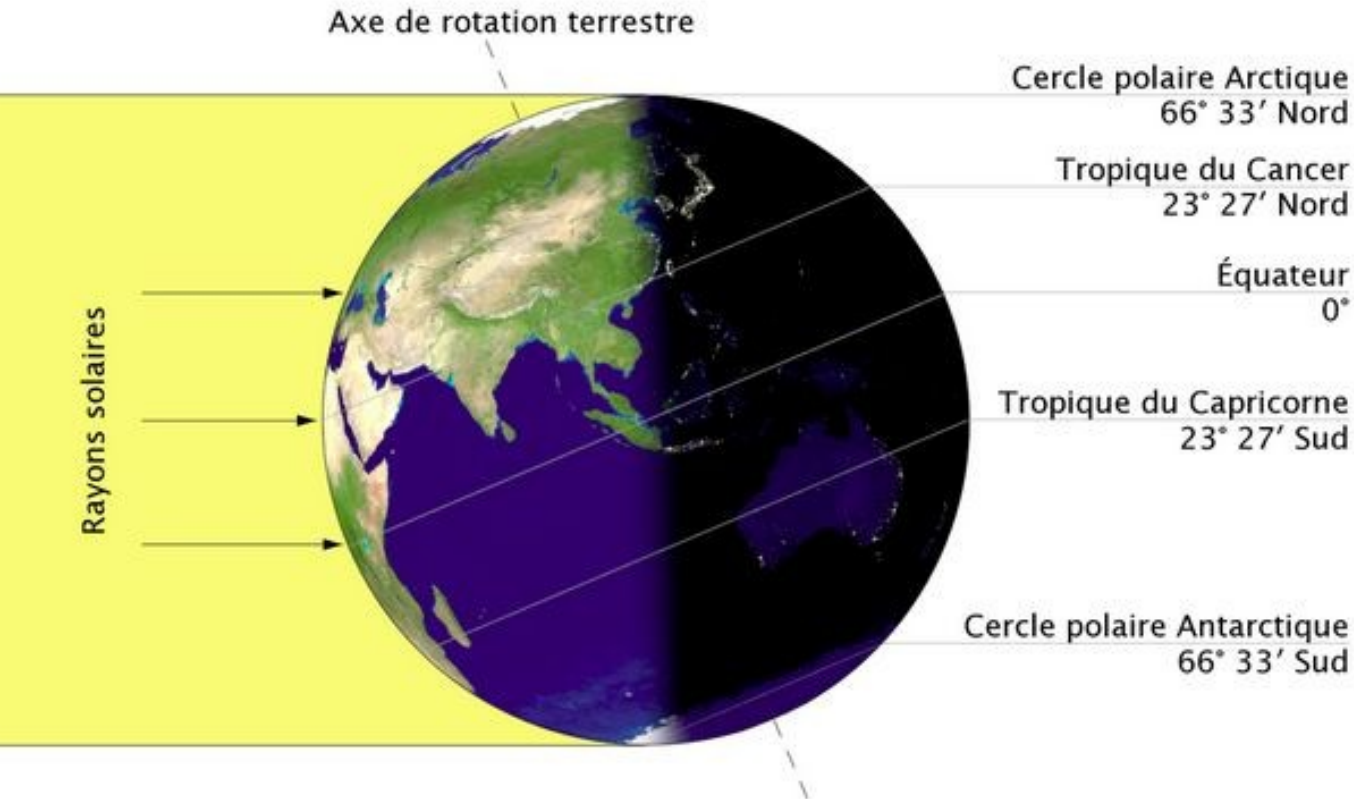
L'Occident et l'Orient



08/09/2024 à 10:35 (Local) - UTC +120min

- Est = « levant »
- Le Soleil passe au Japon **avant** le RU → ils sont en avance sur UTC → **il est plus tard** → **+ n heures**
- Le Soleil passe au Mexique **après** le RU → ils sont en retard sur UTC → **il est plus tôt** → **- n heures**

La journée / nuit de 6 mois



<https://www.the-final-experiment.com/>

Rotondité + inclinaison / éclipse = jour et nuit de 6 mois
(Au-delà du cercle polaire, au moins une fois le soleil de minuit dans l'année)

Vols vers l'Est et l'Ouest

- Paris-Honolulu : on peut passer par Séoul ou Los Angeles...
- Quelle géométrie de Terre permet cela, sinon la sphérique ?
- (avec une boussole pour vérifier qu'on va bien vers l'Est ou vers l'Ouest !)

https://www.kayak.fr/flights/PAR-HNL/2025-08-01?xsLinkId=F..RP..M0%7CREGION_FLIGHT_TILE%7C0aa8aa8aa8%7C129r&sort=bestflight_a&fs=stops=1

Allez simple Paris X + Honolulu X + ven. 1/8 < > 1 adulte Éc

Vols classés par défaut selon le Meilleur choix comprenant la durée, le prix, le nom
Offres pour chaque vol classées selon leur prix. Offres équivalentes départagées par la m
Nous effectuons des recherches non exhaustives auprès de plus de 320 fournisseurs av
un accord commercial. [En savoir plus](#)

Le moins cher	Le meilleur choix ⓘ	Le plus rapide
1146 € • 30h 30min	1825 € • 19h 36min	2 698 € • 19h 14min

eDreams Trouvez les meilleures offres sur eDreams
Comparez plus de 600 compagnies aériennes

Enregistrer Partager

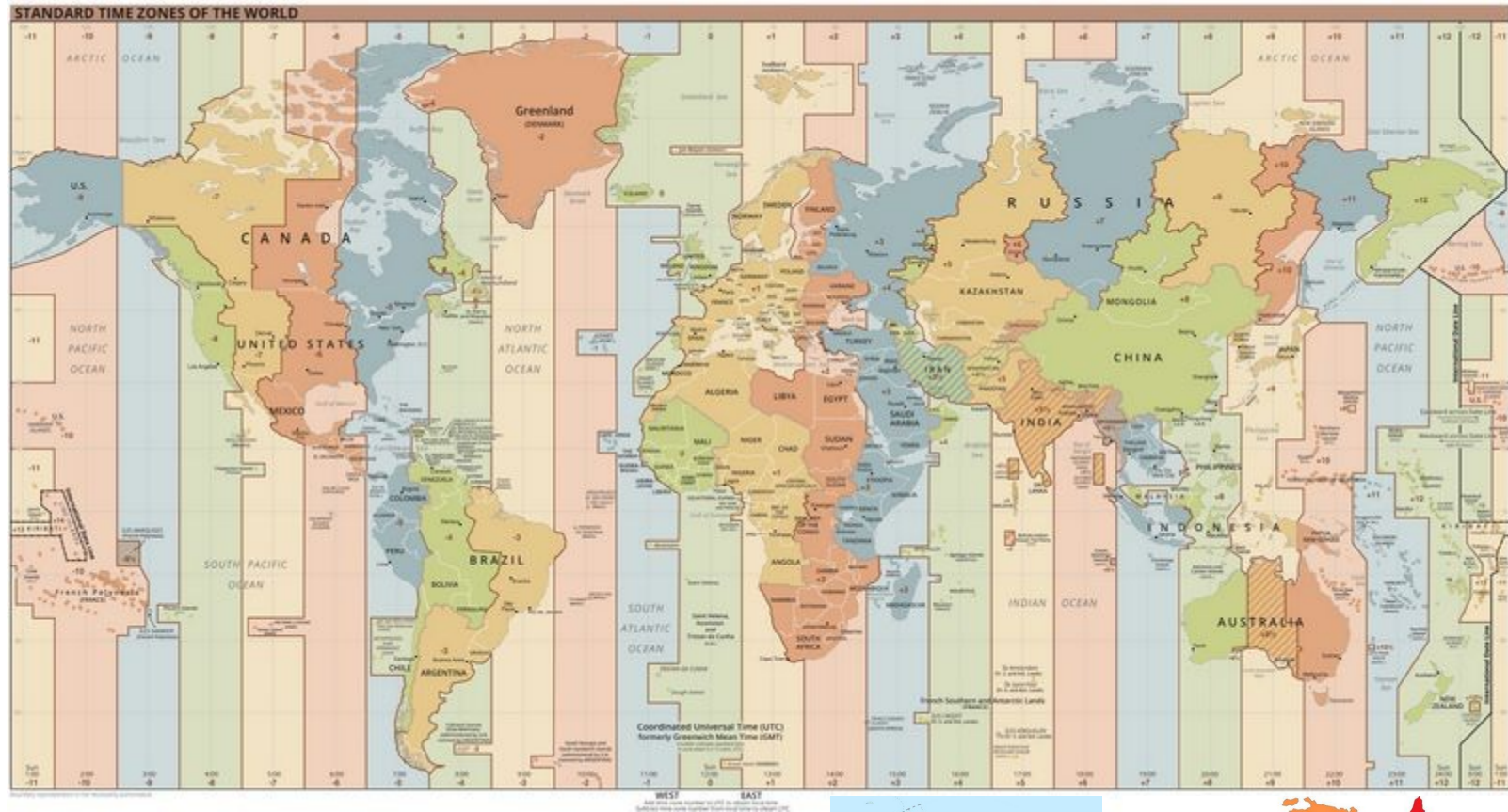
	20:30 – 10:55⁺¹ CDG Aéroport Ch...-HNL Aéroport d'H...	1 escale ICN	26h 25min
Korean Air		Annonce ⓘ	

