

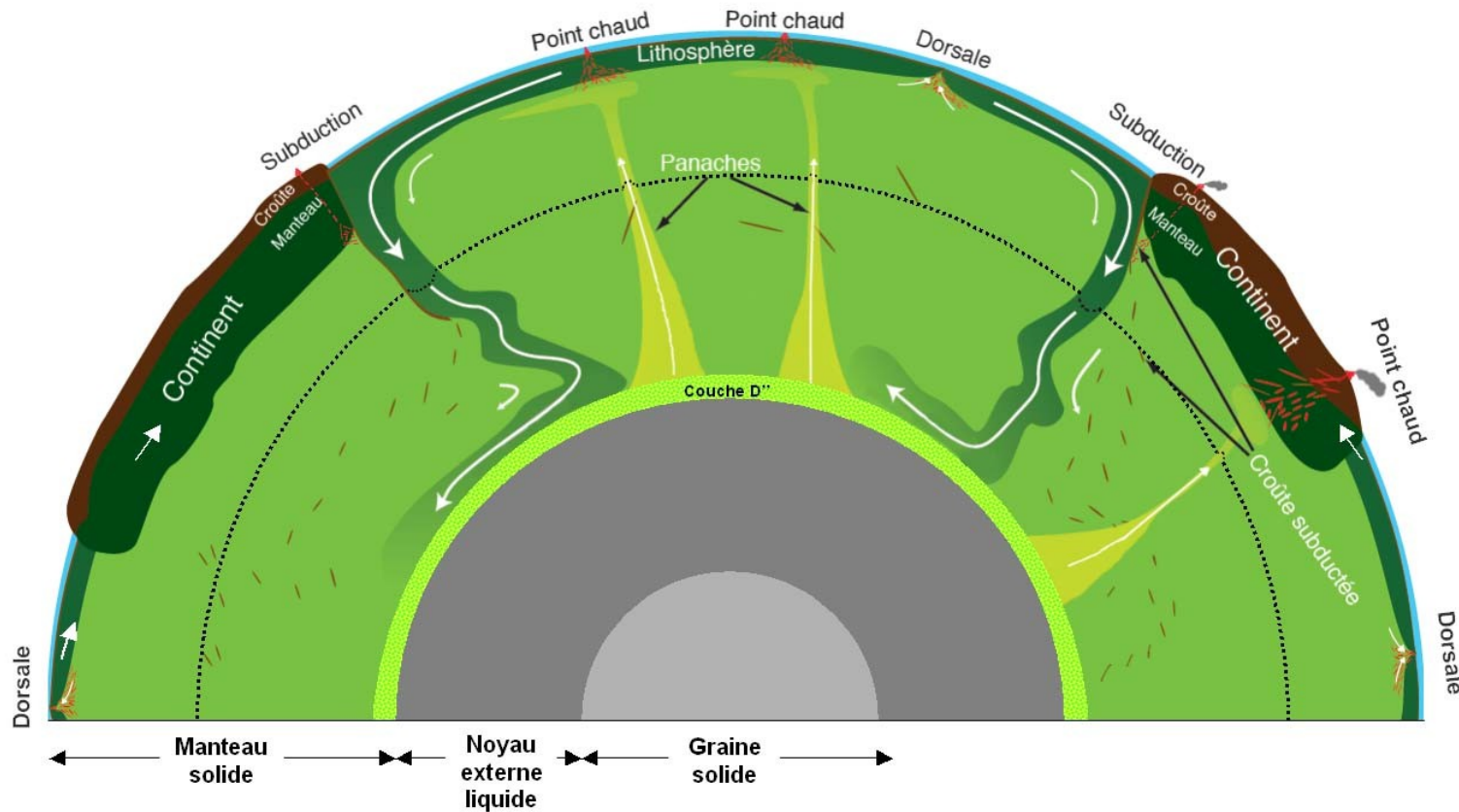
Terre en fusion ou Terre solide ?

Une controverse du XIX^e siècle.

Vincent Deparis
Lycée Jean Monnet – Annemasse

« Pour comprendre les choses, il faut les voir en train de se développer, il faut les prendre à leur naissance »

Le paradigme actuel des sciences de la Terre : la tectonique des plaques



Paradigme : modèle cohérent de vision du monde, ensemble des principes et des méthodes partagés par une communauté scientifique

1. La Terre en fusion

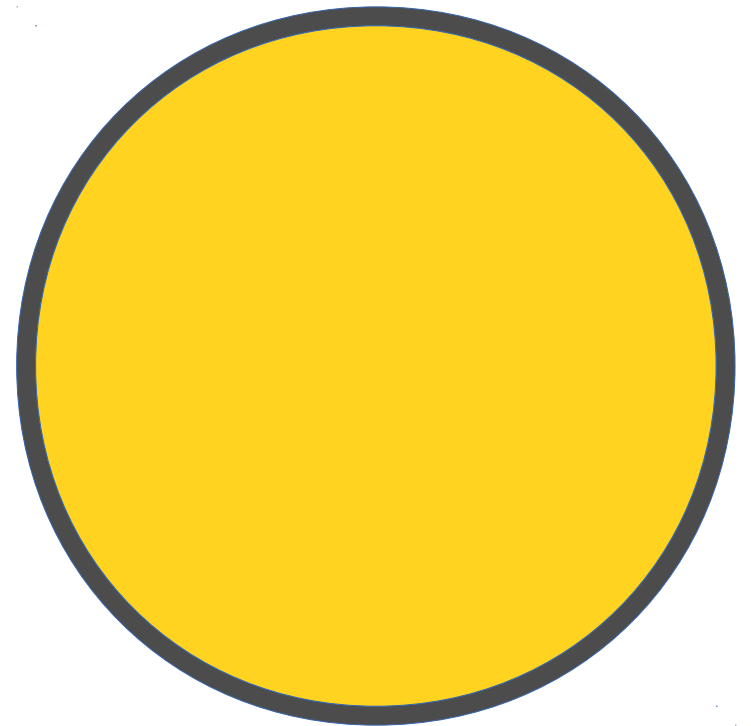
1.1. Mesures de température dans les mines

Cordier, 4 juin 1827 : Dans les mines, la température augmente de 1° tous les 25 m

