

Physique de la Terre II

- Structure
- Phénomènes intérieurs
- Champ magnétique



Notions utilisées :

1. Introduction

16. Chaleur et énergie

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

Structure et composition

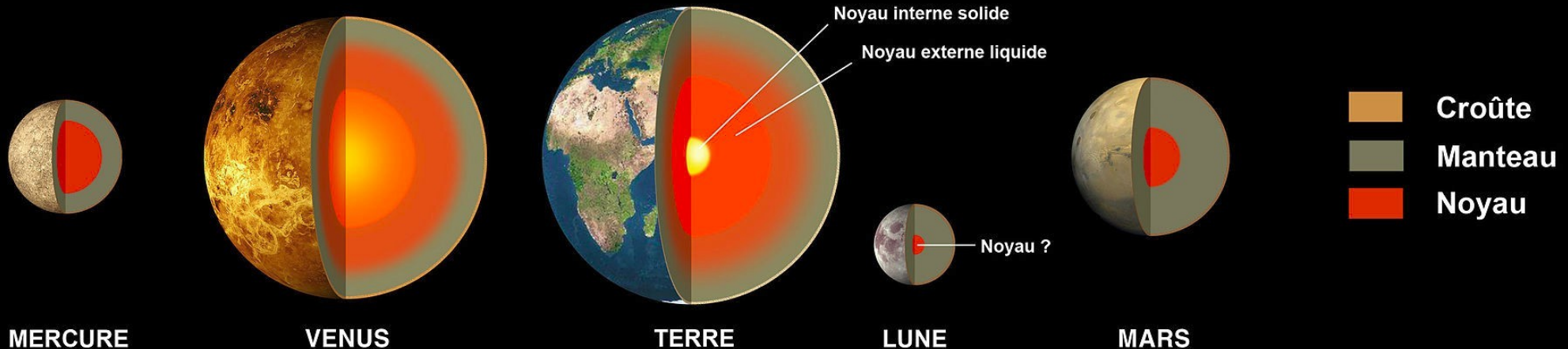
- Une des 4 **planètes telluriques**

- essentiellement **rocheuses** à **noyau métallique**
- Par opposition aux **géantes gazeuses** telles que Jupiter

- La Terre :

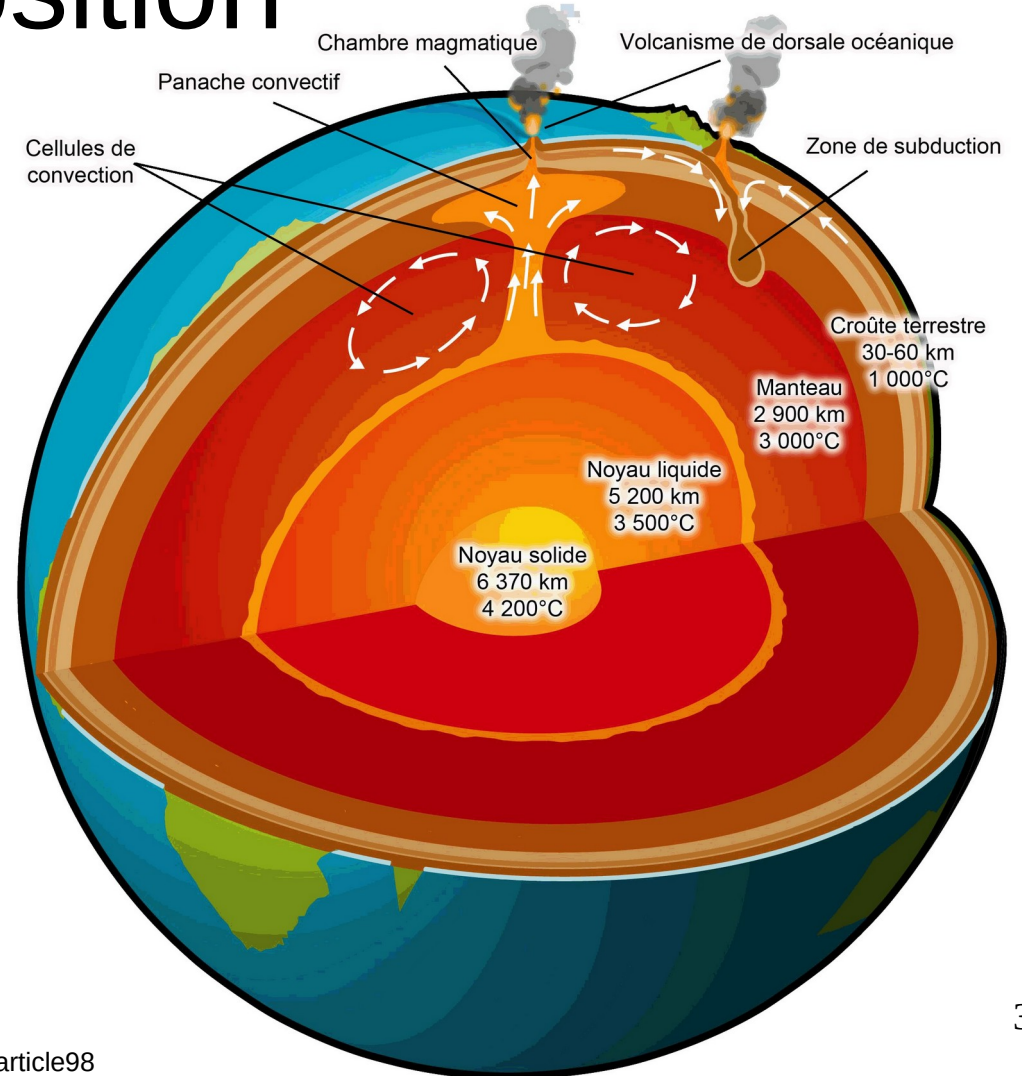
- A la masse volumique la plus élevée et la **plus forte gravité de surface**
- A le **champ magnétique** le plus intense
- A la **vitesse de rotation la plus élevée**
- Est probablement la seule avec une **tectonique des plaques** active

