

La physique de la Terre III

La surface

Notions utilisées :

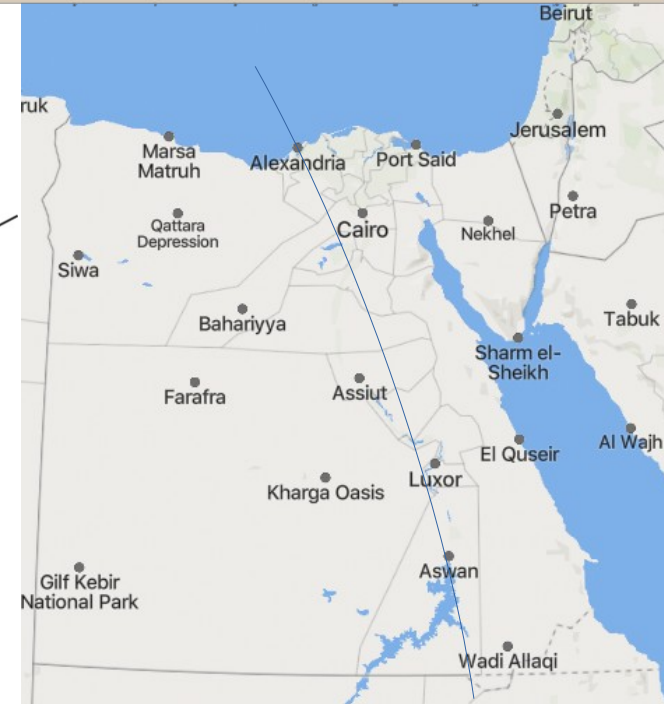
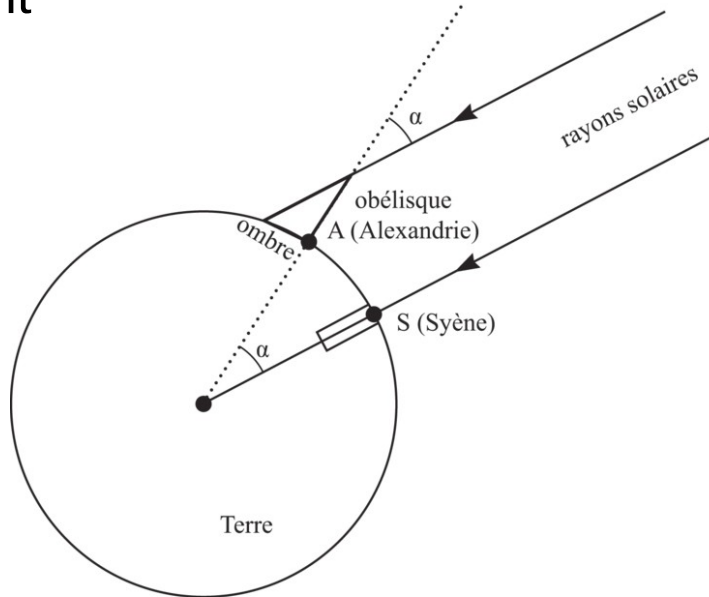
1. Introduction



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

Rayon de la Terre

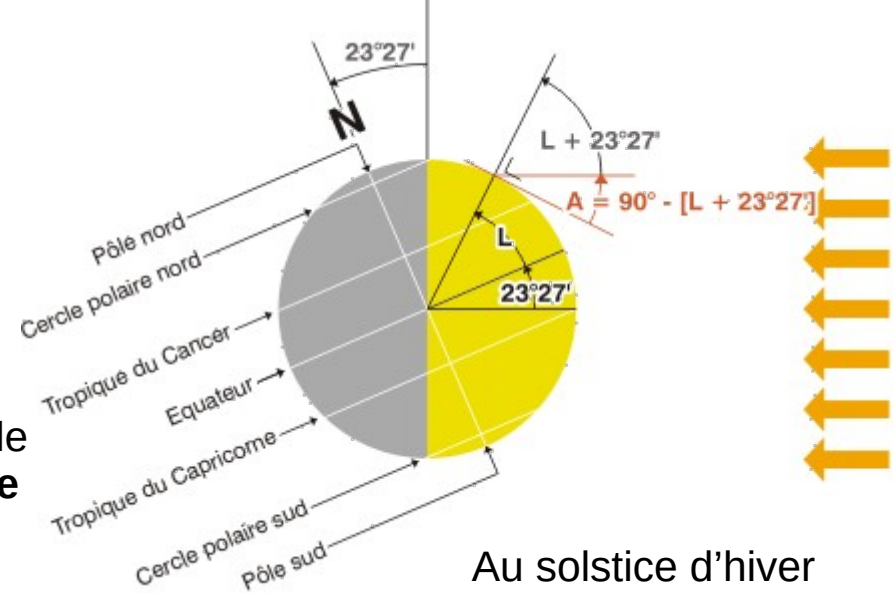
- Mesure par **Ératosthène** au **III^e siècle avant J.-C.**
- Hypothèse : rayons du Soleil **parallèles**
- Le jour du **solstice d'été**, les rayons sont verticaux à midi à Syène (Assouan), c'est-à-dire sur le tropique du Cancer
- À Alexandrie, les rayons sont inclinés de **1/50^e de cercle**
- Donc la circonférence de la terre est 50 fois la distance Syène-Alexandrie
- → Longueur du méridien = 39500 km, $r = 6286$ km
- **Précision de 2 % !**