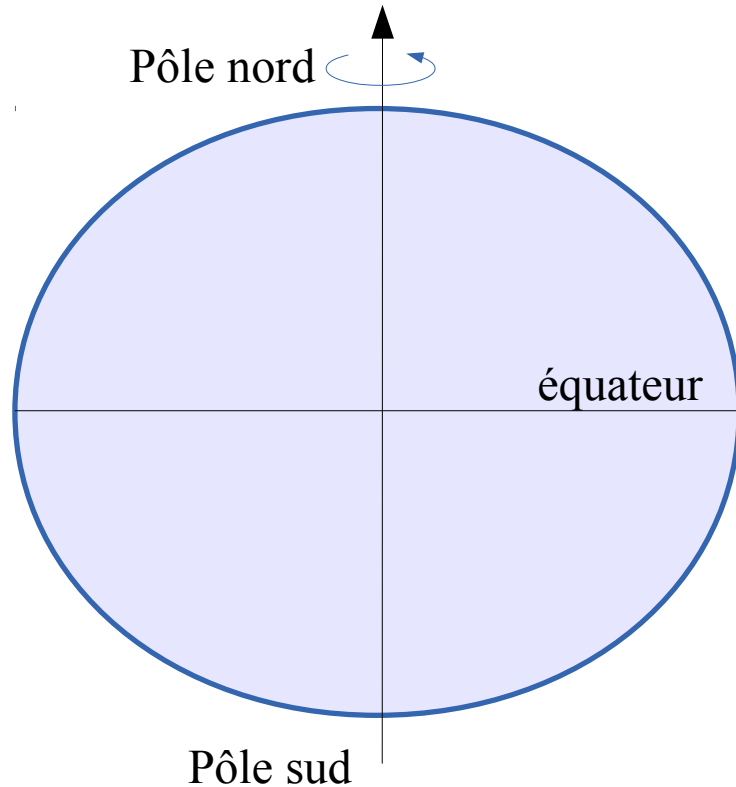
➔ 1600° dès 40 km de profondeur : toutes les roches sont en fusion

« Nos expériences confirment pleinement l'existence d'une chaleur interne qui croît rapidement avec la profondeur.

Tout porte donc à croire que la masse intérieure du globe est encore douée maintenant de sa fluidité originale et que la Terre est un astre refroidi, qui n'est éteint qu'à sa surface. »



1.2. La forme de la Terre



Le rayon équatorial est plus grand d'une 20° de km que le rayon polaire

La Terre a la même forme qu'une masse fluide !

Newton, 1687 : « *Si les planètes n'avaient point le mouvement journalier de rotation autour de leur axe, elles devraient être sphériques à cause de l'égalité de gravité de leurs parties. Le mouvement de rotation fait que les parties qui s'éloignent de l'axe font effort pour monter vers l'équateur. Et, par conséquent, si la matière dont elles sont composées était fluide, son élévation vers l'équateur augmenterait le diamètre de ce cercle, et son abaissement vers les Pôles diminuerait l'axe.* »

1.3. La masse de la Terre

La période d'oscillation d'un pendule permet de connaître la pesanteur g :

$$g = \frac{G M_T}{R^2} = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

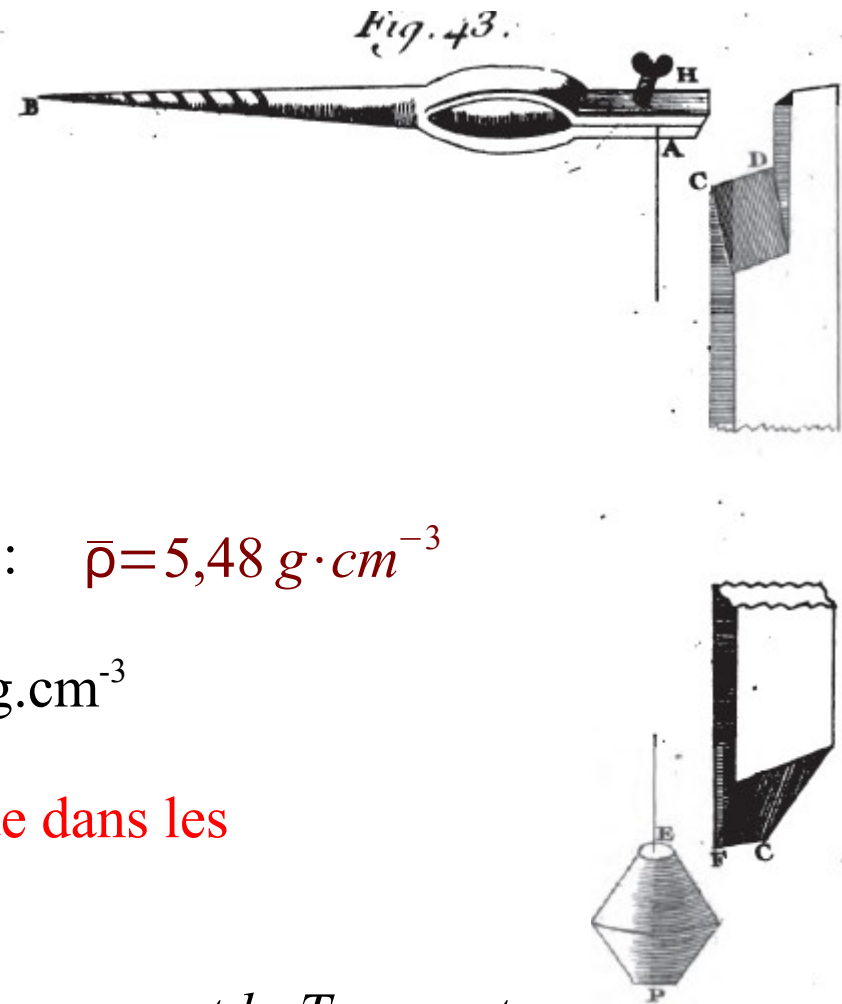
Cavendish, 1798 : détermine G

Il peut en déduire la densité moyenne de la Terre : $\bar{\rho} = 5,48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Or la densité des roches superficielles est de $2,8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

➔ La Terre n'est pas homogène mais possède dans les profondeurs des roches plus lourdes.

Laplace, 1825 : « Si les diverses substances qui composent la Terre ont eut primitivement par l'effet d'une grande chaleur, l'état fluide, les plus denses ont dû se porter vers le centre ; toutes ont pris des formes elliptiques, et la surface a été en équilibre. En se consolidant, ces couches n'ont changé que très peu de figure et présentent bien les diverses caractéristiques requises. »



1.4. La formation des roches

Werner, 1790 : la théorie neptunienne

Toutes les roches, y compris le basalte et le granite, sont des roches sédimentaires, produits de décantation d'un océan primordial.

Hutton, 1790 : la théorie plutoniste

Les **basaltes sont des laves anciennes**.

Des **veines de granite peuvent recouper des roches sédimentaires** :

Le granite est plus jeune que les roches sédimentaires.

Il était en fusion lorsqu'il s'est mis en place.

Il provient des profondeurs du globe.



1.5. Volcans, tremblements de terre, formation des montagnes

Volcan : « *Chaque volcan actif est en communication immédiate avec la matière fondue de l'intérieure.* »

Tremblement de terre : « *Le liquide bouillonnant interne est la cause des tremblements de terre.* »

Formation des montagnes : **Elie de Beaumont, 1829** :

Les matières fluides éprouvent, en général, une diminution de volume en se solidifiant.