$$g = \frac{4 \pi G}{3} \rho R$$



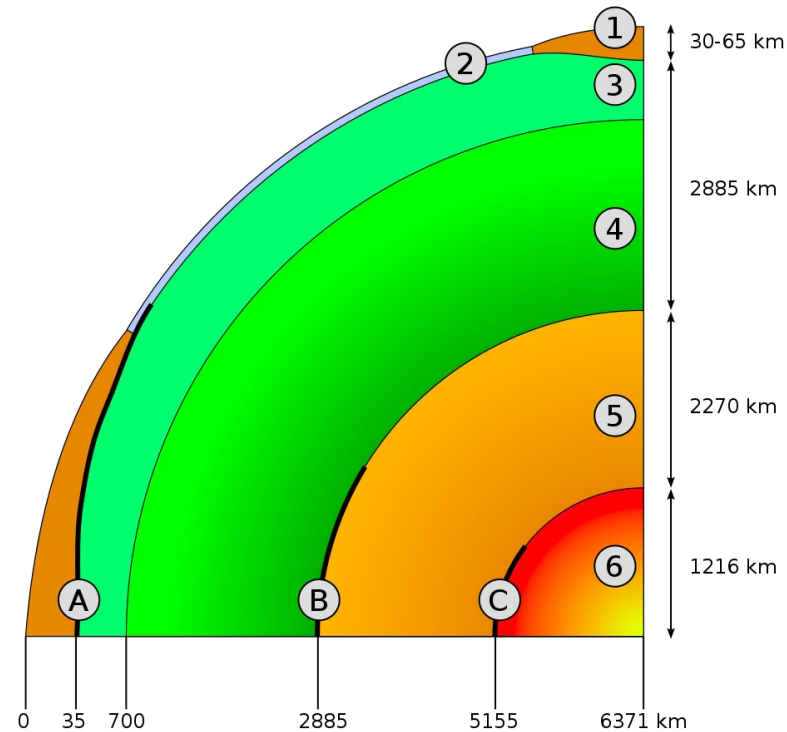
Structure et composition

- **Noyau terrestre :**
 - 17 % du volume et 33 % de la masse
 - Alliage métallique (principalement fer et nickel)
- **Noyau interne solide (« graine »)**
 - Pression ~ 4 millions de bars
(Soleil 350 milliards de bars...)
- **Noyau externe liquide**
 - Même viscosité que l'eau !
- Analyses **indirectes** de la structure par **sismologie**



Discontinuités

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

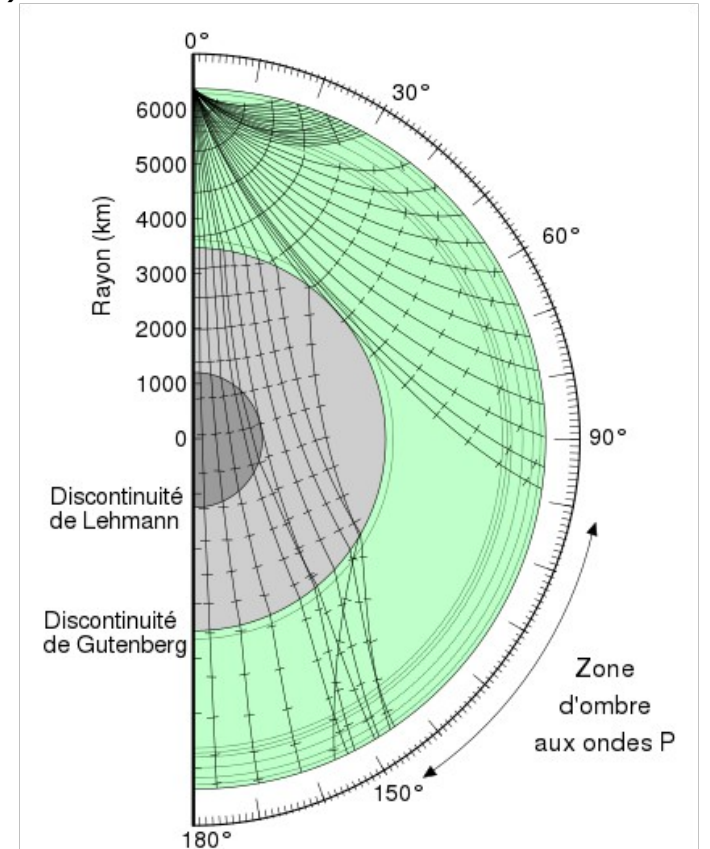


- Zones :

- 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



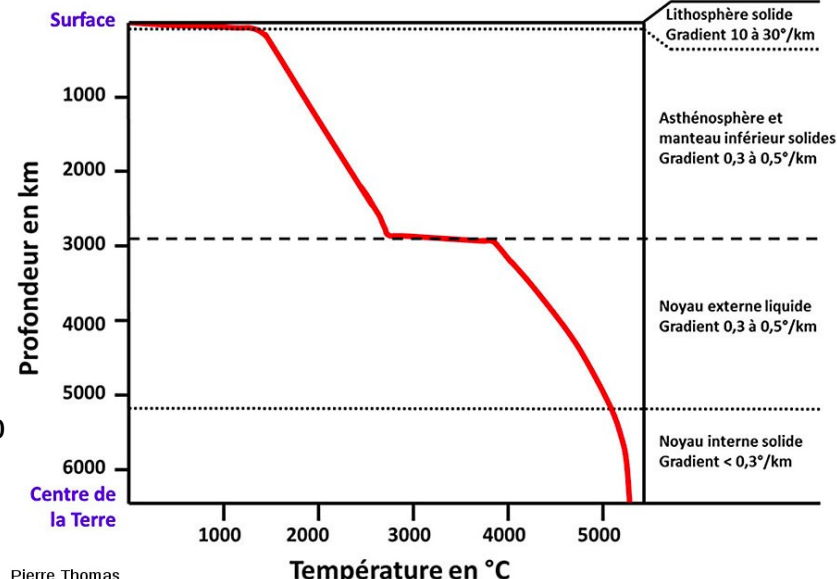
La radioactivité

- **Désintégration radioactives** = principales sources de chaleur qui maintiennent les températures du manteau terrestre :

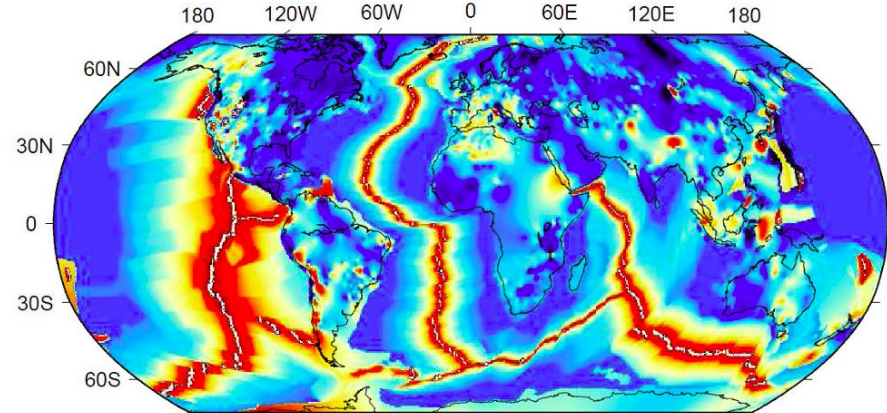
- Thorium ($T_{1/2}(^{232}\text{Th}) = 14 \text{ Ga}$) : 44 %
- Uranium ($T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4,5 \text{ Ga}$, $T_{1/2}(^{235}\text{U}) = 0,7 \text{ Ga}$) : 39% / 2%
- Potassium ($T_{1/2}(^{40}\text{K}) = 1,2 \text{ Ga}$) : 15 %
- ~ 20 TW (20 000 centrales nucléaires)