Enregistrer Partager

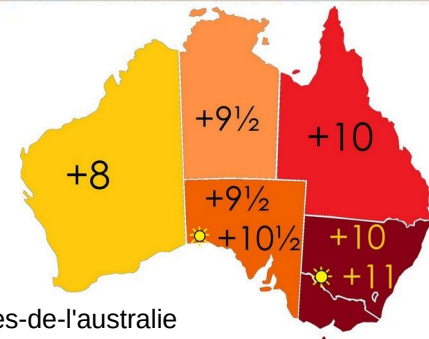
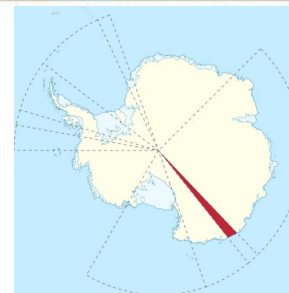
Le meilleur choix

	08:45 – 16:21 CDG Aéroport Ch...-HNL Aéroport d'H...	1 escale LAX	19h 36min
Air France			

Fuseaux horaires

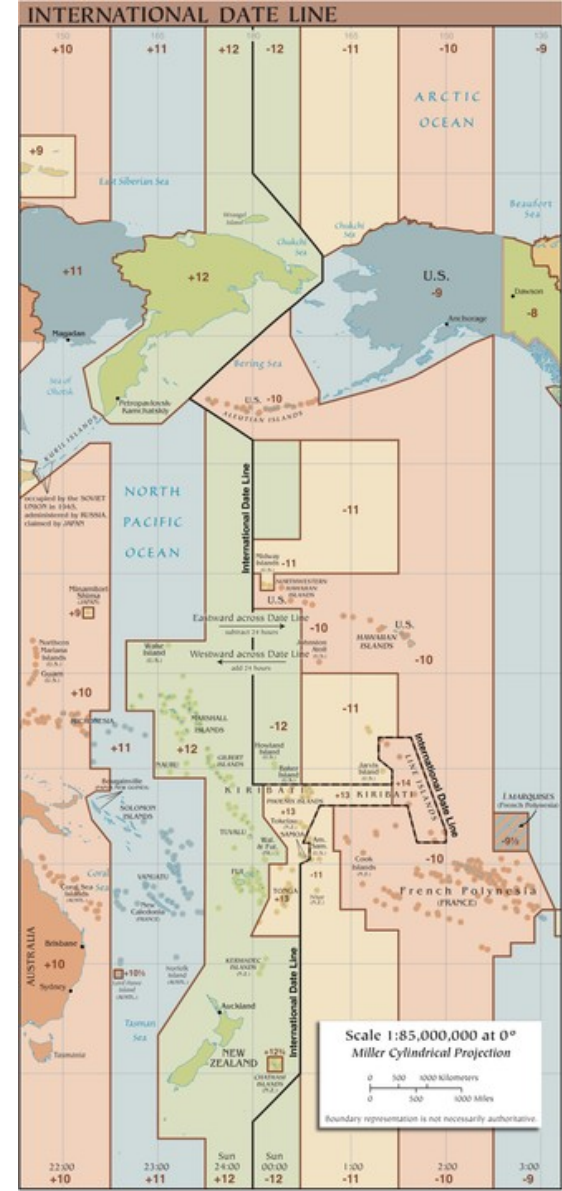


- 1884 : but = homogénéiser les horaires des trains au Canada
 - → Facilite les échanges internationaux
 - Décalage (dé)croissant d'un nombre entier d'heures / UTC
 - Mais quelques exceptions : Afghanistan, Inde, Iran, Népal, Sri Lanka, ...
- L'heure en France couvre 12 fuseaux horaires (13 avec la Terre Adélie) = record du monde !



La ligne de changement de date

- Que se passe-t-il de l' « autre côté de la Terre », où on obtient + 12h vers l'Est et – 12h vers l'Ouest par rapport à l'UTC ?
- **Même heure au Soleil mais 24h de différence**
- **Ligne de changement de date**
= ligne brisée circulant autour du 180^e méridien (Est = Ouest)
 - indique l'endroit où la date change
 - 2 endroits proches peuvent avoir 2 dates différentes



g

- **Théorème de Gauss :**

- À l'intérieur d'une Terre sphérique :
- À l'extérieur d'une Terre sphérique : la même que si toute la masse de la Terre était concentrée en son centre

- **Valeurs :**

- $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-2}$
- $M_T = 5.972 \times 10^{24} \text{ kg}$
- $R = 6371 \text{ km}$
 $\rightarrow g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$

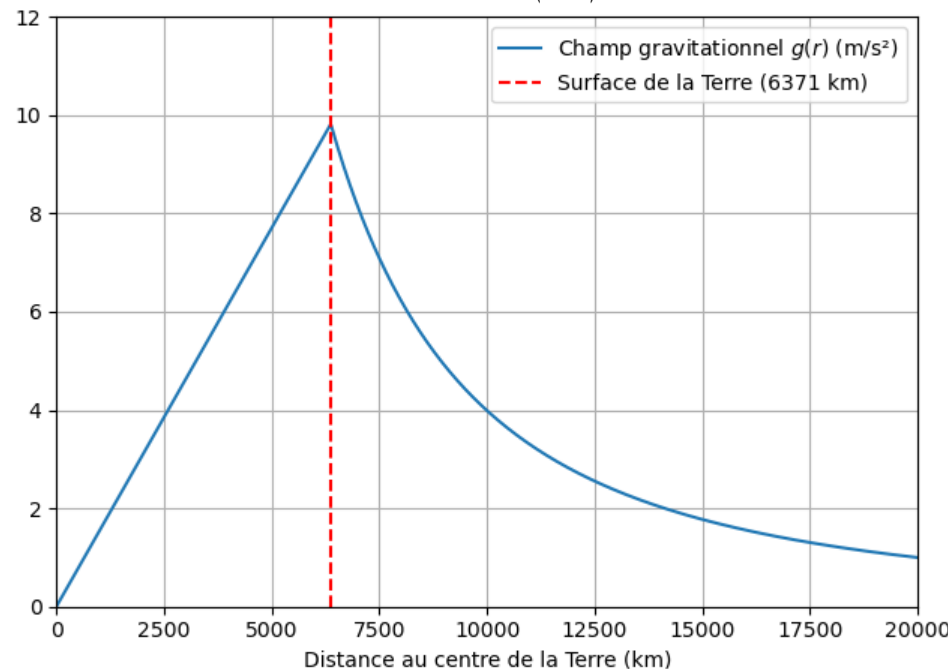
- Terre plate (infinie) : $\vec{g} = -2\pi G \sigma \vec{n}$
 σ : masse surfacique = $\rho \times h$
 - $\rho \approx 5,5 \times 10^3 \text{ kg / m}^3$