Le refroidissement des couches internes s'accompagne d'une contraction.

L'ajustement des couches externes produit des ruptures, des plissements et des chevauchements.

La synthèse d'une Terre en fusion

Frapolli, Société géologique de France, 1847 :

« L'hypothèse de la chaleur centrale est désormais le lien de réunion de tous les faits observés, la seule dans laquelle ces mêmes faits puissent entrer sans opposition ; c'est là, on peut le dire, un véritable principe ; principe sublime sans lequel la géologie ne serait plus qu'un amas de faits incohérents et inexplicables. »

La presque totalité des géologues s'y sont rangés ; personne ici, je crois, n'est disposé à le contester. »

2. La Terre solide

2.1. Les détracteurs de la chaleur centrale

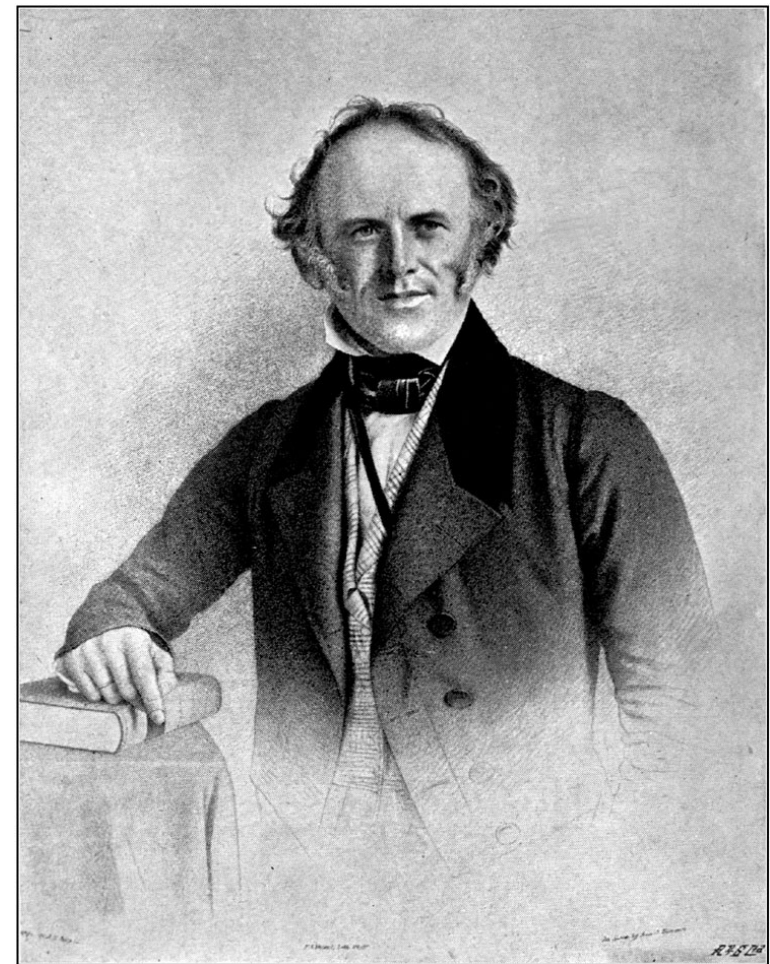
Ampère (1833) et Lyell (1833) reprennent une idée de Davy (1808) :

Les alcalins et les alcalino-terreux sont fortement oxydables par l'eau ou par l'air. Ils n'existent pas à la surface de la Terre mais peuvent se trouver à l'intérieur.

« Cette masse non oxydée est une source chimique intarissable de chaleur qui se manifestera toutes les fois qu'un corps viendra former avec elle quelque combinaison. »

Un volcan en activité semblerait n'être autre chose qu'une fissure permanente, une correspondance continuelle du noyau non oxydé avec les liquides qui surmontent la couche oxydée. »

Charles Lyell
(1794-1875)



2. La Terre solide

2.2. L'influence de la pression sur le point de fusion

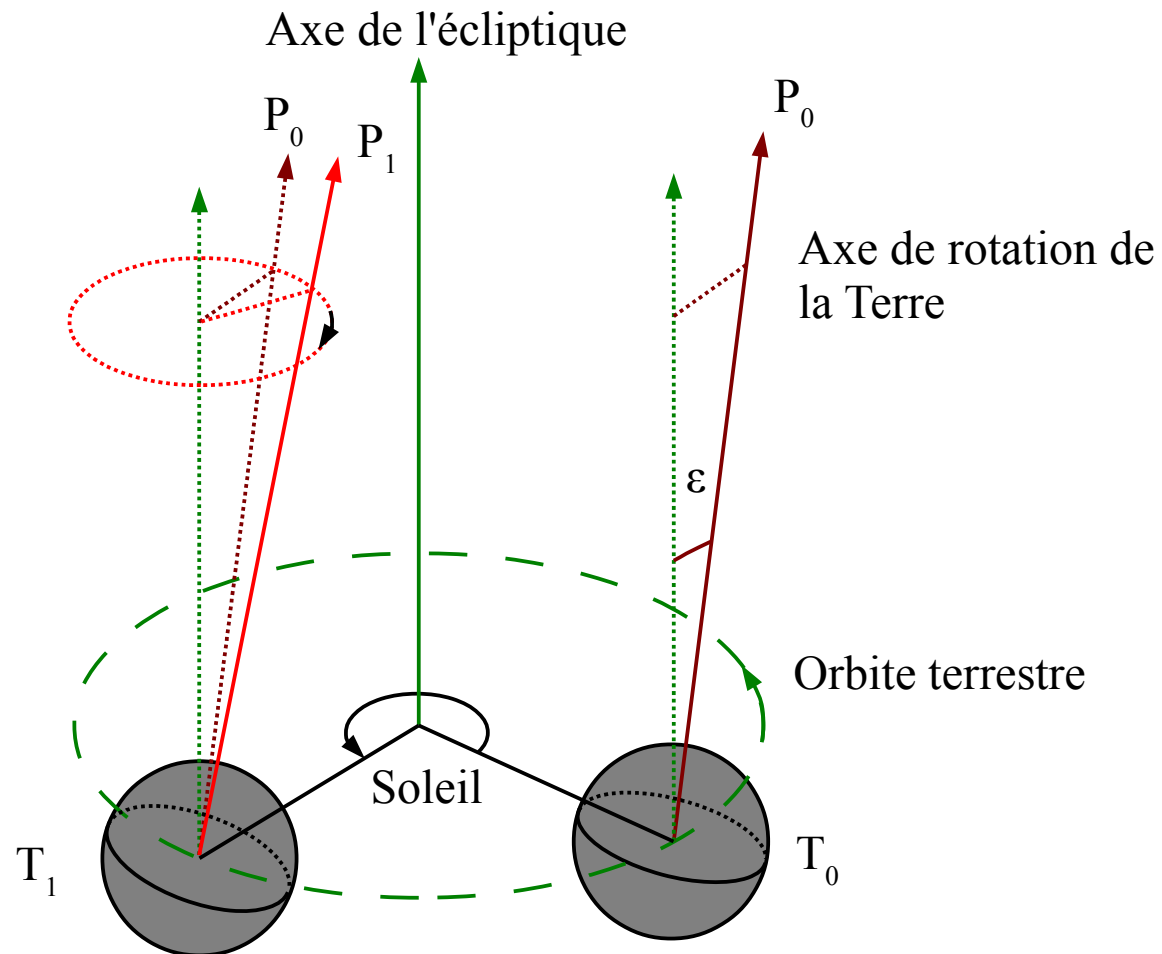
Hopkins, 1839-42 : Deux paramètres interviennent dans la solidification d'un fluide : **la température et la pression.**