- Or émissions d'environ 45 TW : **la Terre refroidit !**

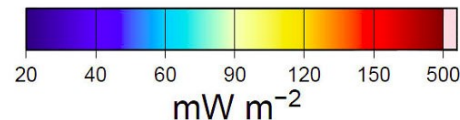
- Sans radioactivité, la Terre serait une planète morte
 - Les petits astéroïdes et comètes ont gelé il y a 5 Ga
 - gros astéroïdes ont gelé il y a 4 Ga
 - Lune a gelé il y a 3 Ga
 - Mars a gelé il y a 1 Ga



Pierre Thomas



Carte du flux thermique mondial



La géothermie

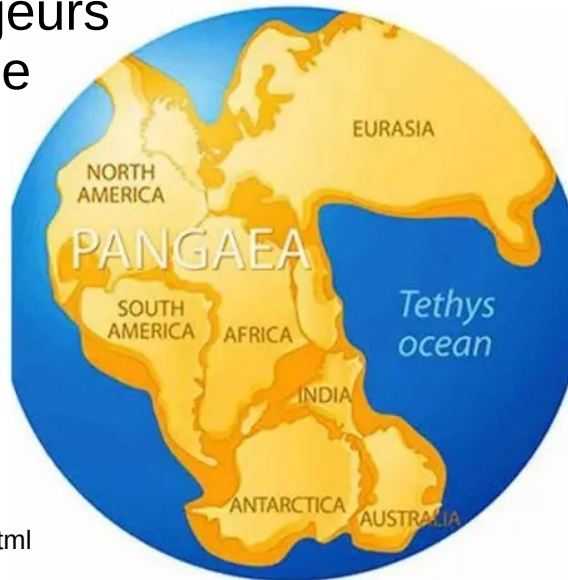
- L'augmentation de la température en fonction de la profondeur est le « **gradient thermique** »
 - $\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$, généralement compris entre 1°C et $10^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$
- Explique la température des grottes
- Permet l'existence des sources chaudes, des geysers, des centrales/installations géothermiques



Geyser du parc national de Yellowstone aux États-Unis,
Centrale géothermique de Nesjavellir en Islande

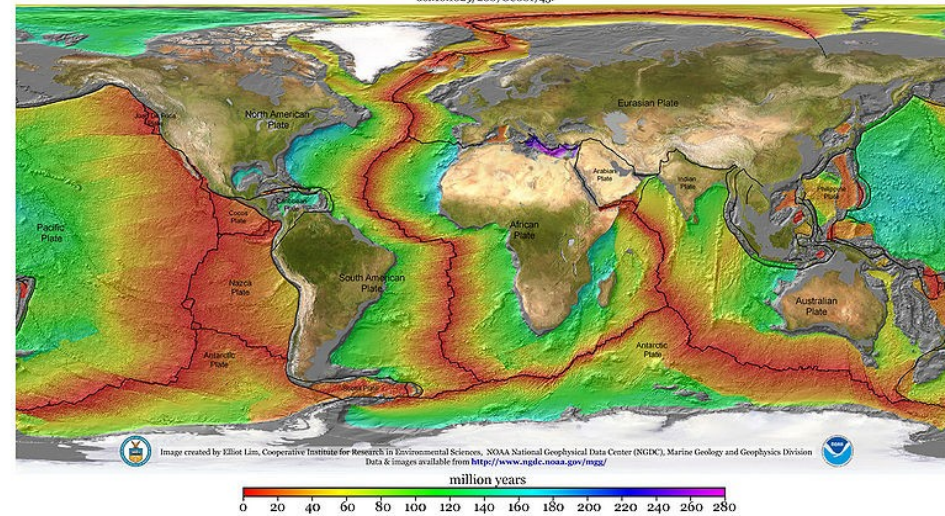
Tectonique des plaques

- Surface de la Terre divisée en plusieurs segments rigides (« plaques tectoniques »)
 - migrent de quelques centimètres par an sur le manteau liquide
 - → déplacements majeurs à l'échelle géologique
- « Pangée » : contient primordial

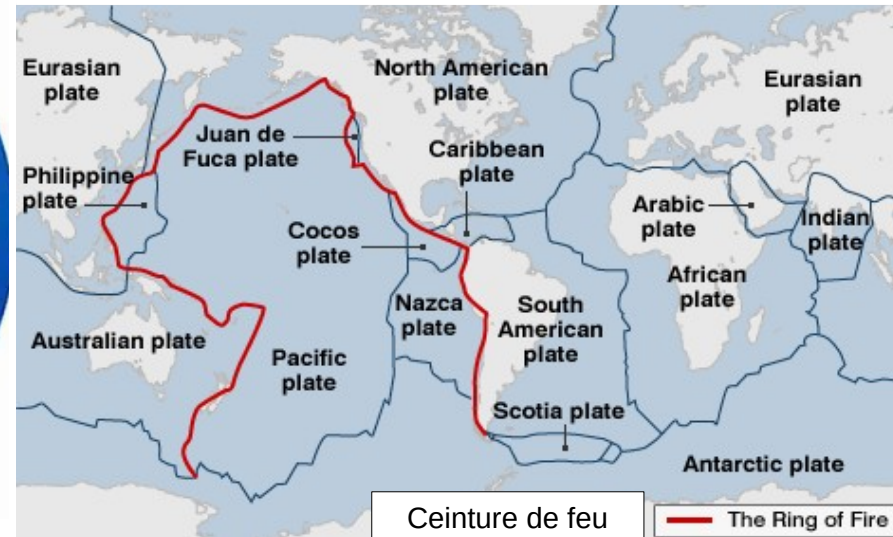


<https://www.meteorologiaenred.com/fr/Pangea.html>

Age of Oceanic Lithosphere (m.y.)
Data source:
Muller, R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest 2008. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743.