- Pas très plat ! $h = \frac{g}{2\pi\rho G} \approx 4200 \text{ km}$

$$\oiint_S \vec{g} \cdot d\vec{S} = -4\pi G M_{\text{int}} \Rightarrow g = G \frac{M_{\text{int}}}{r^2}$$

$$g(r \leq R) = \frac{4}{3}\pi G \rho r = g_0 \frac{r}{R}$$

$$g(r \geq R) = \frac{G \cdot M_T}{r^2} = g_0 \left(\frac{R}{r}\right)^2 \quad g_0 = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$



Courbe : chatGPT (Python)

Agartha

- = théorie d'une Terre creuse
- Mais ! Le théorème de Gauss implique une absence de gravité à l'intérieur d'une Terre en coquille (« couronne sphérique »)

$$\oiint_S \vec{g} \cdot d\vec{S} = -4\pi G M_{\text{int}}$$

- Avec $M_{\text{int}} = 0 \rightarrow g = 0$



Godzilla x Kong : Le Nouvel Empire, Adam Wingard (2024)



Le pendule de Foucault (2)

- On considère un référentiel R' en rotation / à un référentiel R (= non galiléen) : vecteur $\vec{\Omega}$ → Formule de Bour : $\left(\frac{d\vec{A}}{dt}\right)_R = \left(\frac{d\vec{A}}{dt}\right)_{R'} + \vec{\Omega} \wedge \vec{A}$
- Expression de l'accélération dans un référentiel tournant :

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{\partial^2\vec{r}}{\partial t^2} + \frac{\partial\vec{\Omega}}{\partial t} \wedge \vec{r} + 2\vec{\Omega} \wedge \frac{\partial\vec{r}}{\partial t} + \vec{\Omega} \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r})$$

accélération absolue = accélération relative + accélération tangentielle + accélération de Coriolis + accélération centripète

Accélération de Coriolis

$$\vec{a}_C = -2\vec{\Omega} \wedge \vec{v}$$

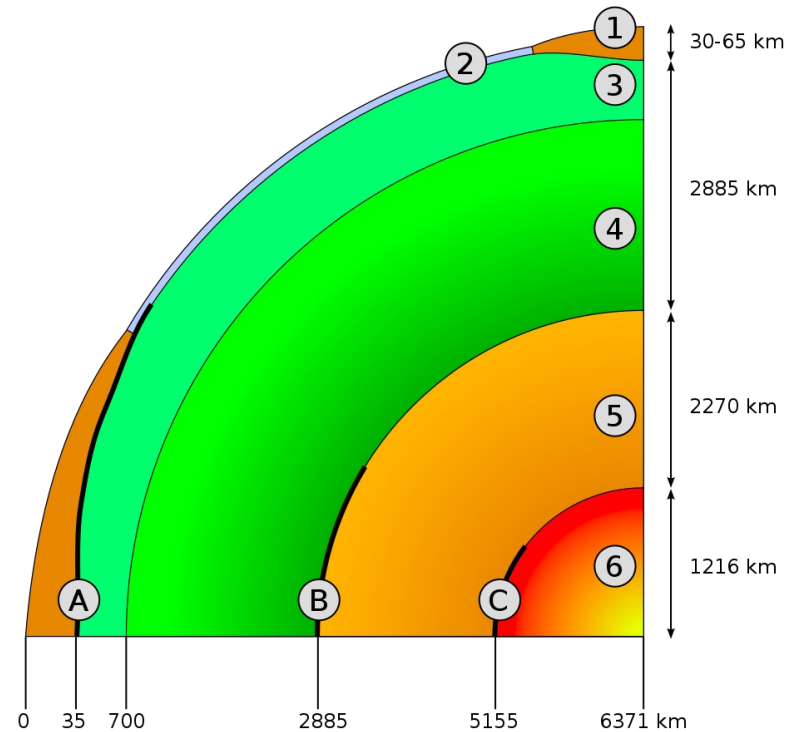
- On note θ la latitude : $z(t) = e^{-i\Omega \sin\theta t} \left[z_0 \left(\cos(\omega_0 t) + i \frac{\Omega \sin\theta}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right) + \frac{\dot{z}_0}{\omega_0} \sin(\omega_0 t) \right]$
- Période de précession du pendule :

$$T = \frac{2\pi}{\Omega_T \sin\theta} = \frac{24h}{\sin\theta}$$

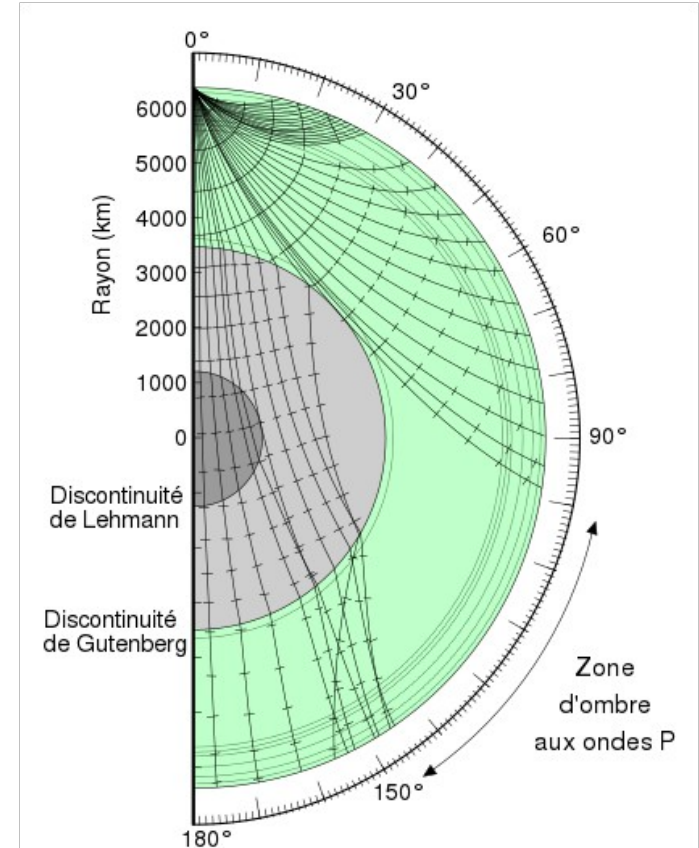
Valeurs mesurées à Paris (32h), Sydney (43h) et au pôle Sud (24h) en accord avec la théorie (Équateur → ∞)

Discontinuités

- **Discontinuité** = frontière entre deux zones aux propriétés très différentes
 - Ce sont en général des discontinuités **sismiques** (différence de **vitesse sismiques**) → **Réfraction**