L'absence de données expérimentales ne permet pas de trancher entre les trois hypothèses.

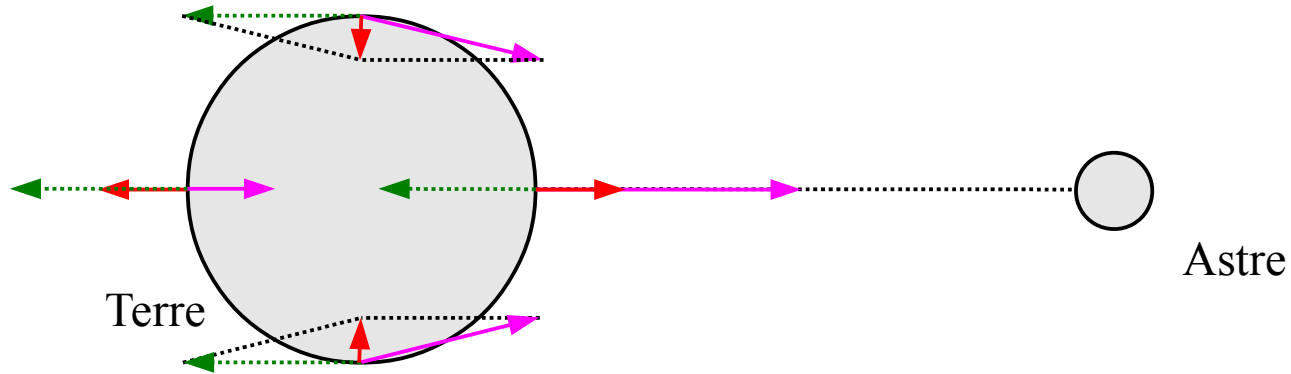
2.3. La précession

L'axe de rotation de la Terre n'a pas une direction fixe dans l'espace mais décrit un cône en 25 800 ans environ : les conséquences astronomiques ont été observées par Hipparque (IIe siècle av. J.-C.)



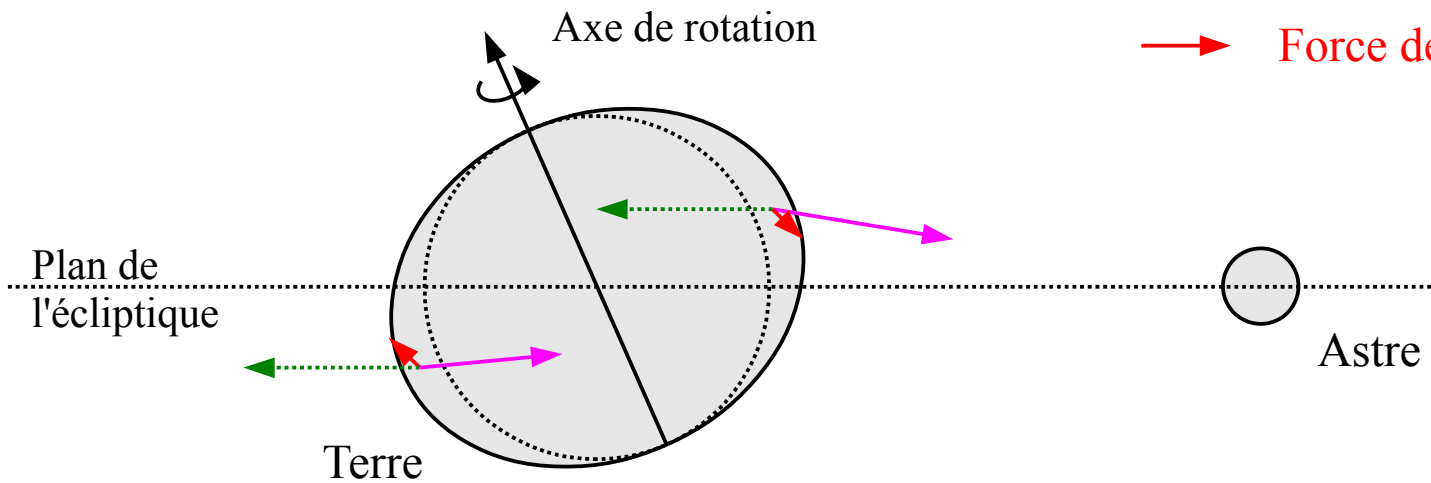
2.3. La précession

Les forces de marées :



- Attraction au point considéré
- ← Inverse de l'attraction au centre
- Force de marée

La précession :



2.3. La précession

Hopkins, 1839-42 :

Existe-t-il des phénomènes indirects qui peuvent donner une information sur l'intérieur de la Terre ?

La précession a été expliquée par D'Alembert, Euler et Laplace en supposant la Terre entièrement solide.

Avec un noyau fluide, la précession devrait être amplifiée.