Les coordonnées

- Angle « vertical » mesuré depuis l'équateur = **latitude**

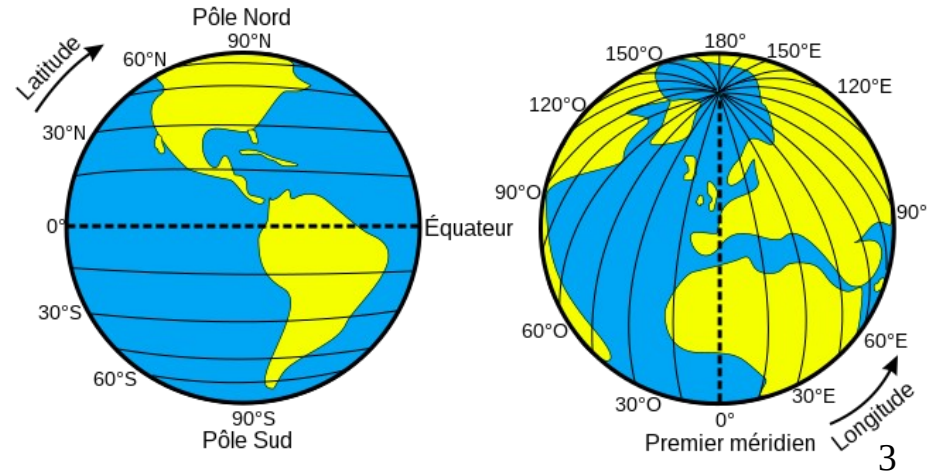
- → cercles définissant des « **parallèles** »
- **Cercles polaires** : au moins une journée où le Soleil ne se lève pas en hiver et ne se couche pas en été
- Les **tropiques définissent** une bande à l'intérieur de laquelle le Soleil apparaît au **zénith au moins une fois dans l'année**
 - latitude = angle / écliptique ($23^{\circ}26'$)



Au solstice d'hiver

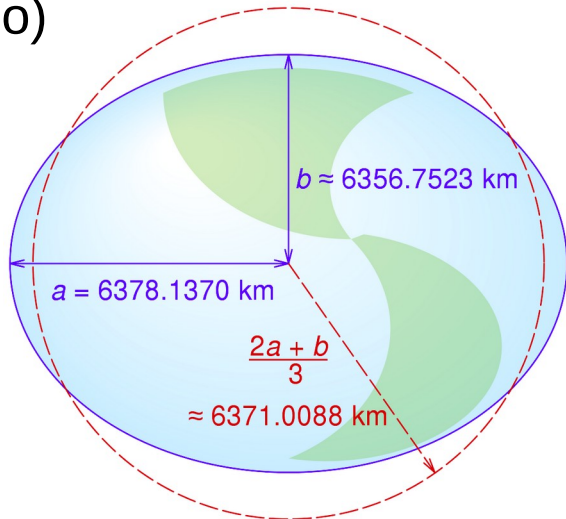
- Angle « horizontal » = **longitude**

- Mesuré depuis la ville de Greenwich en G-B : position de la lunette méridienne de J. Bradley
- → cercles définissant des « **méridiens** »
- En fait déplacé de 13 m à l'Est → **référence internationale depuis 1884**
 - Adopté par la France en 1911, qui abandonne l'espoir du « méridien de Paris »...
 - Pendant que la Grande-Bretagne continue à utiliser le méridien traditionnel → cartes décalées

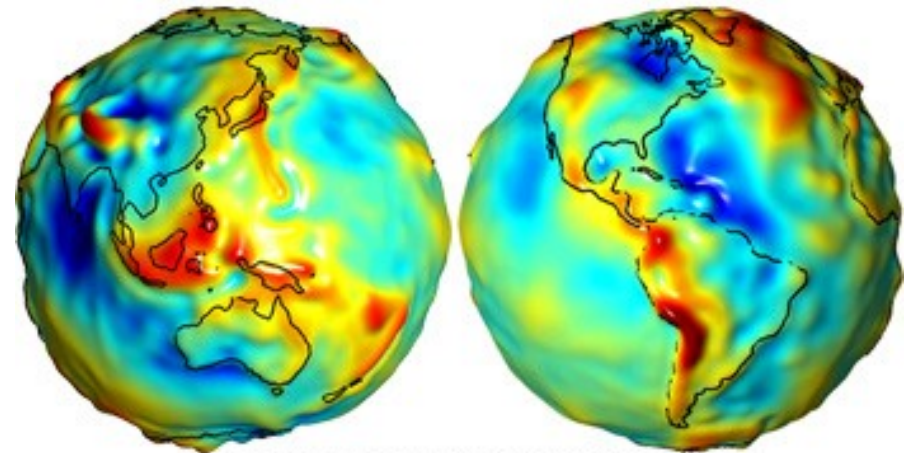


Forme de la Terre

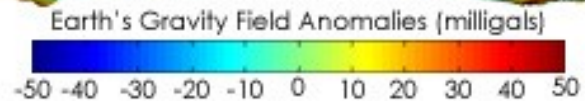
- Terre pas parfaitement sphérique
 - **ellipsoïde aplati aux pôles**
 - $R_{\text{équatorial}} = 6\,378\text{ km}$, $R_{\text{polaire}} = 6\,356\text{ km}$
 - $\Delta R \approx 22\text{ km}$, $\Delta R/R \approx 3\text{ ‰} \approx 3\text{ mm/m}$
- Distances entre surface et centre comprises entre $6\,353\text{ km}$ (fond de l'océan Arctique) à $6\,384\text{ km}$ (sommet du Chimborazo)



- Conséquences :
 - Gravité **plus faible à l'équateur qu'aux pôles**
 - Force centrifuge : $0,3\text{ ‰}$
 - Éloignement : $0,2\text{ ‰}$
- Lancement des satellites