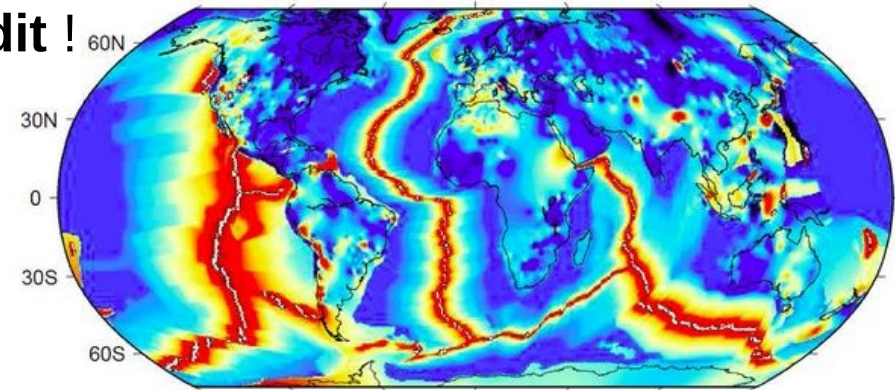
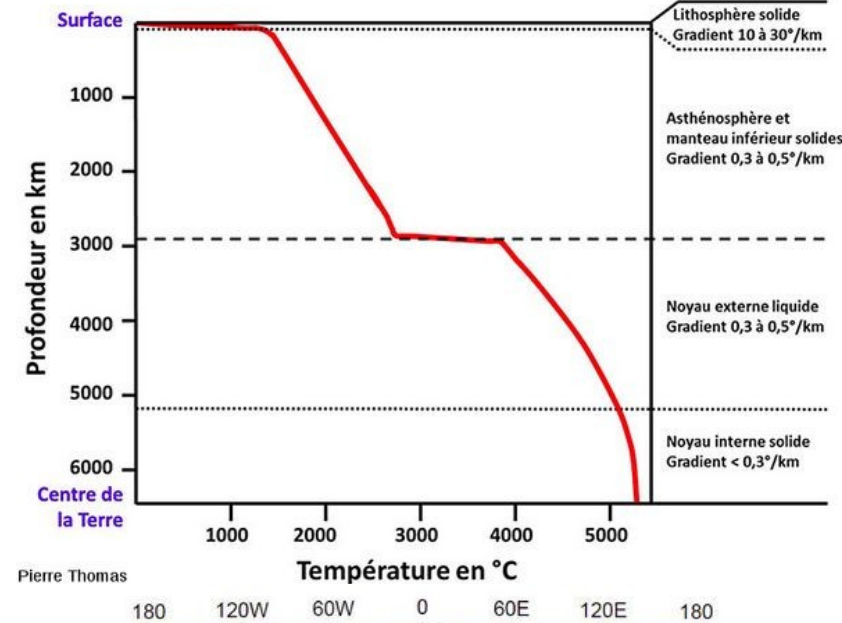


- Zones :
 - 1) Croûte continentale
 - 2) Croûte océanique
 - 3) Manteau supérieur
 - 4) Manteau inférieur
 - 5) Noyau externe
 - 6) Noyau interne
- Discontinuités :
 - A) de Mohorovičić (« Moho »)
 - B) de Gutenberg
 - C) de Lehmann

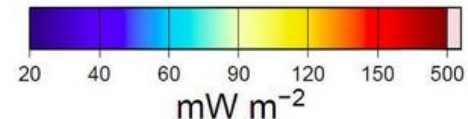


La radioactivité

- **Désintégration radioactives** = principales sources de chaleur qui maintiennent les températures du manteau terrestre :
 - Thorium ($T_{1/2}(^{232}\text{Th}) = 14 \text{ Ga}$) : 44 %
 - Uranium ($T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4,5 \text{ Ga}$, $T_{1/2}(^{235}\text{U}) = 0,7 \text{ Ga}$) : 39% / 2%
 - Potassium ($T_{1/2}(^{40}\text{K}) = 1,2 \text{ Ga}$) : 15 %
 - ~ 20 TW (20 000 centrales nucléaires)
- Or émissions d'environ 45 TW : **la Terre refroidit !**
 - Sans radioactivité, la Terre serait une planète morte
 - Les petits astéroïdes et comètes ont gelé il y a 5 Ga
 - gros astéroïdes ont gelé il y a 4 Ga
 - Lune a gelé il y a 3 Ga
 - Mars a gelé il y a 1 Ga

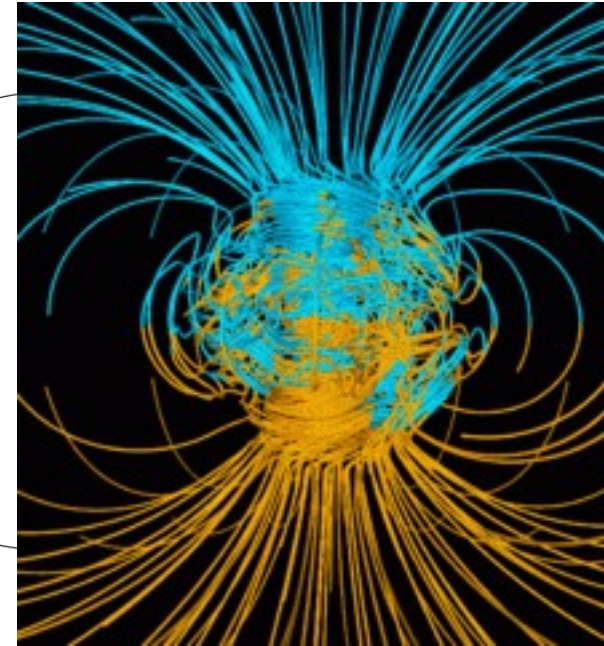
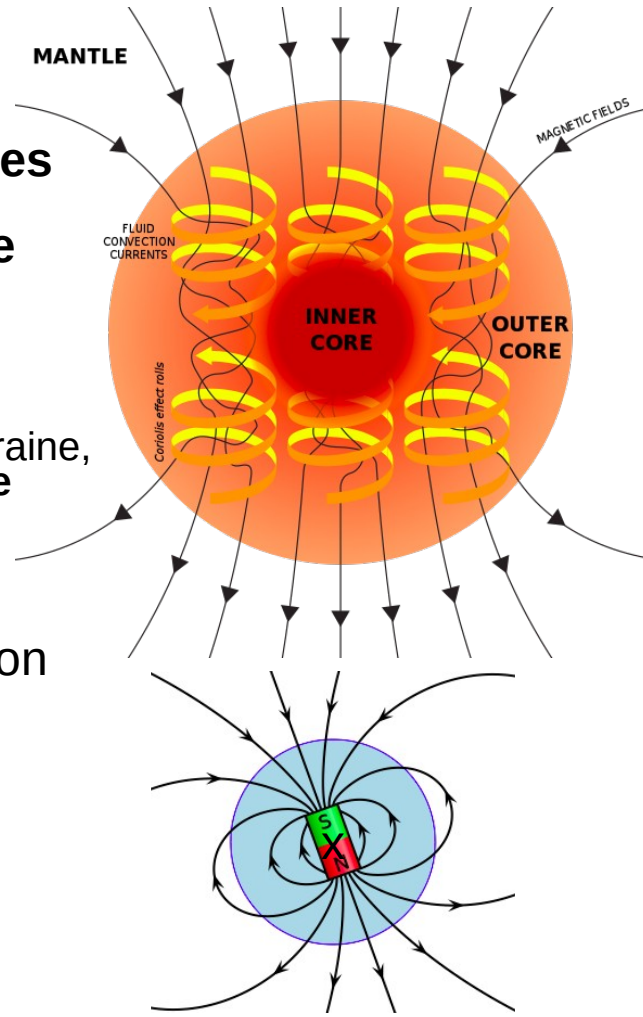