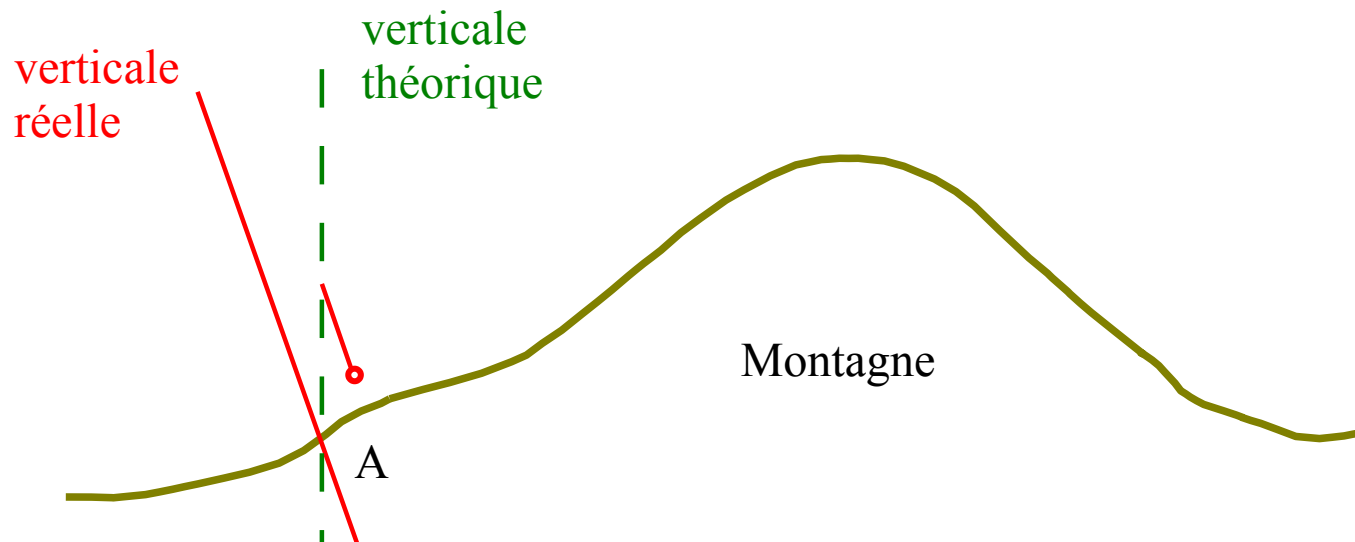
La croûte solide doit au moins être égale à $1/4$ ou $1/5$ du rayon terrestre.

« *Force est donc de conclure que la matière fluide des volcans existe dans des réservoirs souterrains d'une étendue limitée, correspondant à des lacs souterrains et non pas à un océan souterrain.* »

Un aparté : l'isostasie

Deux aspects : interprétation de la déficience d'attraction des montagnes
mouvements verticaux d'ajustement de la croûte.

Pratt, 1854 : la déviation de la verticale due à l'attraction de l'Himalaya sur le fil à plomb est moindre que celle qui peut être calculée.

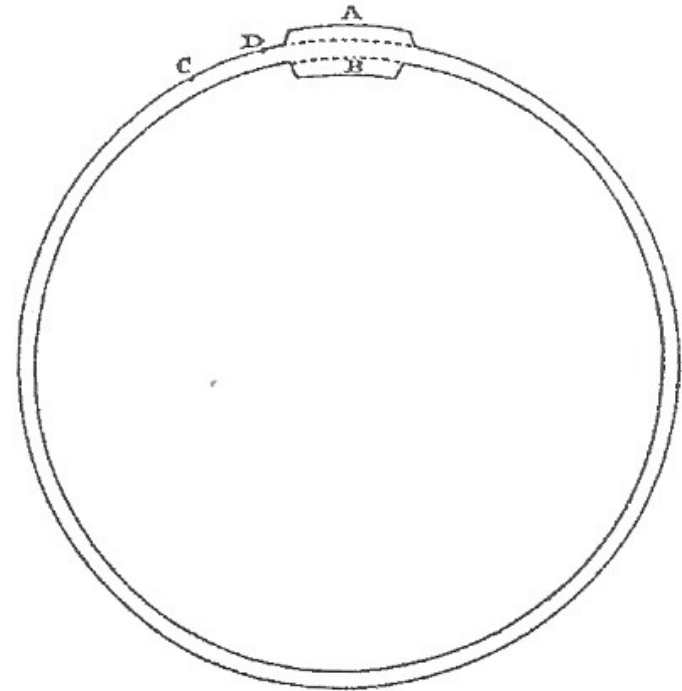


Un aparté : l'isostasie

Airy, 1855 : La Terre est formée d'une croûte et d'un fluide interne plus dense.

Le plateau continental n'est pas supporté par la rigidité de la croûte mais « flotte » dans le fluide interne.

La partie immergée (la « racine ») réduit l'attraction exercée par la partie émergée.

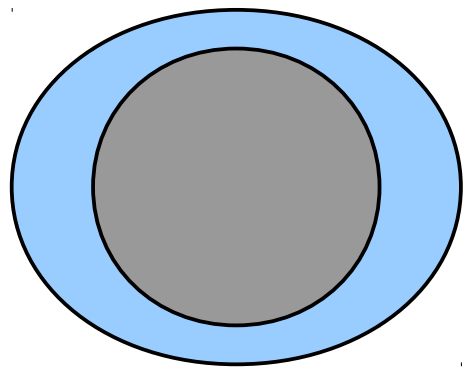


Pratt, 1859 : La Terre est solide.

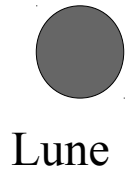
Au fur et à mesure de la formation de la croûte, des expansions ont formé les montagnes et des contractions, les bassins océaniques.

Ces modifications se sont effectuées dans le sens vertical et ont produit des variations de densité. Il existe une profondeur de compensation.

2.4. Les marées terrestres



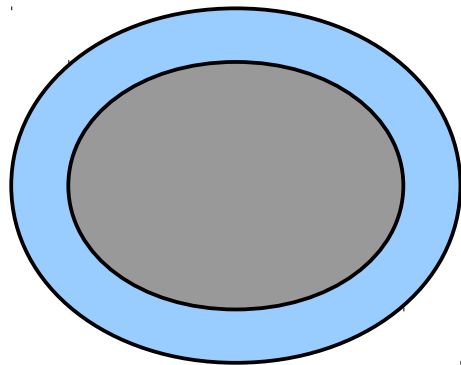
Terre indéformable



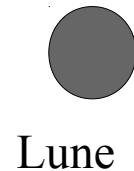
Lune

Lord Kelvin, 1862 :

Si la Terre est indéformable : seule l'eau des océans est mise en mouvement.

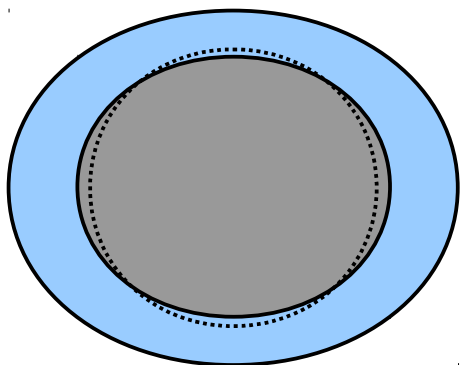


Terre fluide

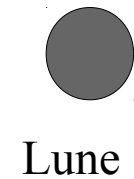


Lune

Si la Terre est en fusion : la masse fluide interne doit subir des marées importantes, exactement comme les océans de la surface.