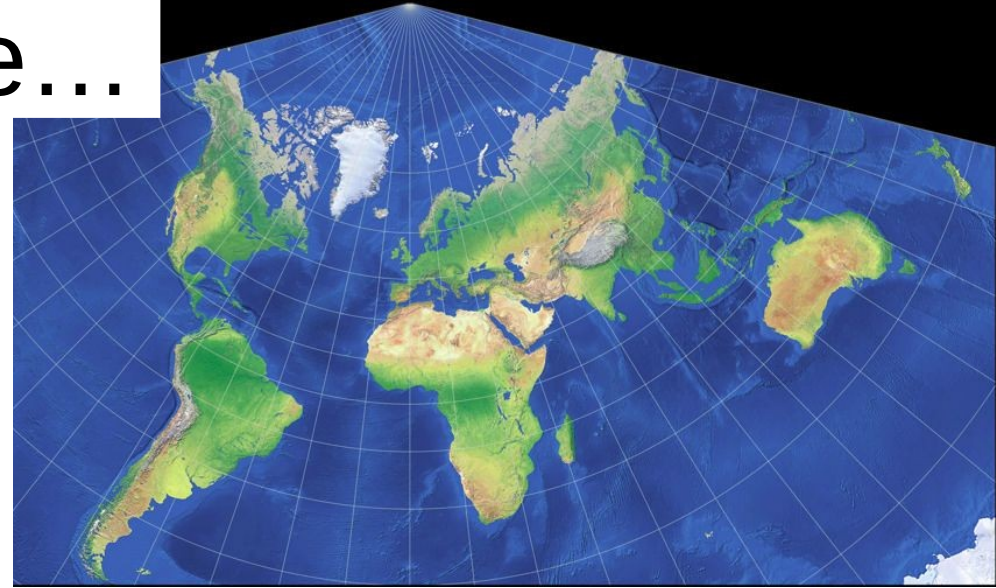


1 mgal = $10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

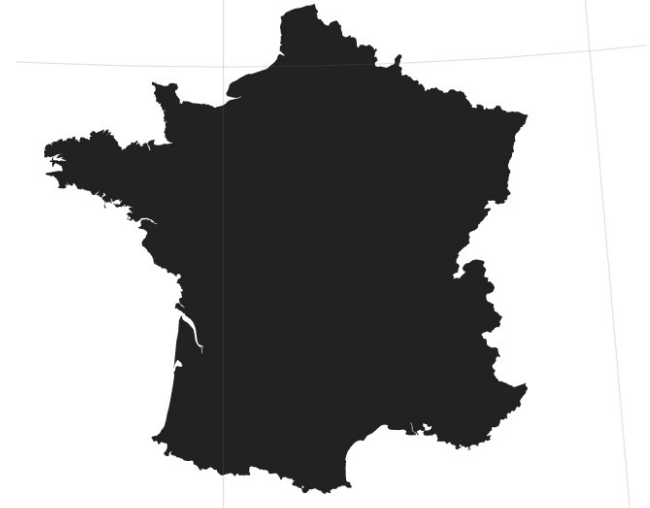
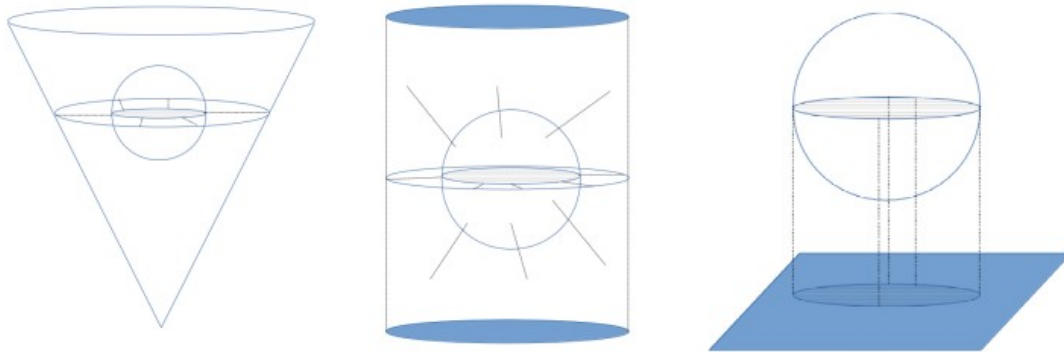


Et la Terre devient plate...

- Impossible de représenter fidèlement en 2D un objet en 3D, il y a toujours des **déformations**
- Projection : (latitude, longitude) \rightarrow (x, y)
 - Dite « équivalente » si elle conserve les surfaces
- On imagine que la Terre rayonne autour d'elle et projette sur un papier
 - \rightarrow 3 types de projections : **conique**, **cylindrique**, **azimutale**