Carte du flux thermique mondial



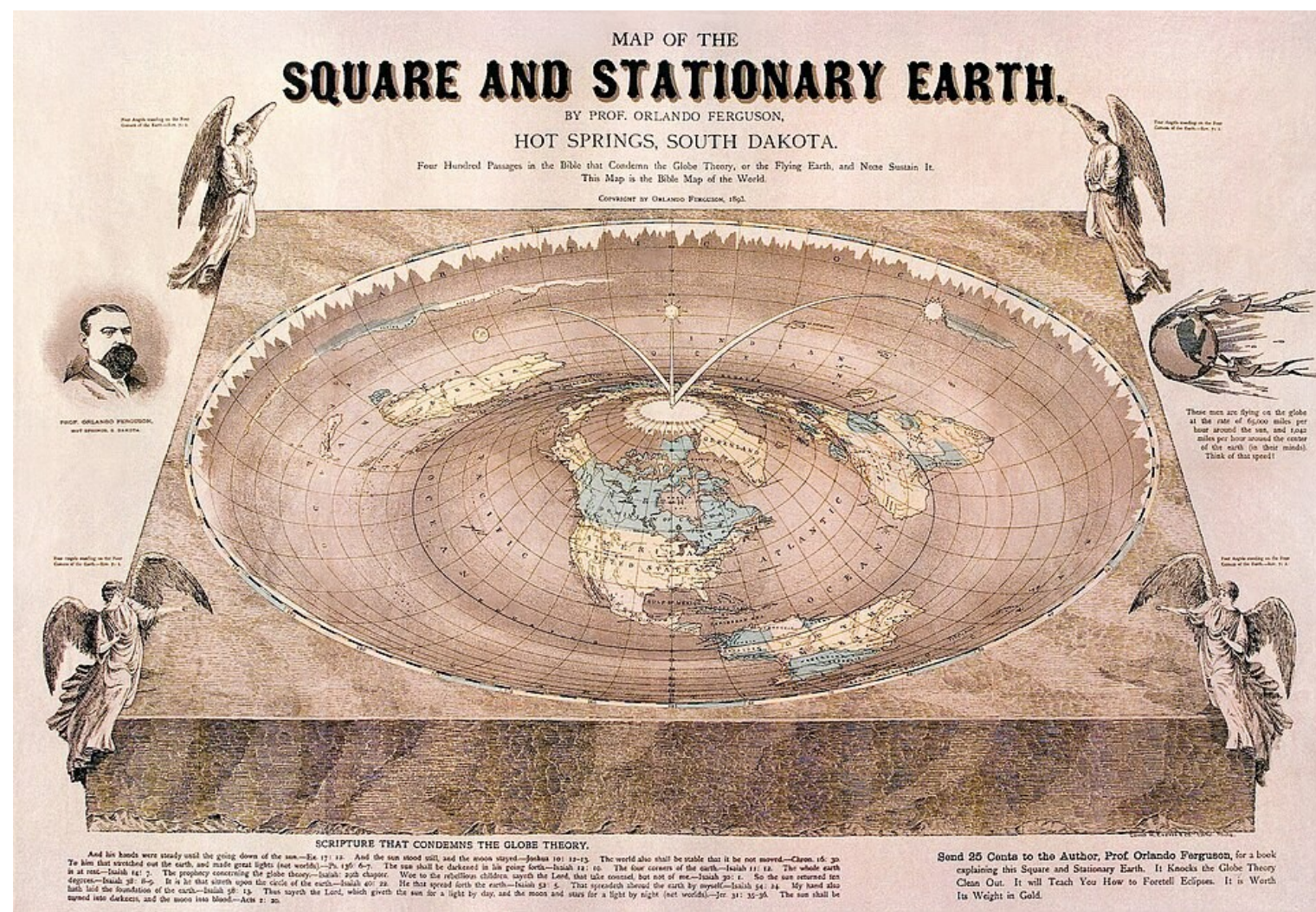
Le champ magnétique terrestre

- Existe depuis ~ 3,5 Ga
- Généré par des **courants électriques** dans le **noyau externe** (liquide), entretenus par des **phénomènes de convection** dus
 - Au **refroidissement en périphérie** (convection « thermique »)
 - À la solidification au voisinage de la graine, qui modifie la **composition du liquide** (différence de densité → poussée d'Archimède → convection « compositionnelle »)
- Semblable en première approximation au **champ d'un aimant**
 - Point central à quelques centaines de kilomètres du centre de la Terre



Simulation numérique du champ magnétique terrestre (hors d'une période d'inversion) : lignes de champ magnétiques entrantes (en bleu) et sortantes (en orange)

LES PROBLÈMES DE GÉOMÉTRIE



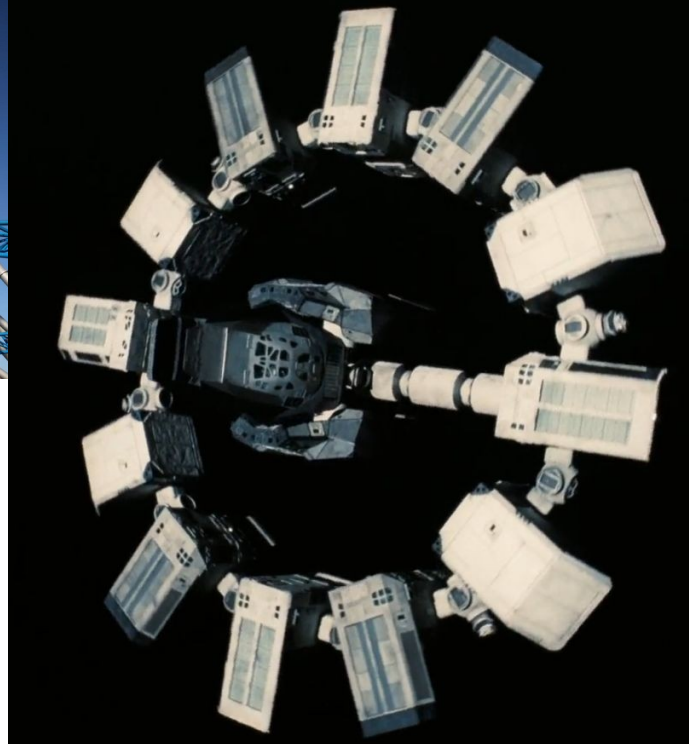
Carte d'Orlando Ferguson (1893)

La force centrifuge

- Autre exemple de **force fictive**
- Force **radiale** dirigée **vers l'extérieur**, souvent compensée par **force centripète**
- Rencontrée très souvent
 - Voiture, train : 0, n g
 - Avion de chasse : -4 / 9 g
 - Centrifugeuse : 12 g
 - Machine à laver : 500 g
 - Centrifugeuse à U : 100 000 – 1 000 000 g