Terre élastique



Lune

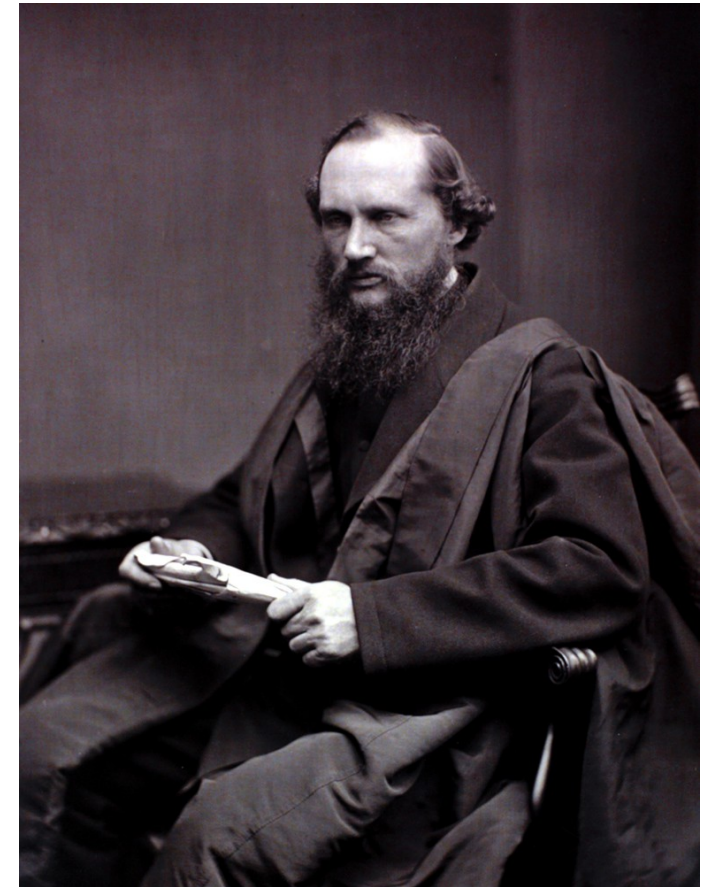
Si la Terre est élastique : les marées océaniques sont réduites par rapport aux valeurs théoriques.

2.4. Les marées terrestres

Lord Kelvin, 1862 : L'analyse des marées mensuelles et semi-mensuelles montre que les marées réelles sont égales à 0,68 fois les marées théoriques sur une Terre indéformable.

La Terre a une rigidité moyenne égale à celle de l'acier (la rigidité est un paramètre élastique).

« Nous pouvons avoir la certitude que l'intérieur de la Terre est solide. Nous devons absolument rejeter les hypothèses géologiques qui supposent que la partie solide de la Terre est une coquille de faible épaisseur reposant sur une masse liquide intérieure, que ce soit pour expliquer la chaleur souterraine ou les bouleversements de la croûte solide, les tremblements de terre ou les volcans. »



Lord Kelvin (1824-1907)

L'opposition géologues/physiciens

Liais, 1865 : « *Il ne résulte pas moins de ce beau travail de lord Kelvin l'anéantissement définitif des théories de la fluidité centrale actuelle du globe. Toutes les considérations géologiques présentées en leur faveur sont sans valeur.* »

- **Figure d'équilibre de la Terre** : liée à des processus d'érosion-sédimentation.
- **Densité moyenne du globe** : due à la compressibilité des roches
- **Phénomènes volcaniques** : résultent d'actions chimiques.
- **État cristallin des roches anciennes** : dû au métamorphisme.

L'opposition géologues/physiciens

Huxley, 1869 : « *On peut comparer les mathématiques à un moulin très bien fabriqué : toutefois, ce qui en sort dépend de ce qui y entre, et le plus beau moulin du monde ne pourra obtenir de la farine de blé à partir de cosses de pois ; de même, les pages de formules ne peuvent produire un résultat clair si les données sont imprécises.* »

Taylor, 1885 : « *La liquidité de notre globe et la finesse relative de son enveloppe solide – témoignées par toutes les inductions légitimes – seront acceptées sans hésitation, et les supposés arguments mathématiques en faveur de sa solidité seront ignorés pour être essentiellement fallacieux et très peu probants. Il faut déplorer le fait que les mathématiciens professionnels n'ont à ce jour rien apporté à l'avancement de la théorie géologique.* »

Dana, 1880 : « *La géologie est libre d'adopter les conclusions qui semblent le mieux s'accorder aux faits connus.* »

Recherche d'un compromis

Fisher, 1881 :

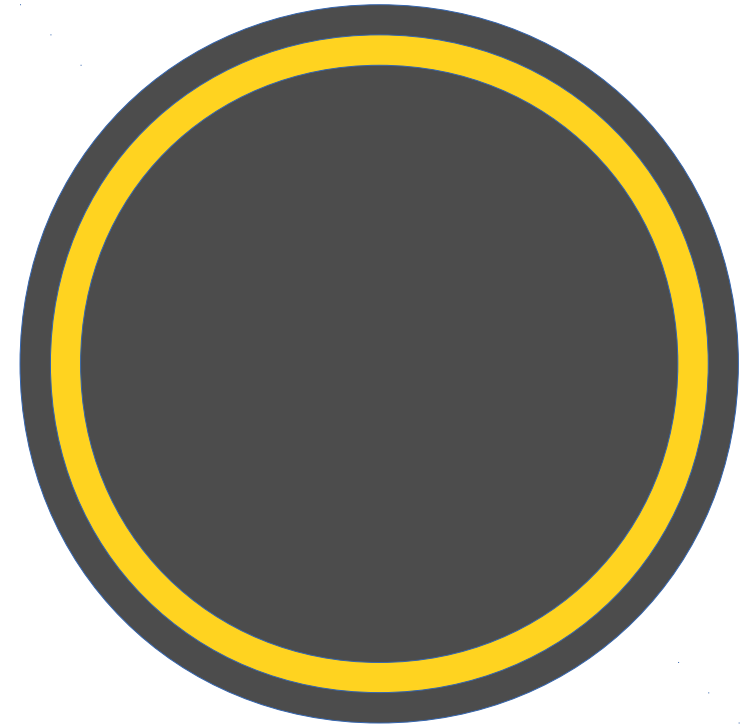
La croûte flotte sur un sous-sol fluide peu épais.

Le globe conserve une rigidité moyenne élevée.

Le modèle est compatible avec les théories sur le refroidissement de la Terre.