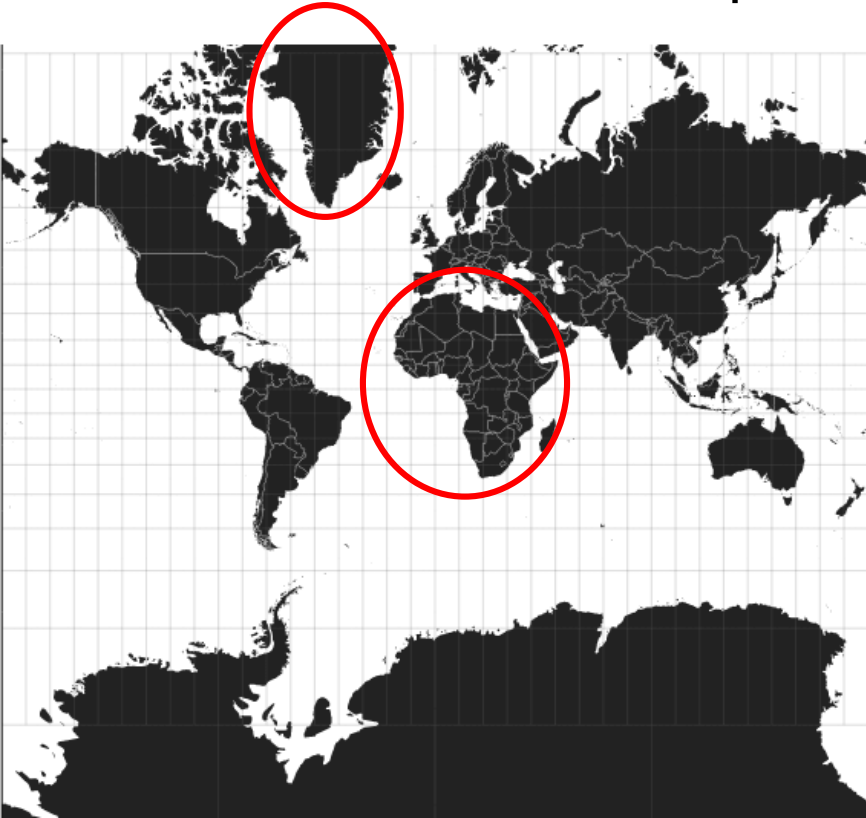


Projection conique conforme de Lambert
= projection officielle pour la France



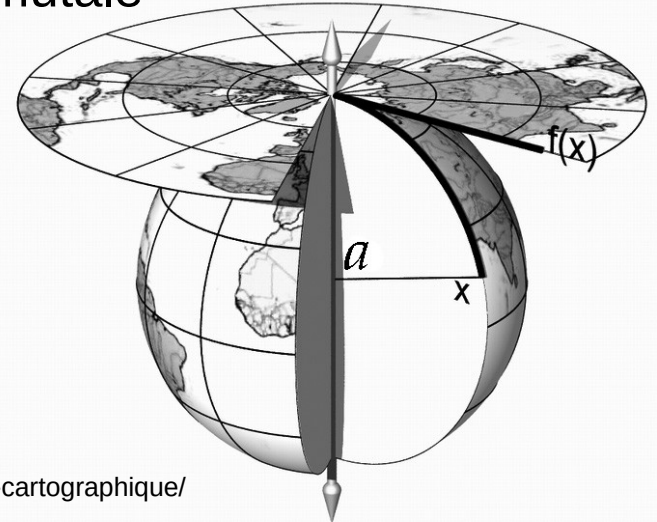
Exemples

- Projection cylindrique de Mercator : conserve angles et formes, pôles très distordus, surfaces trompeuses



Projection cylindrique équivalente de Gall-Peters

- Projection azimutale isométrique



La croûte terrestre

- Ou « **écorce** terrestre » : partie supérieure de la **lithosphère**
- Lithosphère = enveloppe superficielle rigide de la surface de la Terre
 - comprend la **croûte terrestre** et une partie du **manteau supérieur**
 - Constituée des **plaques tectoniques** (ou plaques « lithosphériques »)
- **Discontinuité de Mohorovičić** (« Moho ») = limite inférieure de
 - la **croûte continentale** (épaisseur comprise entre 20 et 90 km, plus épaisse sous les chaînes montagneuses)
 - et de la **croûte océanique** (épaisseur comprise entre 5 et 10 km)
 - Profondeur moyenne de 35 km

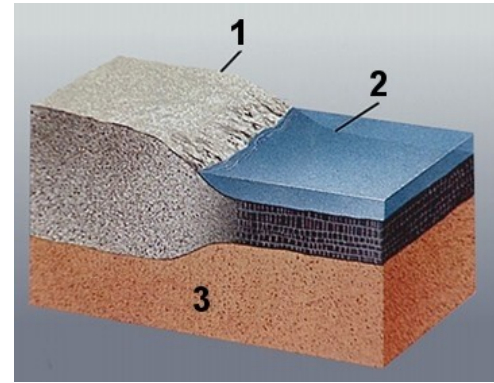
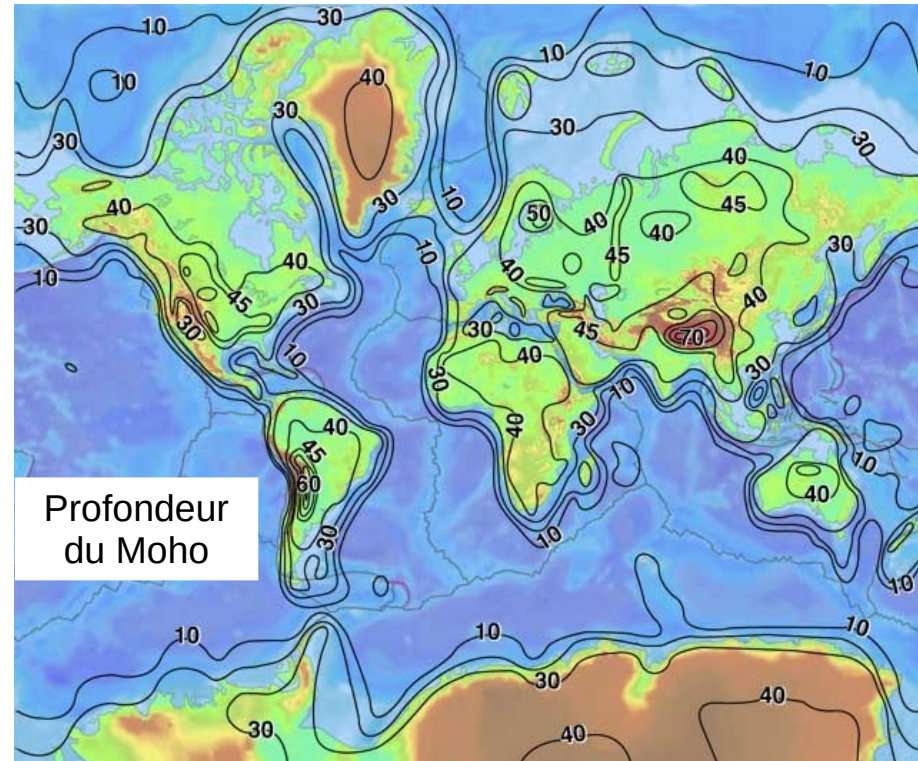


Schéma simplifié de la croûte terrestre.

- 1 : croûte continentale
- 2 : croûte océanique
- 3 : manteau supérieur



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

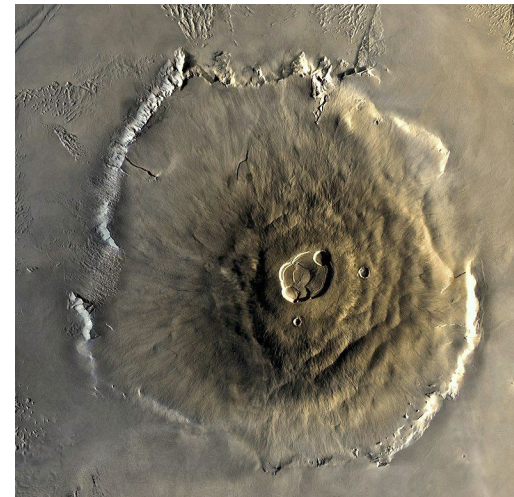
- Everest :
 - **8 849 m** au-dessus du niveau de la mer
 - 6 382,605 km du centre de la Terre
- Chimborazo :
 - 6 263 m au-dessus du niveau de la mer
 - **6 384,416 km** du centre de la Terre
- Mais... Mauna Loa (Hawaï) :
 - **4 169 m** au-dessus du niveau de la mer
 - **10 km** au-dessus de sa base...