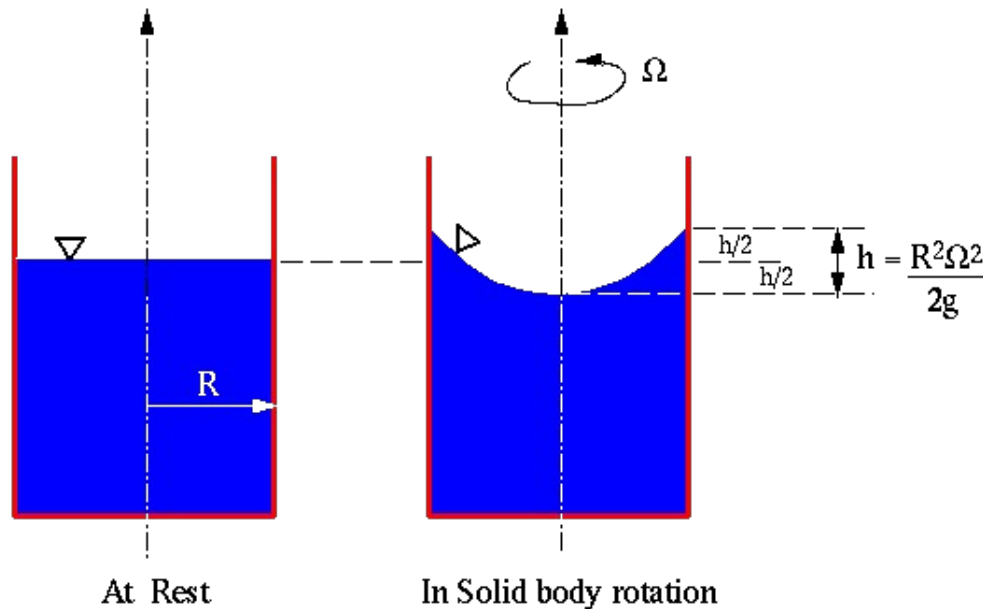


$$\vec{a} = \omega^2 R \vec{e}_r = \frac{V^2}{R} \vec{e}_r$$

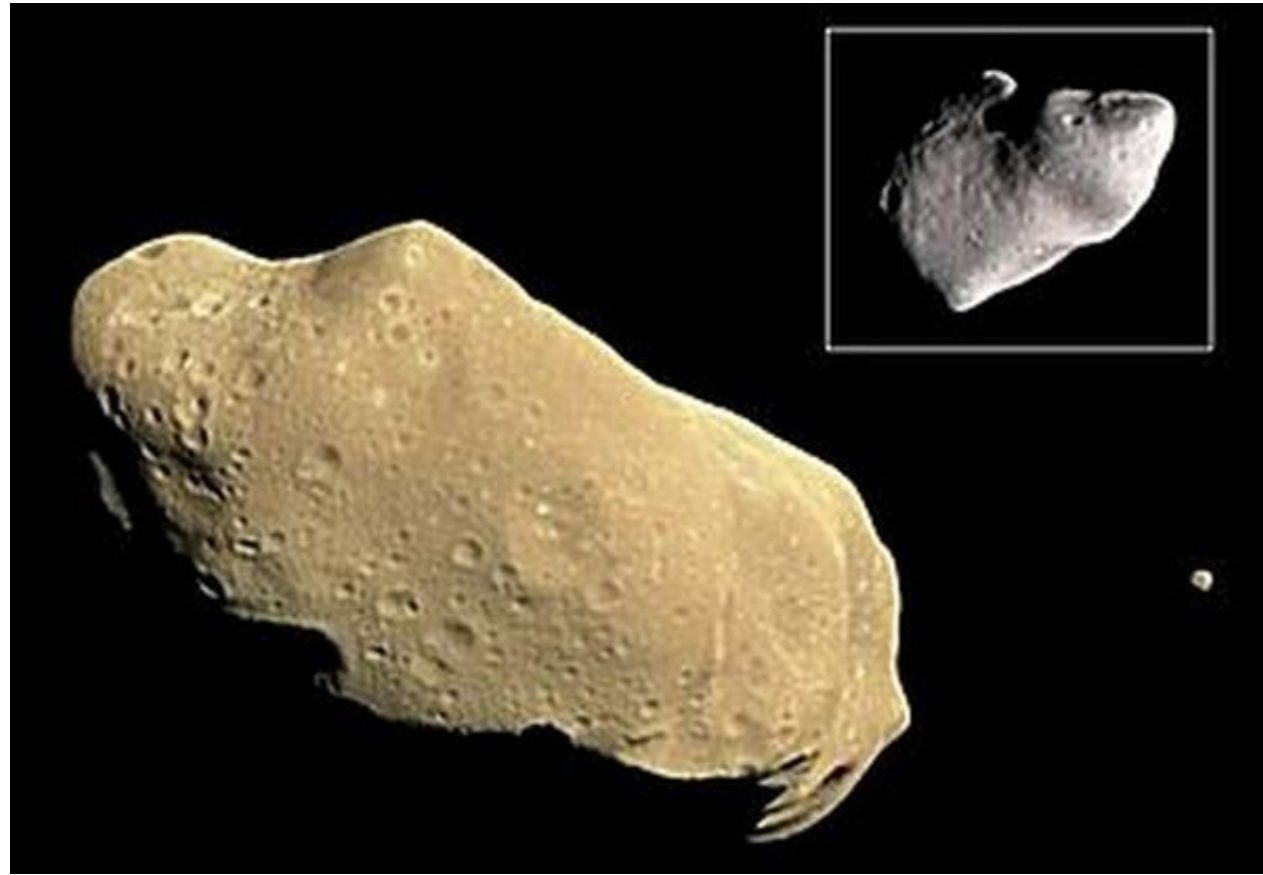


Que se passe-t-il au bord ?

- Pourquoi n'y a-t-il pas de photos ?
- Force centrifuge → les océans devraient déborder !
 - Ou il faudrait une « rambarde »



ET LES AUTRES PLANÈTES ?

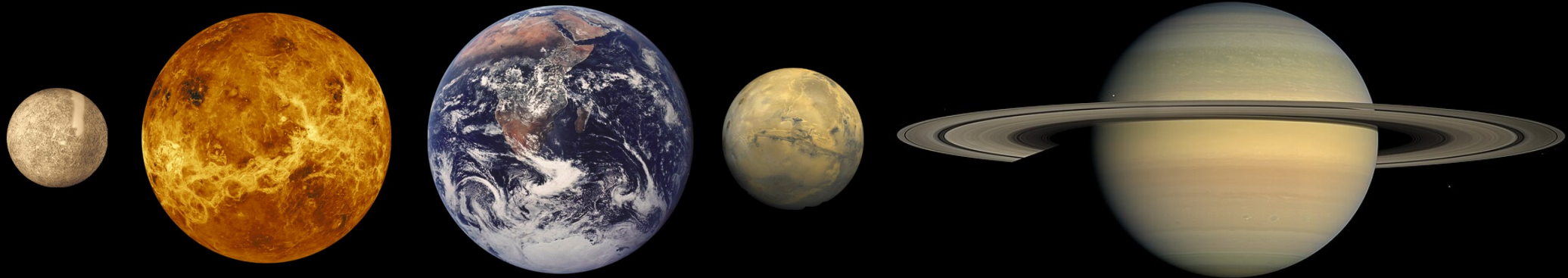


Ida et son satellite Dactyle (astéroïde et lune astéroïdale)

Autres planètes



- La **sphéricité** fait partie de la définition d'une planète :
masse suffisante pour atteindre un **équilibre hydrostatique**
- La Terre serait donc la seule « planète » non ~sphérique ?
- (Seule la Lune présente la même face mais c'est dû à des effets de marée provoqués par la Terre, voir les émissions sur la Lune)



POURQUOI ?