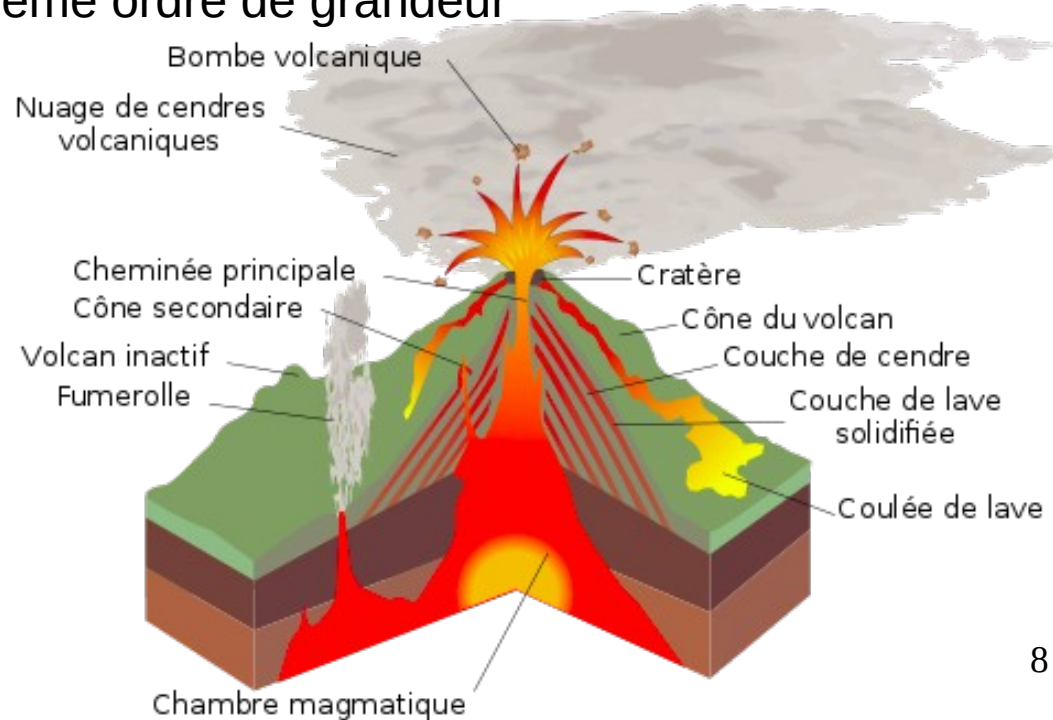
Carte des principales plaques tectoniques terrestres



Volcans

- Structure géologique qui résulte de la **montée de magma** à la surface de la croûte terrestre (ou d'un autre astre, ex : Olympus Mons sur Mars)
 - Peut être **aérien** ou **sous-marin**
- **1432 volcans actifs** dans le monde à la surface de la Terre (+ sous-marins invisibles)

- Dégagent **énormément d'énergie : 2 TW !**
 - Puissance moyenne des **éruptions** : ~1 TW (soit ~1000 tranches nucléaires)
 - Puissance moyenne des **séismes** (principalement mécanique, thermique et potentielle gravitationnelle) mal connue, mais sans doute du même ordre de grandeur



Éruptions volcaniques

- **Effusives : coulées** (volcans « rouges »)
- **Explosives** (volcans « gris ») : **forte pression** qui dépasse le point de rupture des roches



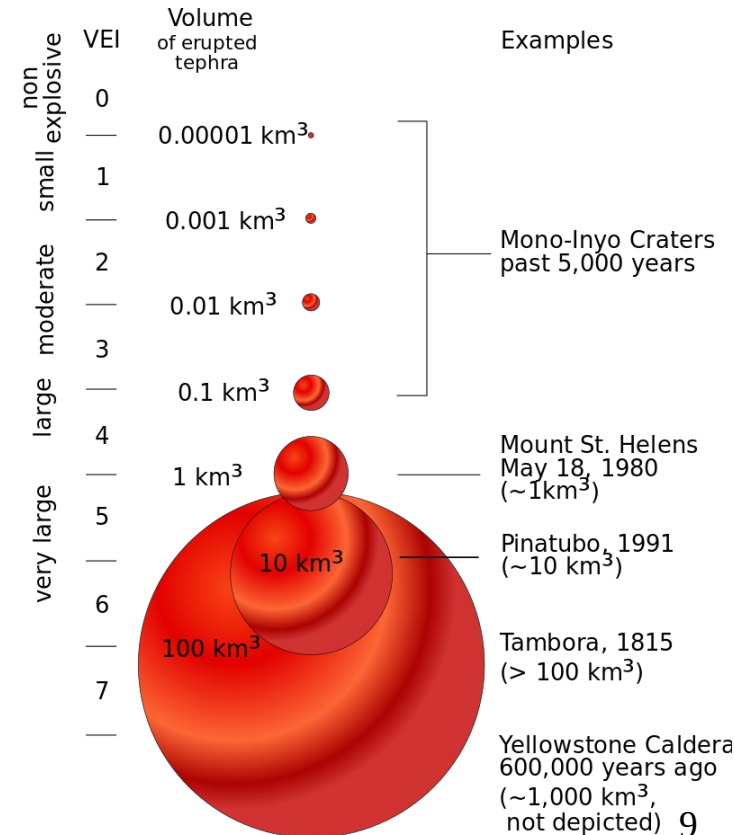
Volcan Pacaya, Guatemala



Panache volcanique s'élevant du Sarytchev (Îles Kouriles) : un pileus coiffe la colonne éruptive

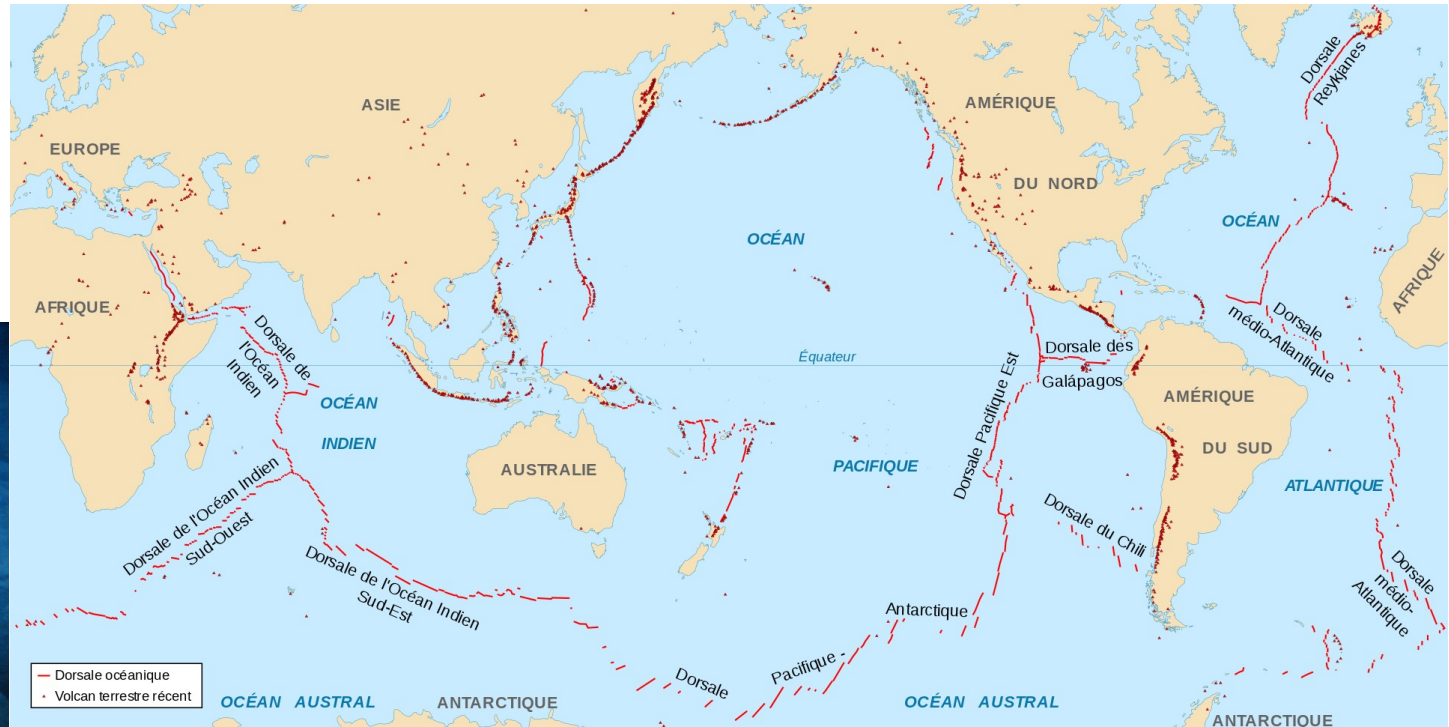
Échelle d'indice d'explosivité volcanique (VEI) : mesure relative de l'explosivité des éruptions volcaniques