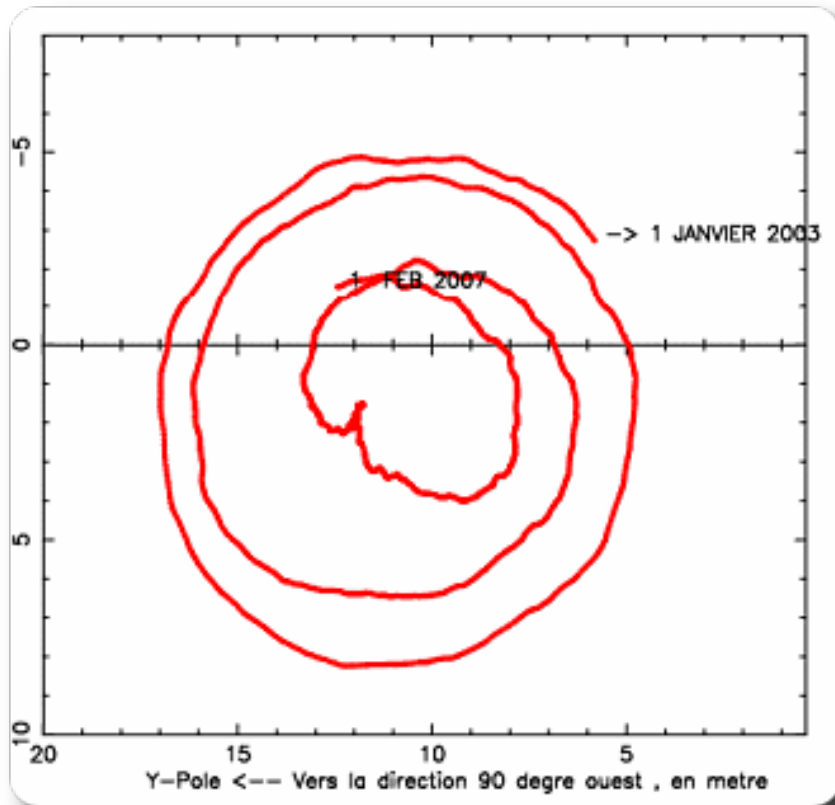
Le modèle est nécessaire pour expliquer les mouvements verticaux d'ajustement :

- Les subsidences des zones de sédimentation :
les deltas
- Le relèvement du bouclier scandinave



2.5. La polhodie

Euler, 1765 : si l'axe de rotation de la Terre ne coïncide pas avec l'axe d'inertie, le premier doit décrire un cône de révolution autour du second en **305 jours** (en supposant une Terre absolument indéformable).



Chemin du pôle de rotation dans un plan tangent au pôle

Chandler, 1891 : La période de révolution du pôle est de **427 jours**.

Newcom, 1892 : L'allongement de la période provient de la déformation de la Terre et permet de quantifier l'élasticité de la Terre.

La Terre est légèrement plus rigide que l'acier.

2.5. La polhodie

Love, 1909 : Le modèle de Fisher avec une couche fluide de faible épaisseur ne peut être retenu.

« Je pense qu'il peut être regardé comme certain qu'il n'y a pas jusqu'à une profondeur de 1400 km une couche continue de matière fondue, séparant les parties internes de la Terre des parties externes, et se comportant comme un fluide sous l'influence des forces de marées. »

2.6. La sismologie

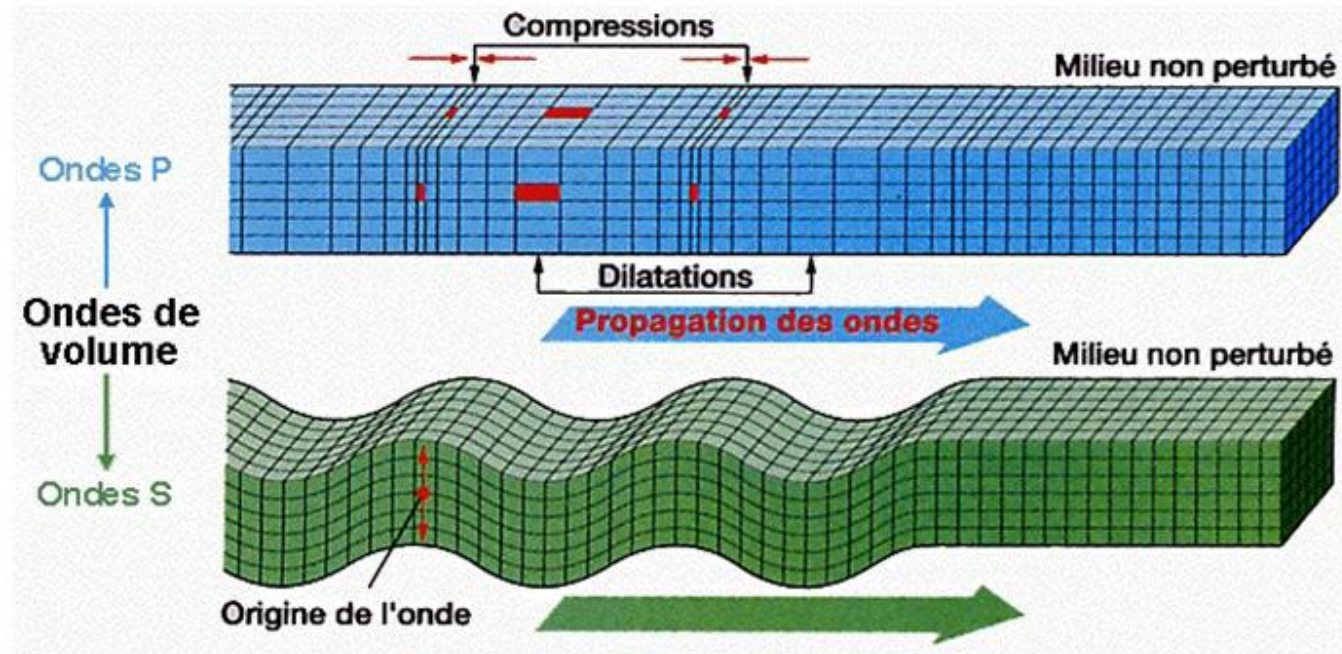
La sismologie ouvre une ère nouvelle et fournit l'outil le plus puissant pour l'investigation des profondeurs du globe.

1840 – 1870 : construction des premiers sismographes (séismes locaux).

1889 : von Rebeur-Paschwitz enregistre à Postdam les ondes d'un séisme japonais.