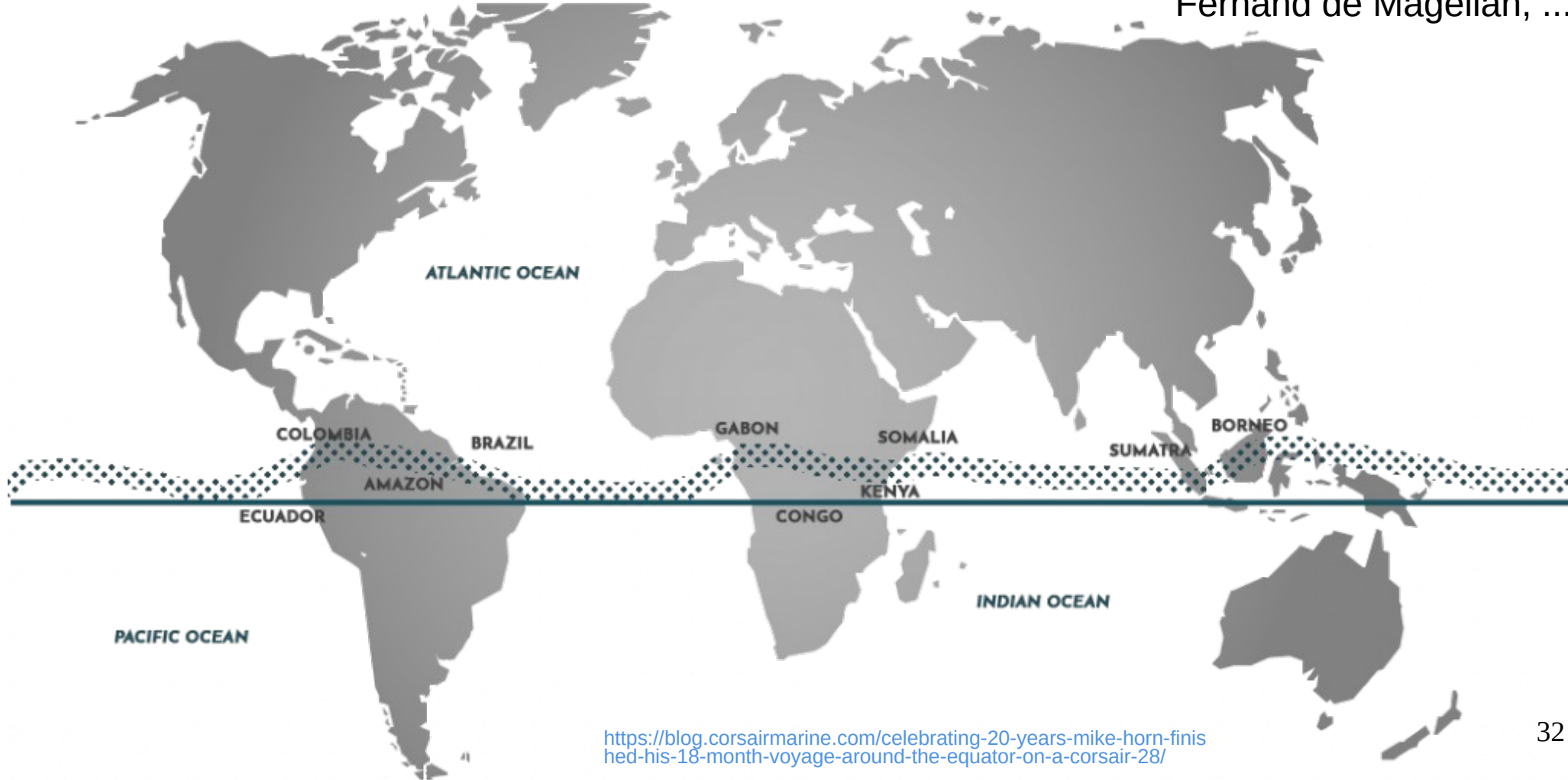


« « Complotisme » »

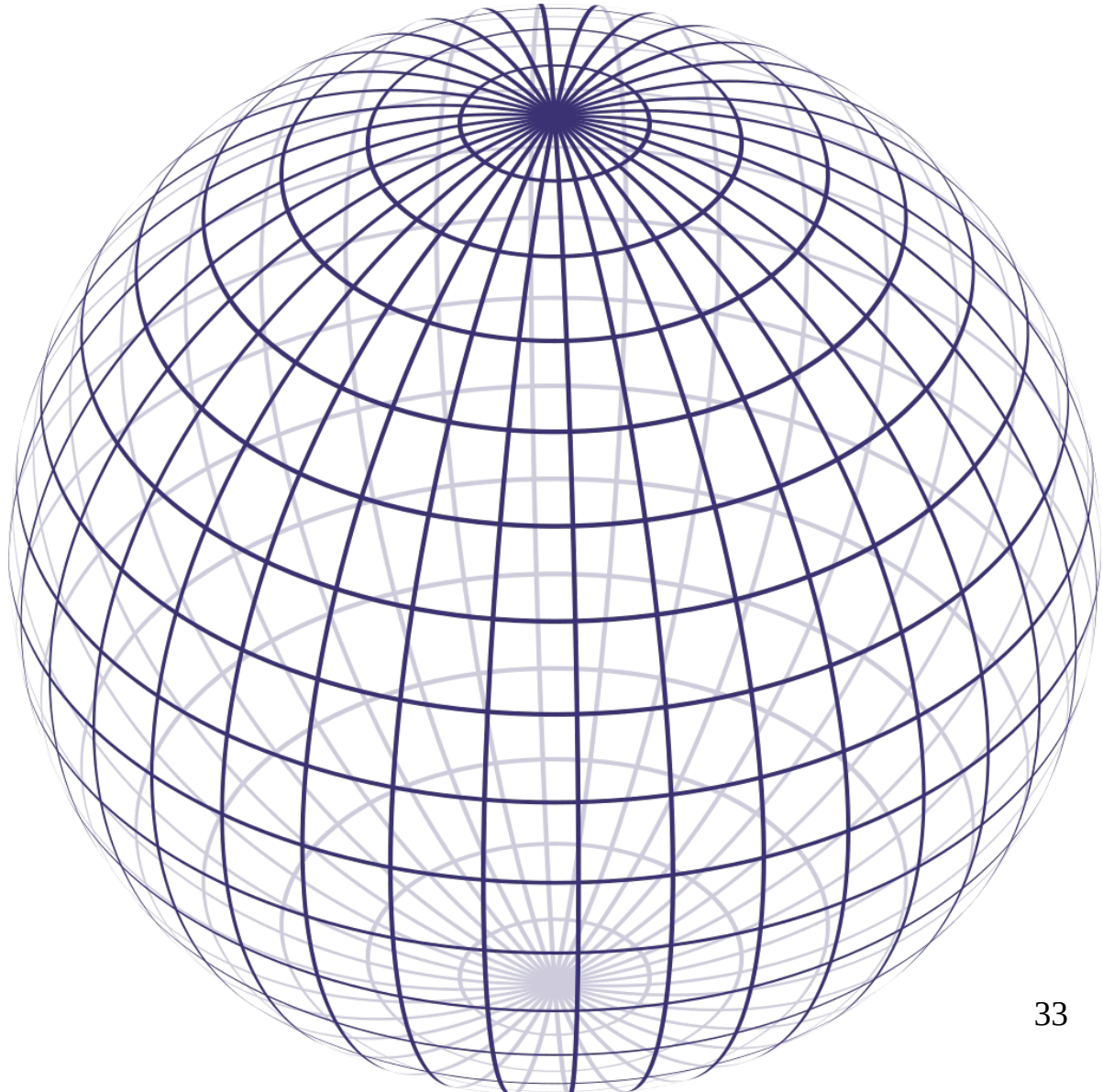
- Dans la théorie de la Terre plate, **le complot est indispensable**
- Mais il faut un **complot à très grande échelle** ! Et depuis très longtemps !
 - Physiciens & astronomes
 - Géologues, concepteurs de cartes et de GPS
 - Pilotes, industrie aéronautique, astronautes, explorateurs
 - Et même moi...
 - Quel serait leur intérêt ??
- Problème vis-à-vis du **rasoir d'Ockham** car **pas parcimonieux du tout** : des millions de personnes de disciplines variées

Latitude 0 de Mike Horn

Et Christophe Colomb,
Amerigo Vespucci,
Fernand de Magellan, ...



PAS TOUT A FAIT
SPHÉRIQUE...



Aplatissement aux pôles

- Premier à l'envisager : Huyghens au XVII^e
- Force centrifuge → aplatissement aux pôles
- $r_{\text{eq}} \approx 6378 \text{ km}$, $r_{\text{pol}} \approx 6357 \text{ km}$

$$f = \frac{r_{\text{équatorial}} - r_{\text{polaire}}}{r_{\text{équatorial}}} \approx \frac{1}{300}$$

- Calcul de Huyghens : $f \approx 1/230$
- **Des expéditions au XVIII^e au Pérou et en Laponie confirment la réalité du phénomène**



Miroir, dis-moi qui est la plus haute...