Tsar bomba : 50 Mt de TNT
 Krakatoa (1883) : 5 Gt de TNT (22 PJ)



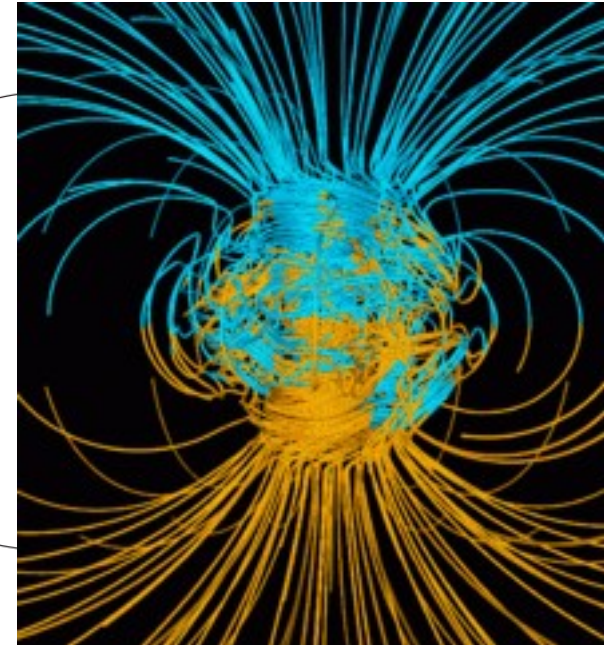
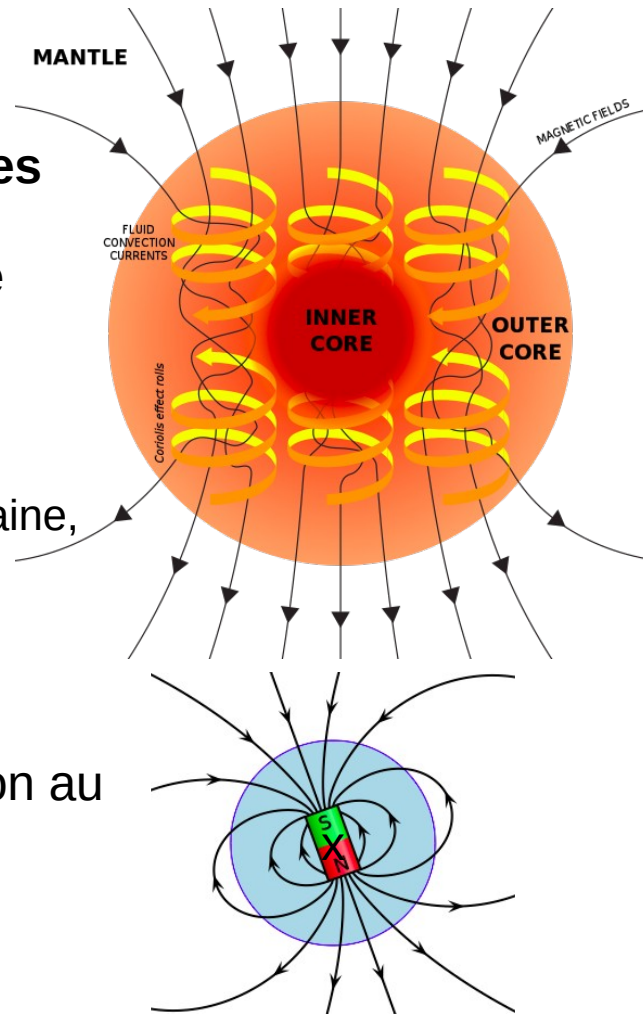
Les volcans sous-marins

- NASA : ~ **1,5 million**, soit **mille fois plus** que les volcans terrestres actifs
 - Surtout situés dans les « dorsales océaniques » (zones d'activité tectonique)
- Pression (250+ bars parfois) + conductivité thermique de l'eau
 - peu d'explosivité
 - difficiles à détecter
- Lave en forme de coussins (« pillow lava »)