Hauteur maximale des montagnes

- Plus la hauteur d'une montagne est élevée
 - Plus sa **masse** est élevée, plus elle **appuie sur le manteau**, plus sa **base chauffe** et peut fondre
 - Plus les **contraintes** sont fortes sur
 - La base de la montagne → **cisaillement** et **affaissement**
 - Les **fissures** provoquées par le mécanisme même de création des montagnes et les cycles gel/dégel
 - En 1991, l'Aoraki (Mont Cook), point culminant de Nouvelle-Zélande, a perdu 10 m
- Calcul d'ordre de grandeur → ~ 10-15 km max

Et ... Olympus Mons, volcan sur Mars culminant à **21 229 m** au-dessus du « **niveau de référence martien** »

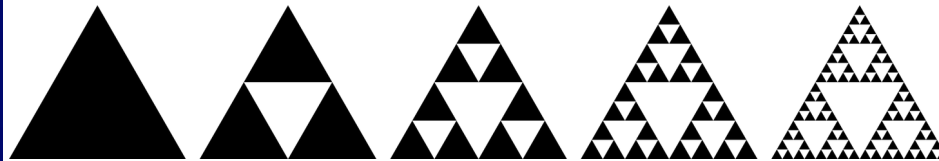
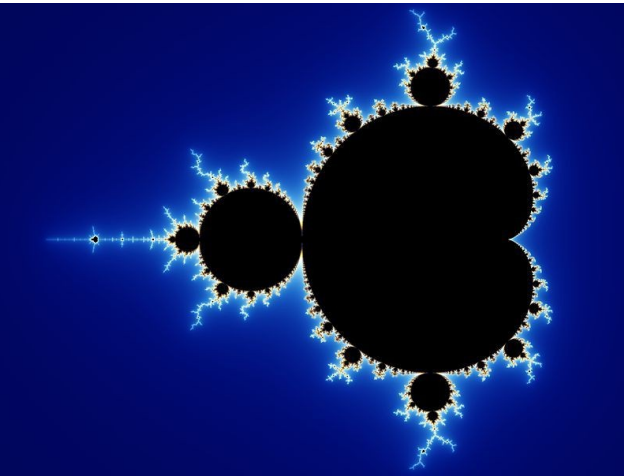


Les fractales

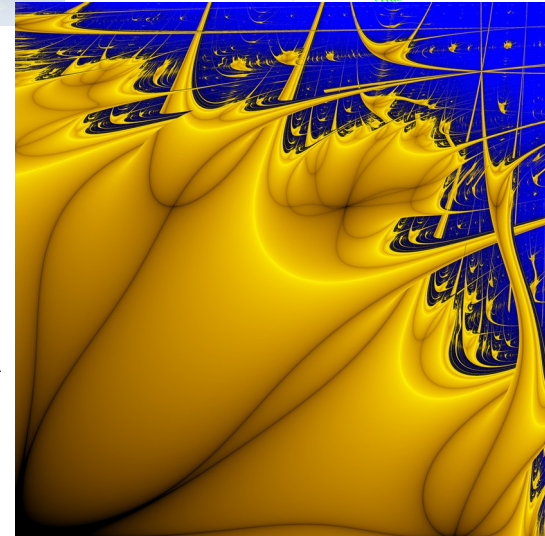
- Approximations dans la nature
 - Végétation, flocons de neige, montagnes, vaisseaux sanguins, ...



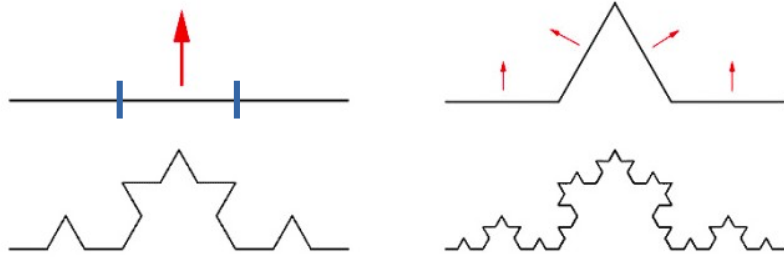
- Objet mathématique qui présente une **structure similaire à toutes les échelles**
- La **dimension fractale** traduit la façon dont une fractale **remplit l'espace**
 - **non entière**
 - supérieure à la « **dimension topologique** » (1 pour une ligne, 2 pour un plan)



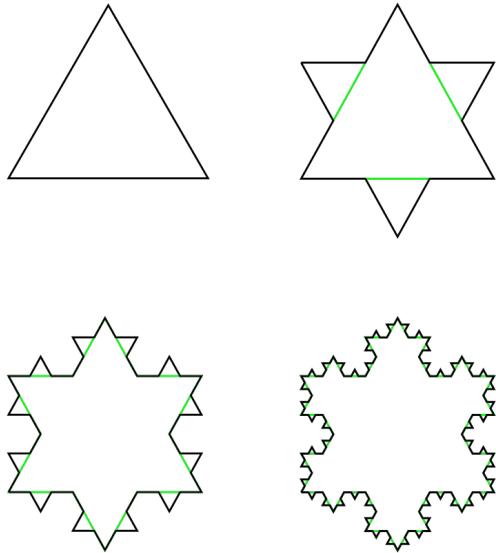
Fractales de Mandelbrot, Sierpinski, Liapounov