- Everest (Népal) :
 - **8 849 m** au-dessus du niveau de la mer et 6 382,605 km du centre de la Terre
- Chimborazo (Équateur) :
 - 6 263 m au-dessus du niveau de la mer et **6 384,416 km** du centre de la Terre

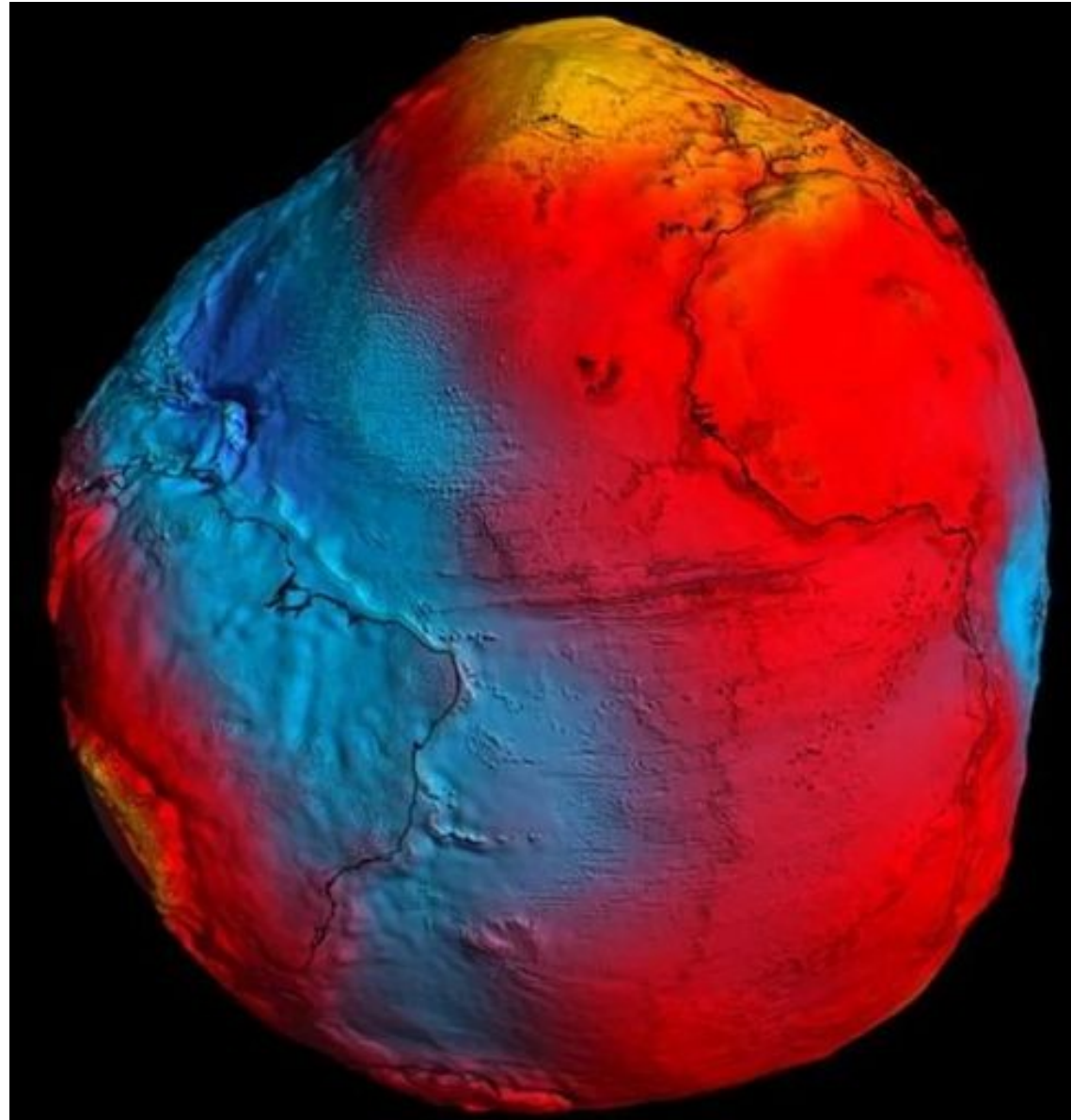


demonewsnepal.blogspot.com/2016/05/blog-post_503.html



GOCE

- Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
- Satellite scientifique de l'ESA (2009-2013)
- But : mesurer le champ gravitationnel (géoïde) de la Terre avec une résolution de 2 cm

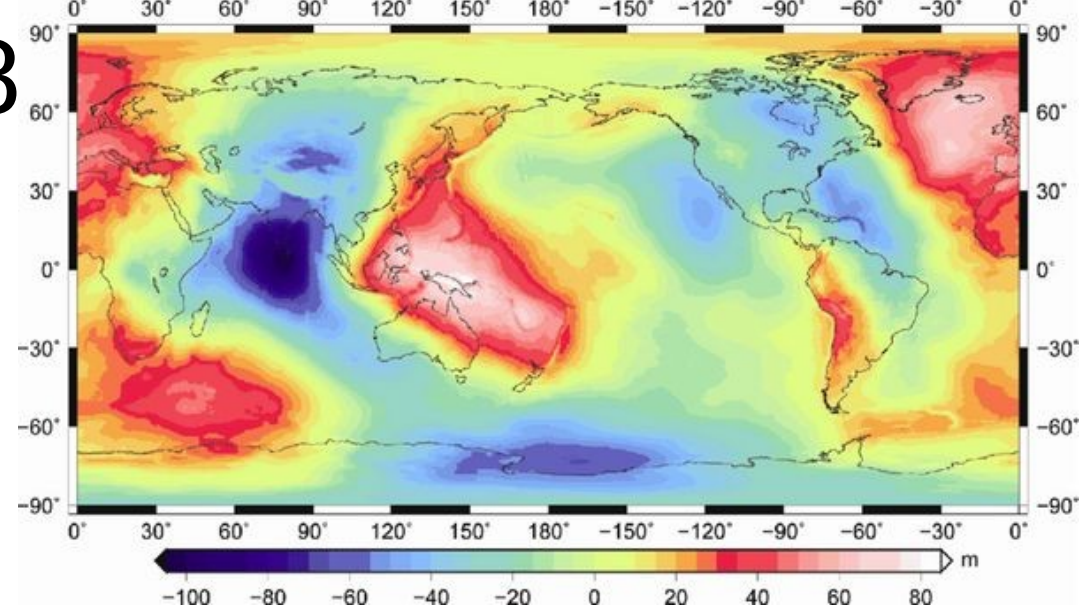


Le modèle EGM 2008

- Earth Gravitational Model
- Modélisation de la forme de la Terre en **harmoniques sphériques**
- → géoïdes = surfaces équipotentiellles
- $N > 2000$ coefficients
- On attend l'EGM 2020...
- Potentiel gravitationnel V :

$$V(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^N \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=-n}^n \bar{C}_{nm}^S \bar{Y}_{nm}(\theta, \lambda) \right]$$

$$\bar{Y}_{nm}(\theta, \lambda) = \bar{P}_{n|m|} \cos(\theta) \cdot \begin{cases} \cos(m\lambda) & \text{si } m \geq 0 \\ \sin(|m|\lambda) & \text{si } m < 0 \end{cases}$$



r : distance au centre de la Terre

a : rayon de référence de la Terre

θ : colatitude (angle depuis le pôle Nord)

λ : longitude

C_{nm} : coefficients des harmoniques sphériques

P_{nm} : polynômes de Legendre

À faire soi-même

- Mesurer l'ombre d'un bâton à Metz et à Brest (à la même heure !)
- Appeler un ami à Anchorage / New York / Moscou / Tokyo / Sydney et voir qu'il peut y faire nuit alors qu'il fait jour ici
- Prendre l'avion vers l'Est ou l'Ouest pour aller à Hawaï (avec une boussole)
- Prendre une photo longue exposition la nuit et voir le filé d'étoiles
- Aller voir la nuit / la journée de 6 mois
- Aller voir le soleil de minuit dans le grand Nord
- Aller voir la voûte céleste de l'hémisphère Sud
- Emporter son pendule de Foucault sous plusieurs latitudes
- Refaire le parcours de Mike Horn