Le champ magnétique terrestre

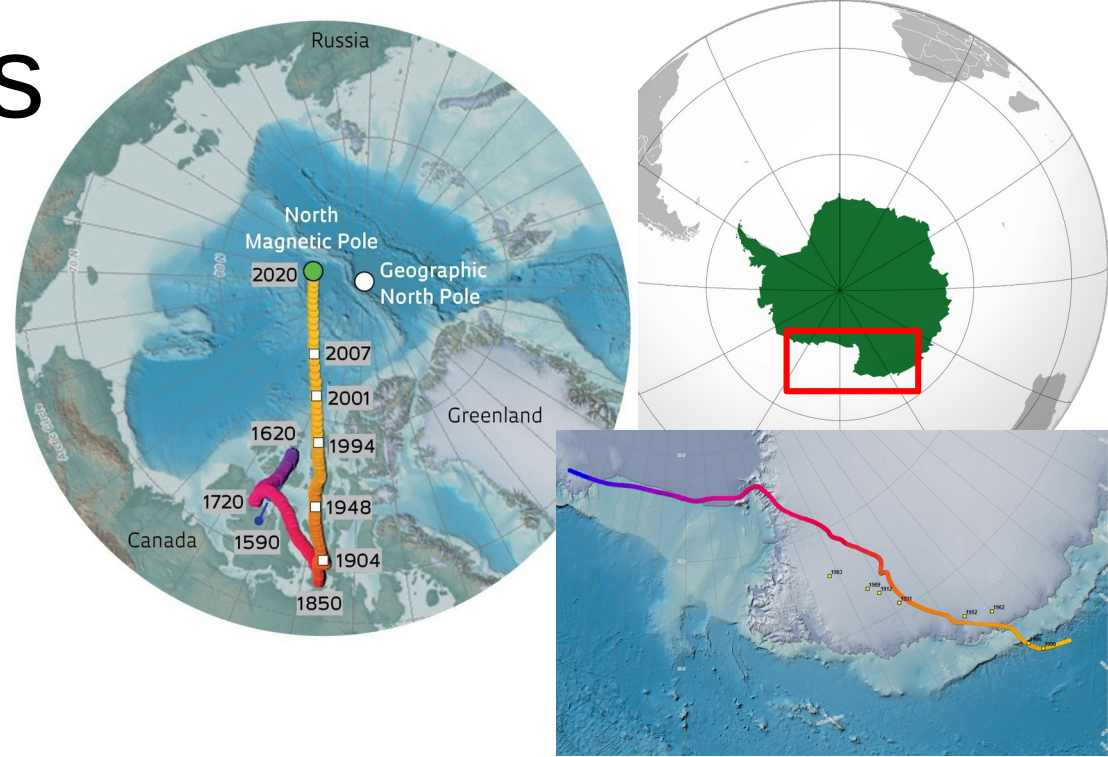
- Existe depuis ~ 3,5 Ga
- Généré par des **courants électriques** dans le **noyau externe** (liquide), entretenus par des **phénomènes de convection** dus
 - Au **refroidissement en périphérie** (convection « thermique »)
 - À la solidification au voisinage de la graine, qui modifie la **composition 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)

Pôles magnétiques

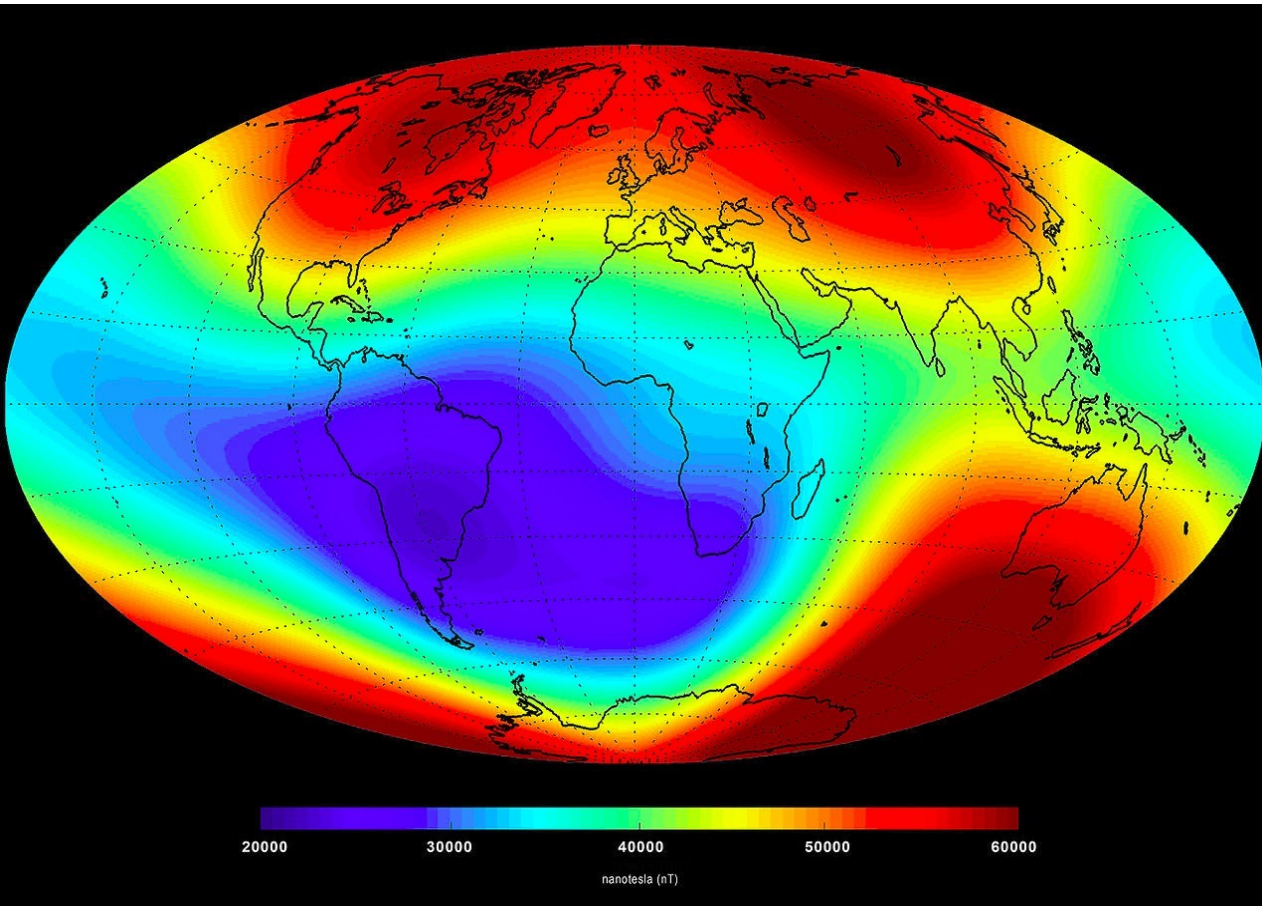
- Le pôle Nord magnétique terrestre est en fait un pôle magnétique Sud
 - (convention due au choix d'appeler « Nord » la direction qu'indique la pointe de l'aiguille de la boussole)
 - Pôle magnétique Sud pas très éloigné du pôle Nord géographique
 - L'axe passant par les pôles géomagnétiques fait un angle de $11,5^\circ$ avec l'axe de rotation de la Terre = « **déclinaison magnétique** »



• Inversion du champ

- Phénomène **récurrent** (300 fois en 200 millions d'années) et **imprévisible**
 - dernière il y a 780 000 ans
- Dure entre 1000 et 1000 ans
- Due à une perturbation du noyau