- Principe



- Application à un triangle



Le flocon de Koch

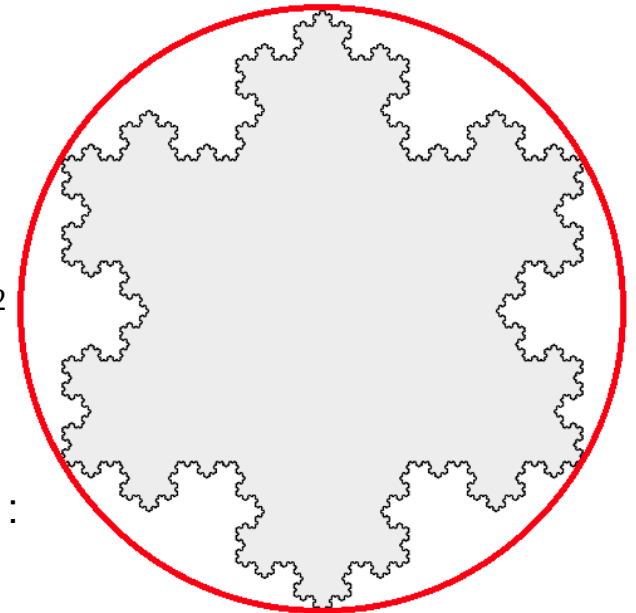
- Résultat « final »
 - Courbe de **longueur infinie** délimitant une **aire finie**

$$P_n = 3s \left(\frac{4}{3} \right)^n \rightarrow +\infty$$

$$A_n = \frac{\sqrt{3}}{4} s^2 \left(8 - 3 \left(\frac{4}{9} \right)^n \right) \rightarrow \frac{2\sqrt{3}}{5} s^2$$

Lorsque sa taille triple, sa longueur est multipliée par 4 : sa dimension fractale est

$$d = \frac{\ln 4}{\ln 3} \approx 1,26$$



Courbes « remplissantes » »

- ~ Courbes à 1D remplissant un espace à 2D
 - Dimension fractale = 2

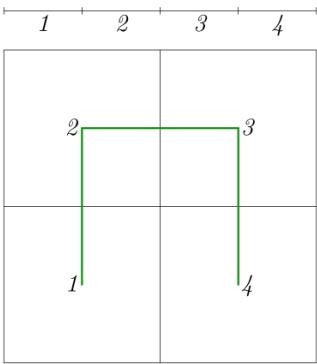


Fig. 1.

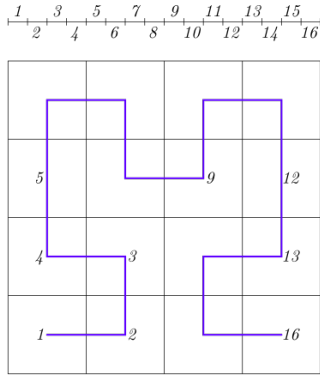


Fig. 2. Courbe de Hilbert

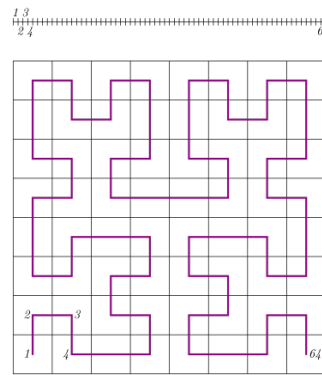
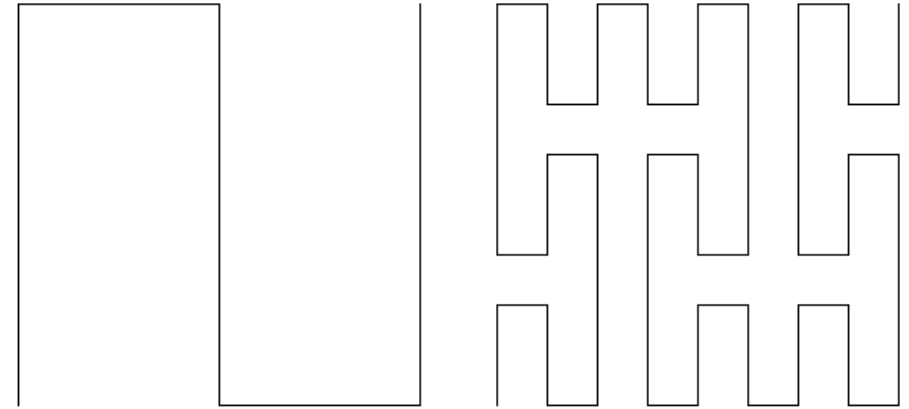
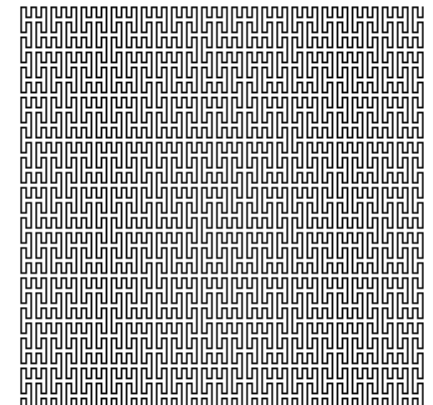
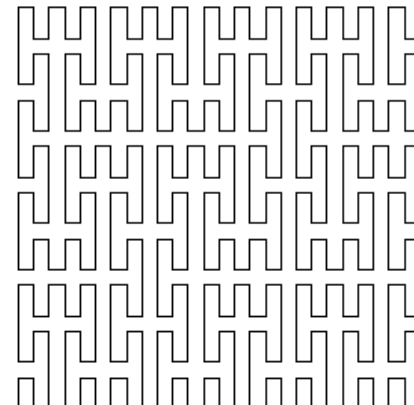
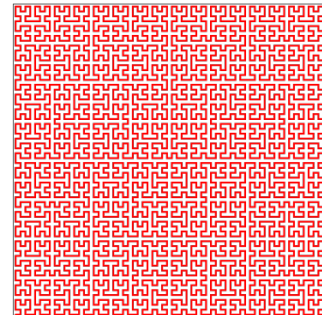
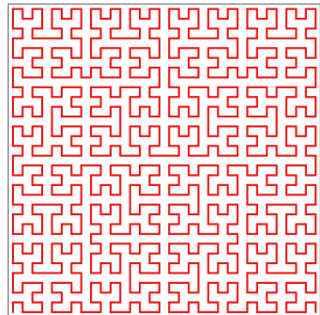
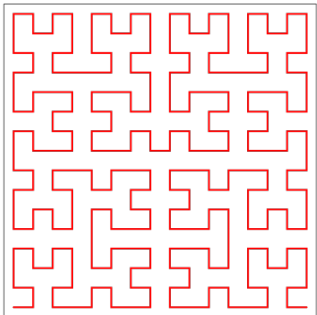


Fig. 3.