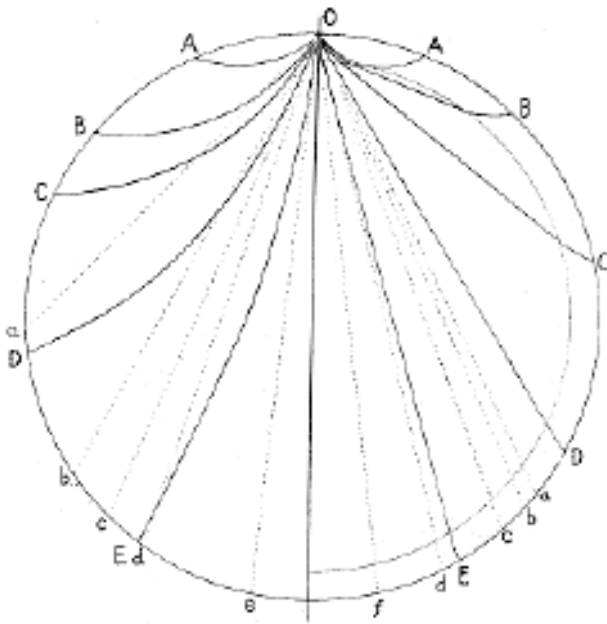
1897 : Oldham identifie sur un sismogramme les ondes P (ondes de compression) et les ondes S (ondes de cisaillement).

La Terre, qui transmet les ondes de cisaillement, est entièrement solide au moins jusqu'à une très grande profondeur.

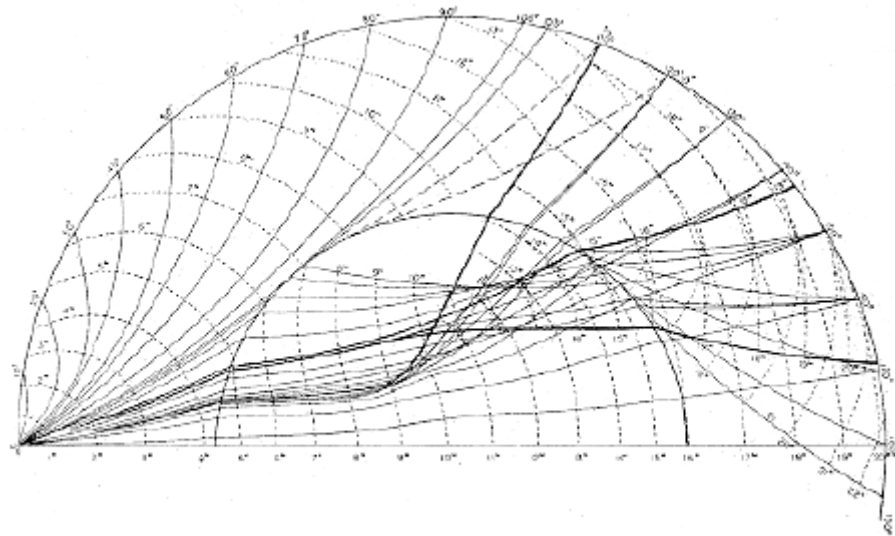


2.6. La sismologie

L'analyse du temps de parcours des ondes permet de supputer le parcours des ondes à l'intérieur de la Terre et permet de trouver l'existence de discontinuités internes.



Knott, 1908



Gutenberg, 1939

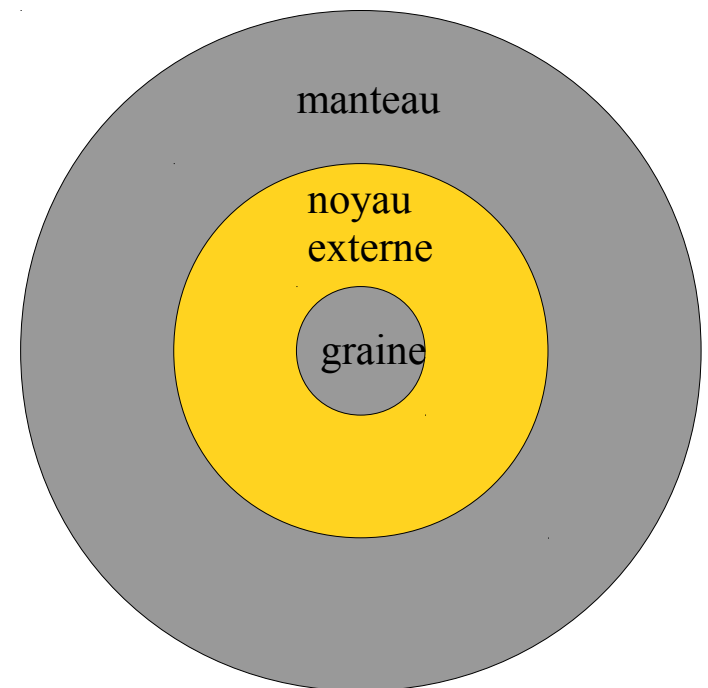
2.6. La sismologie

Mohorovicic, 1909 : interface entre la croûte et le manteau.

Gutenberg, 1912 : interface entre le manteau et le noyau (grâce à la « zone d'ombre », entre 108 et 140° de distance épacentrale, où les ondes P ne sont plus détectées)

Jeffreys, 1926 : le noyau est liquide (comparaison entre la rigidité déduite de la propagation des ondes sismiques et la rigidité moyenne déduite des marées terrestres).

Lehmann, 1936 : le noyau liquide contient une partie centrale solide : la graine.



Conclusion

- 1) Les scientifiques ne manquent pas d'idées pour proposer des interprétations multiples pour un même phénomène.
- 2) La reconnaissance de la solidité de l'enveloppe externe de la Terre a été un processus long et difficile.
- 3) Au début du XX^e siècle, on assiste à la séparation de la géologie et de la géophysique :
 - L'échec dans l'explication conjointe des phénomènes géologiques et mécaniques montre que les concepts de fluidité et de solidité ne sont pas pertinents.
 - La controverse va se déplacer et concerner la **compréhension du comportement rhéologique des roches aux différentes constantes de temps.**

Pour en savoir plus

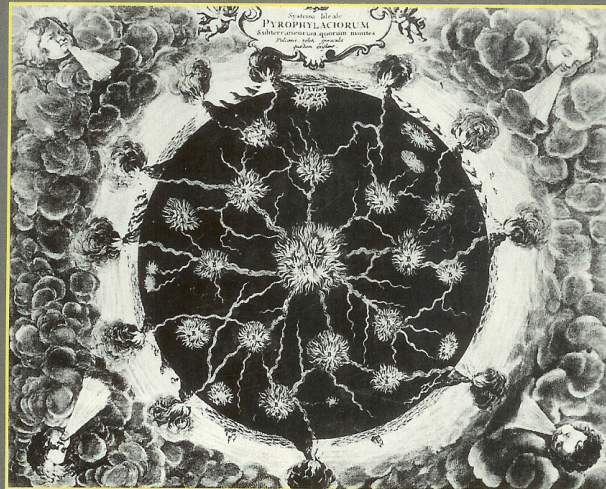
Vincent DEPARIS

Hilaire LEGROS

VOYAGE À L'INTÉRIEUR DE LA TERRE

De la géographie antique
à la géophysique moderne

Une histoire des idées



Préface de Jean-Paul POIRIER

 CNRS EDITIONS