Le champ magnétique terrestre

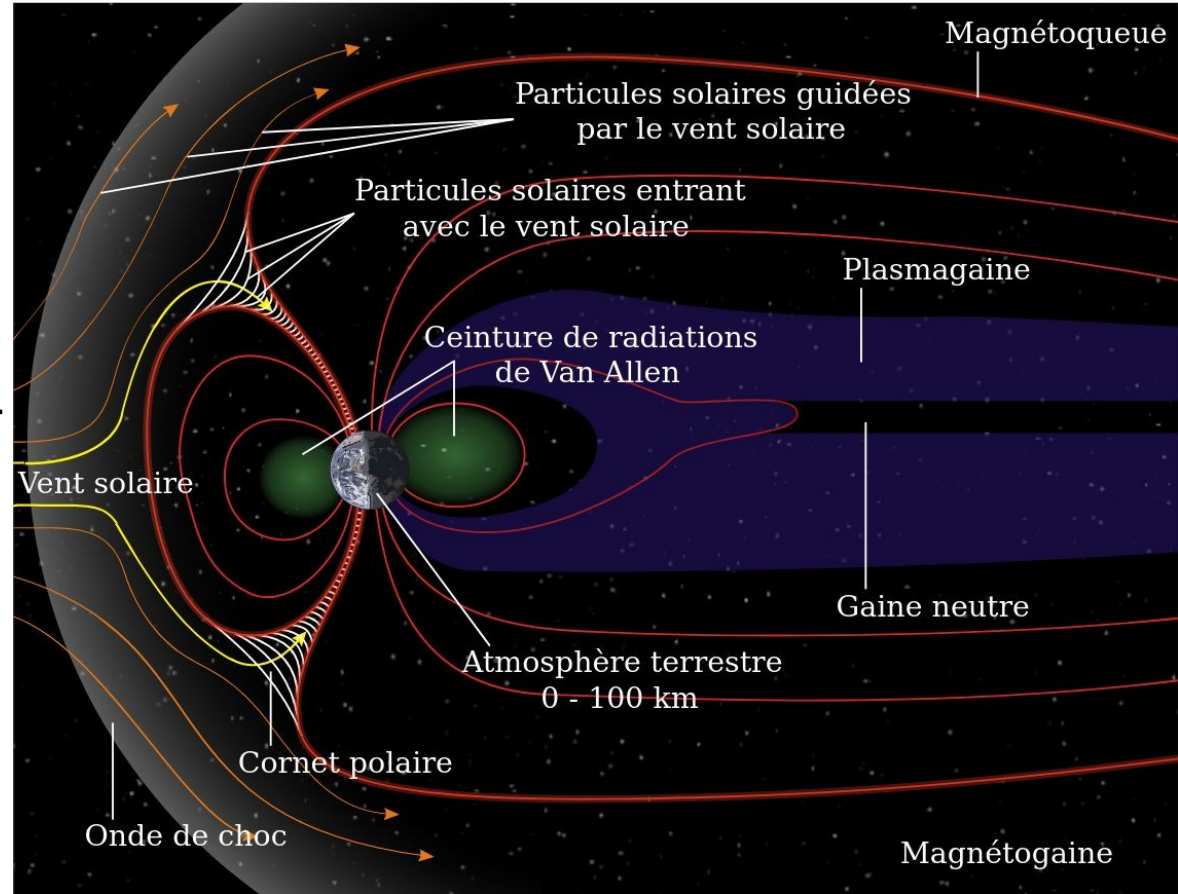


Champ magnétique terrestre mesuré en juin 2014 par la sonde Swarm (ESA/DTU Space)

- $\sim 47 \mu\text{T}$ en France actuellement (aimant $\sim 0,01 \text{ T}$)
- L'influence du champ magnétique terrestre s'étend à **plusieurs dizaines de milliers de kilomètres**
- La **magnétosphère** est la région dans laquelle les phénomènes physiques sont dominés le champ magnétique

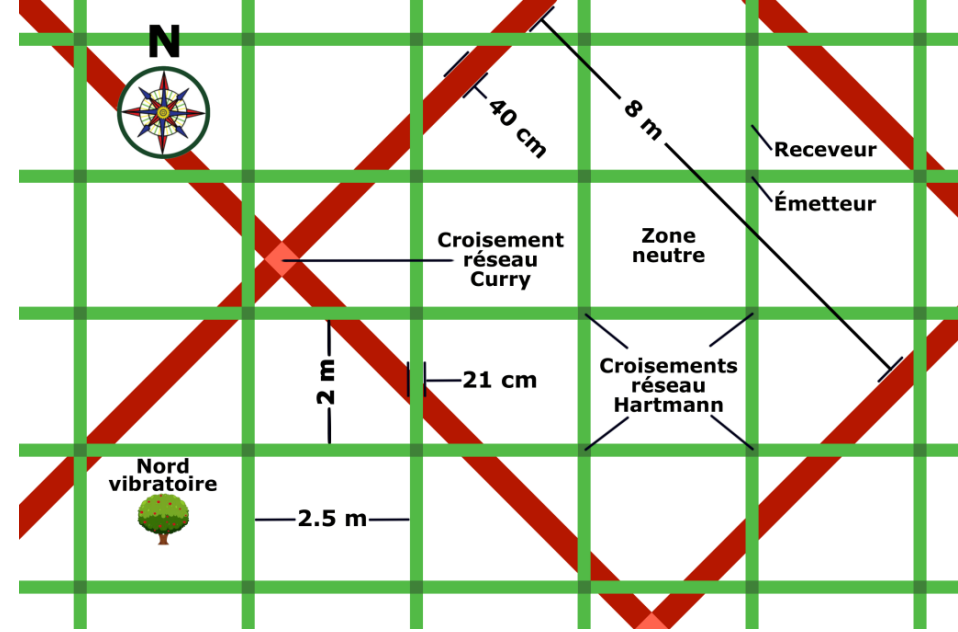
Effets du champ magnétique

- Il protège la Terre des « **vents solaires** » (flux de particules chargées émis par le Soleil)
 - Nocifs pour la vie sur Terre
- Les vents solaires peuvent modifier le champ magnétique
 - « **Orages magnétiques** »
- → modifient les lignes de champ
 - Aplaties côté Soleil
 - Allongées côté opposé



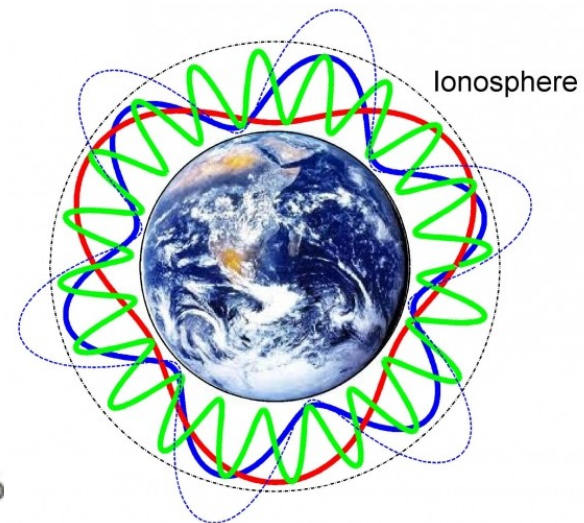
Le réseau Hartmann

- Dans les années 1930, Hartmann (étudiant en médecine) pense qu'il existe un **réseau de « courants telluriques »**
 - « grille magnétique d'ondes éthériques stationnaires appelées réseaux cosmotelluriques ou géomagnétiques »
 - Aurait fait des expériences en déplaçant les lits pour conclure à des surmortalités à certains endroits
- Associé à d'autres réseaux
 - Hartmann = 1^{er} réseau « global » (cardinal : E-O, N-S), Ni
 - Curry = 1^{er} réseau « diagonal », Fe
 - Wissman = 2^{ème} réseau diagonal, Al