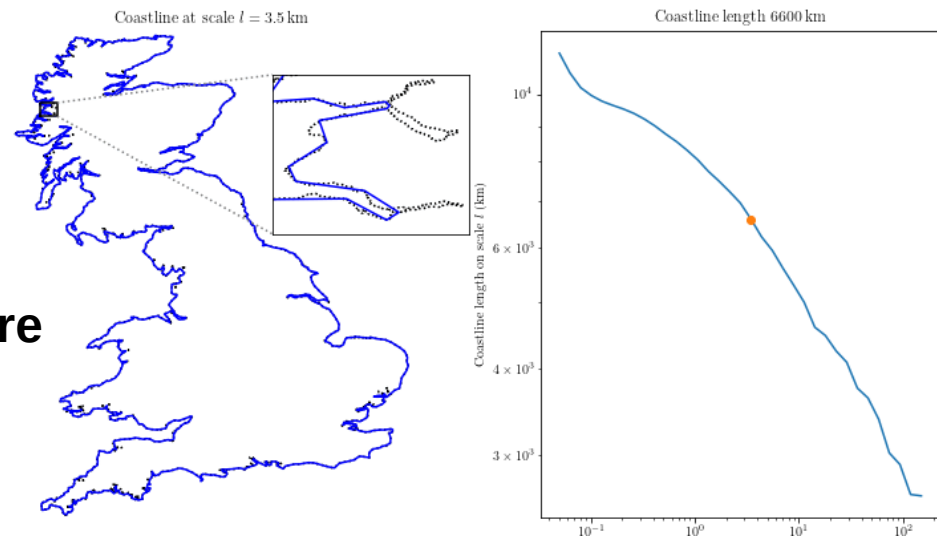


Courbe de Peano



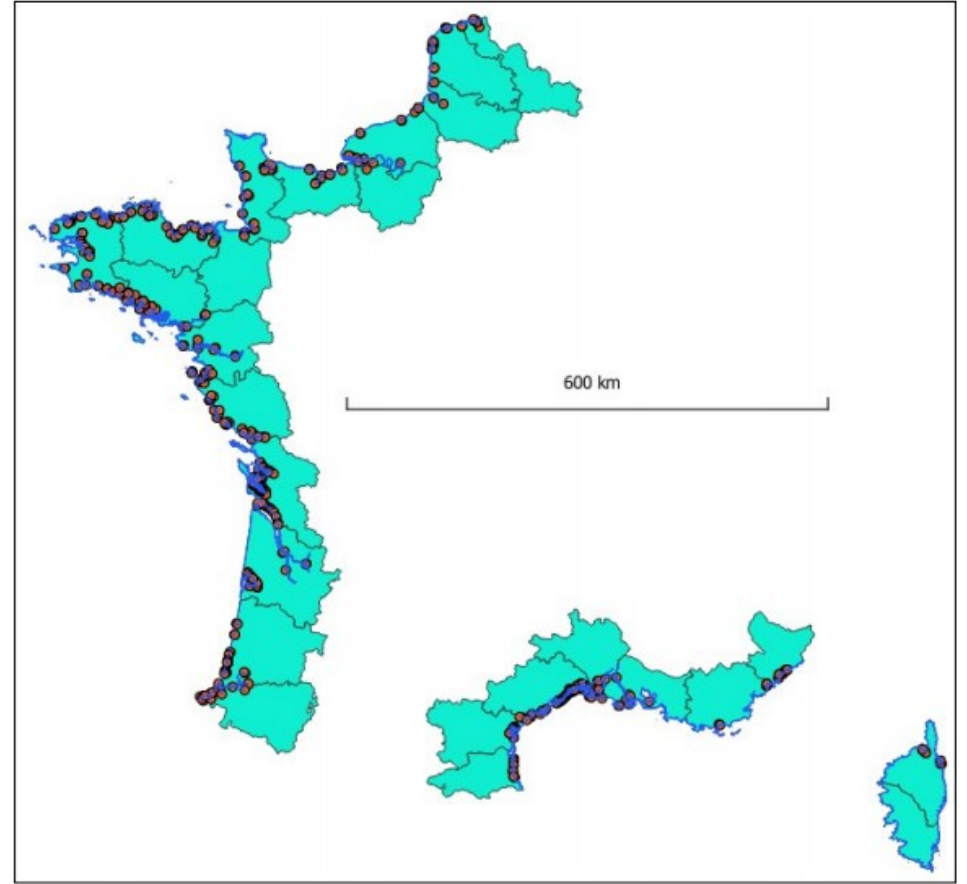
La longueur des côtes

- Concept pas rigoureux : « **paradoxe du littoral** »
- « Effet Richardson » : **plus l'unité de mesure utilisée est petite, plus la mesure d'une frontière est longue**
- En 1967, Benoît Mandelbrot démontra que la longueur d'une côte est **par nature infinie**
 - dimension fractale pour les côtes : 1,24 pour Grande-Bretagne, 1,04 pour Afrique du Sud, 1,33 pour la Bretagne



Longueur des côtes françaises

- Recalculée par l'IGN en 2022
- Longueur de la **limite terre-mer** lors d'une **marée de coefficient 120** avec une **précision de 5m**
- → **17659 km** au lieu de 14576 km : + 3000 km !



Les marées

$$F = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

- 2 types de causes :

- Force de gravitation décroissante en $1/r^2$

- Différente des 2 côtés de la Terre exposés à la Lune et au Soleil
 - Bourrelet des 2 côtés :
 - Côté près de l'astre car attraction > celle sur le centre
 - Côté opposé à l'astre car attraction < celle sur le centre

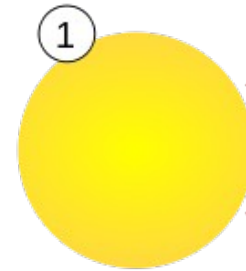
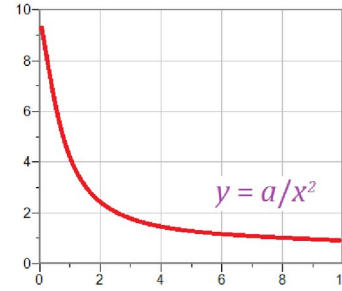
- Rotation de la Terre autour du barycentre Terre-Lune

- Force centrifuge

- Composition des 2 forces → coefficients de **marée** (définis par rapport au port de Brest) : entre 20 et 120

- Période : 12 heures 25 minutes

(composition de la rotation de la Terre et de la révolution de la Lune autour de la Terre)

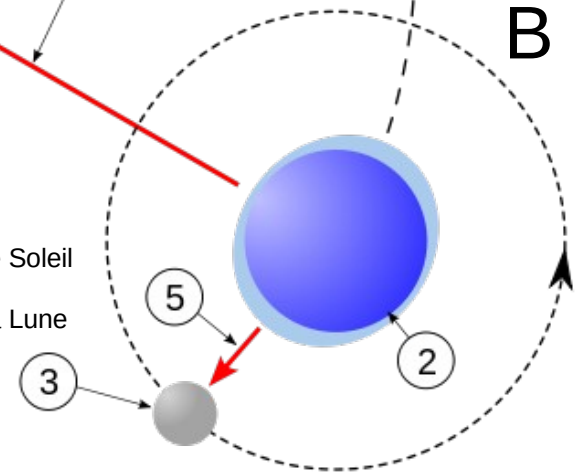


A. Syzygie ; B. Quadrature

1. Soleil ; 2. Terre ; 3. Lune

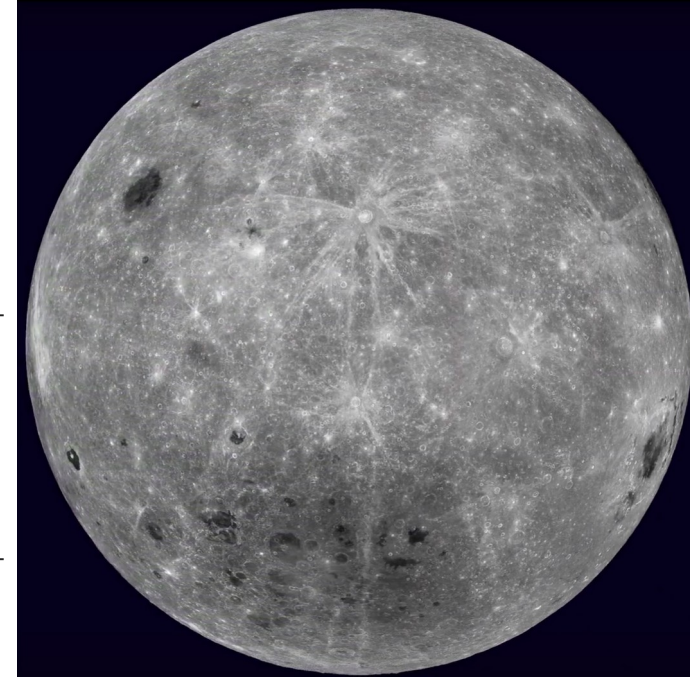
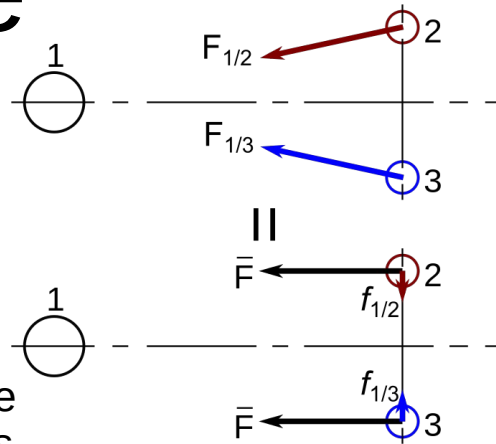
4. Direction de l'attraction par le Soleil

5. Direction de l'attraction par la Lune

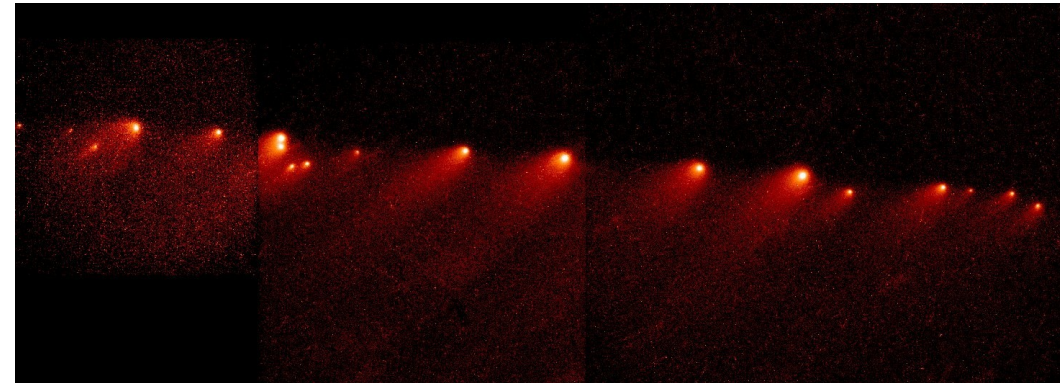


Conséquences des forces de marée

- Peuvent générer des **forces internes** à un astre
 - **Ralentissement** de la rotation de la Terre
 - Il y a 900 millions d'années, une journée durait que 18 heures et un an, 487 jours.
 - La Terre génère des **forces de marée sur la Lune** qui ont **ralenti sa rotation** jusqu'à une **synchronisation** ~ parfaite → nous voyons toujours la même face (à 41 % ... car libration = oscillation apparente décrite par Galilée)
- Peuvent fracturer des corps



moon.nasa.gov/resources/126/lunar-far-side/



La comète Shoemaker-Levy 9 en 1994 après avoir été brisée par les forces de marée de Jupiter au cours d'un passage précédent, en 1992.

Pourquoi la mer est-elle bleue ?

- Parce que le ciel est bleu ? Oui, en partie
- Mais surtout parce que **l'eau absorbe le rouge**