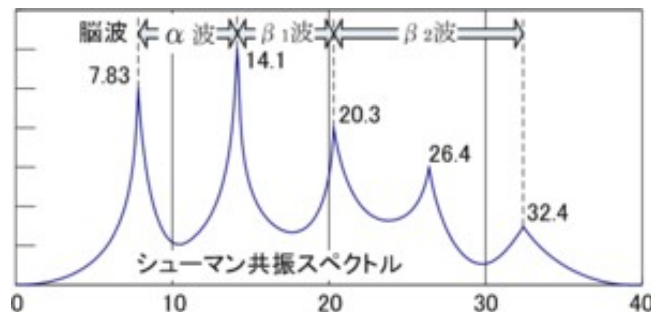


- Détecté avec des **baguettes** ou autres instruments manuels
 - « Pas de mesure confirmée par des appareils classiques »
 - Existence de l'effet « **idéomoteur** » : mouvements musculaires inconscients
- On peut aujourd'hui mesurer des champs magnétiques **cent milliards de fois plus faibles que le champ terrestre**

Résonances de Schumann



Ionosphere



- **Pics dans le spectre du champ électromagnétique terrestre**

- = **résonances** entretenues par les éclairs dans la **cavité** formée par la surface de la Terre et l'ionosphère

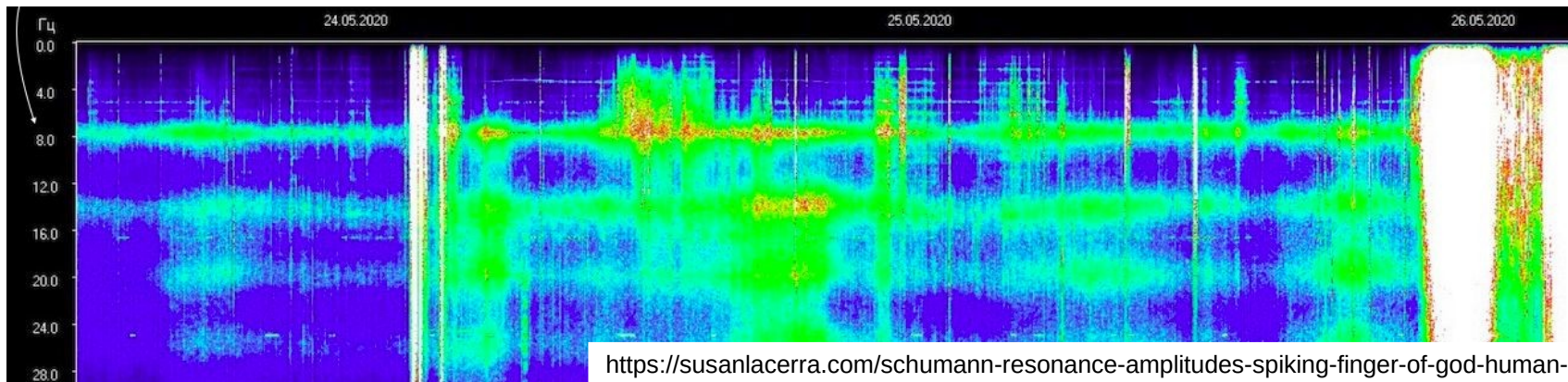
- **Mode principal :**

- λ_0 = circonférence Terre : $f_0 = 7,8$ Hz

- Harmoniques : $f_1 = 14,1$ Hz, $f_2 = 20,3$ Hz, $f_3 = 26,4$ Hz, ...

- **Prédites** par Schumann dans les années 50, **observées** dans les années 60

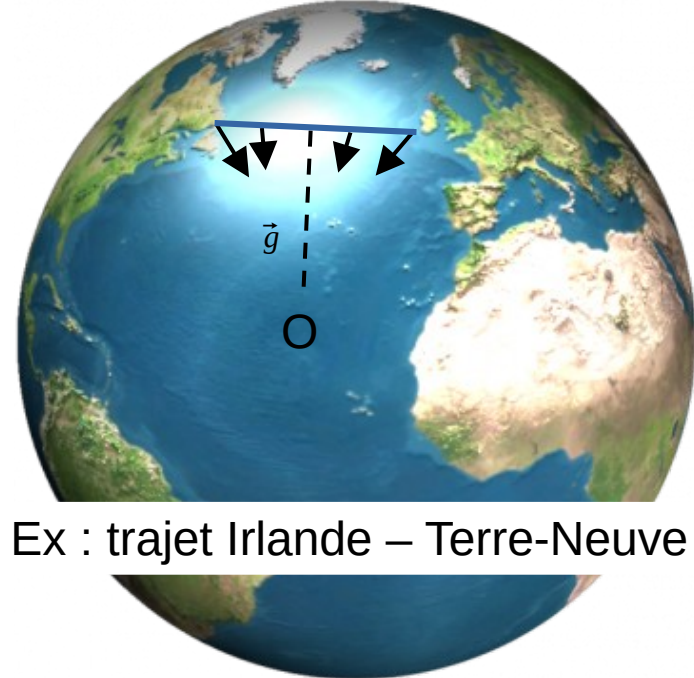
- **ionosphère** : couche de l'atmosphère caractérisée par une **ionisation partielle des gaz** (due aux UV → **plasma**), entre 60 et 1 000 km d'altitude



Train gravitationnel

- Principe : on creuse un **tunnel rectiligne** qui relie 2 points à la surface de la Terre
- Deux phases
 - **Accélération** jusqu'à l'aplomb du centre de la Terre (profondeur augmente)
 - **Décélération** jusqu'à une **vitesse nulle en sortie** (si on néglige les frottements...)
- Le temps de trajet est de 42 min **quels que soient les points reliés**
- En pratique,
 - Nécessité de faire le **vide** dans les tunnels et de compenser les **forces de frottement**
 - Eviter les parties liquides...

$$T = \sqrt{\frac{3\pi}{4\rho G}}$$



Ex : trajet Irlande – Terre-Neuve

