

Voyage à l'intérieur de la Terre : de la géographie antique à la géophysique actuelle, une histoire des idées

Vincent Deparis,

Ingénieur de recherche, Maison des sciences de l'Homme, Alpes (Grenoble)

Comment connaître l'intérieur de la Terre ? Les profondeurs du globe étant à jamais inaccessibles, ce n'est que par l'interprétation des phénomènes observés en surface, tels les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, l'augmentation de température dans les mines ou la nature des roches, que l'homme a pu, au cours des temps, imaginer les conditions qui règnent au cœur de notre planète. Feux intérieurs, vastes cavités, gigantesque sphère aqueuse, et plus récemment réservoirs de magma en fusion et modèles multicouches les plus variés, l'histoire est riche de spéculations parfois audacieuses sur les profondeurs de la Terre. C'est cette histoire que nous allons maintenant parcourir.

I. La vision de nos lointains ancêtres

Tout commence au VI^e siècle avant Jésus-Christ, lorsque les premiers philosophes vivant sur le pourtour de la Méditerranée, tels Thalès (v.625-v.547 av. J.-C.), Anaximandre (v.610-v.547 av. J.-C.), Pythagore (v.570-v.480 av. J.-C.), puis Platon (428-348 av. J.-C.) et Aristote (384-322 av. J.-C.), s'interrogent sur le fonctionnement de la nature. Pour eux, la Terre est ronde et se maintient en équilibre, sans aucun support physique, au centre du Ciel lui aussi sphérique.

Pour Aristote, au IV^e siècle av. J.-C., la Terre est exclusivement formée de l'élément terre ; elle est entourée d'eau, puis d'air et enfin d'une couche de feu. Au-delà, c'est le monde des astres et de l'éternité. La partie superficielle du globe contient des cavités internes et des canaux. Le vent (ou souffle interne), sortant des cavités, provoque des tremblements de terre. Lorsqu'il est broyé en petites particules, il prend feu et donne des volcans. Cette vision de la Terre perdure pendant toute l'Antiquité et le Moyen Âge.

II. Les voyages de découverte

Au XIV^e siècle, le monde connu est encore très peu étendu. Il se limite à l'Europe, au nord de l'Afrique et à l'Asie, ne couvrant qu'un quart du globe. Que contiennent les autres quartiers de la Terre, ont-ils également des terres émergées ou sont-ils purement océaniques ?

Buridan (1300-1358) explique que la terre et l'eau forment deux sphères de centres distincts : la terre domine donc la mer sur un seul quartier et est entièrement recouverte dans les autres. La découverte de l'Amérique par Christophe Colomb (1450-1506) en 1492, puis les explorations maritimes de Vasco de Gama (1469-1524), de Vespucci (1454-1512) et de Magellan (1480-1521) montrent cependant que la thèse de Buridan est fautive : dans toutes les parties du globe, il existe des terres émergées et des habitants. Les océans ne font que combler les dépressions les plus profondes du relief terrestre.

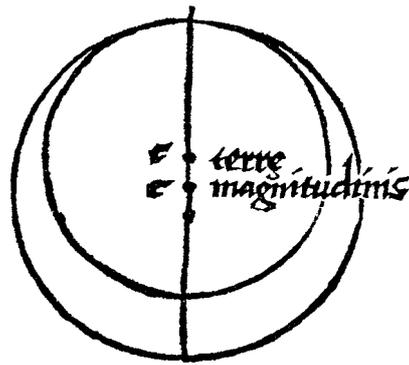


Figure 1 : Les sphères d'eau et de terre de Buridan de centres décalés

III. Les premières représentations des profondeurs

Avec la révolution astronomique de Copernic (1473-1543), les idées des Anciens sur la Terre sont rejetées. Une nouvelle représentation émerge.

Descartes (1596-1650), qui est philosophe, est le premier en 1644 à imaginer le monde souterrain. Pour lui, la Terre est un ancien Soleil qui a subi une évolution particulière. Au centre, on trouve un noyau de matière solaire, recouvert d'une couche compacte de la même matière que les taches solaires. Ensuite vient une couche de terre dense, une couche d'eau, une couche d'air et une nouvelle couche de terre plus légère qui se maintient au dessus du vide comme une voûte. La Terre de Descartes est donc creuse ! La couche externe est toutefois en équilibre instable. Séchée par le Soleil, elle se fendille, et finit par s'écrouler d'une manière inégale dans les couches internes, expulsant l'eau qui forme les océans. Descartes décrit ainsi à la fois la genèse de la Terre et sa structure interne. Il raconte comment les montagnes se sont formées, par effondrement, lors d'une immense catastrophe planétaire originelle.

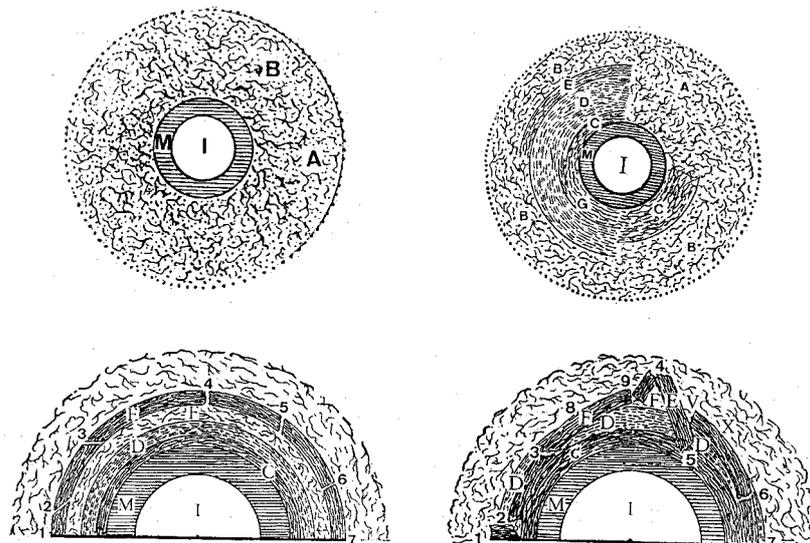


Figure 2 : Étapes de la formation de la Terre, selon Descartes

Kircher (1602-1680), un père jésuite, donne en 1665 une deuxième représentation de la Terre, tout à fait différente. Pour lui aussi le globe est un ancien Soleil refroidi, mais il cherche à expliquer les éruptions volcaniques. La Terre possède un foyer central impétueux, à peine dompté, relié aux volcans de la surface par des conduits de feu avec des réserves intermédiaires, les « pyrophyllacies ». Les

volcans manifestent l'activité interne du globe, ce sont des soupiroux par lesquels s'échappe le feu intérieur.

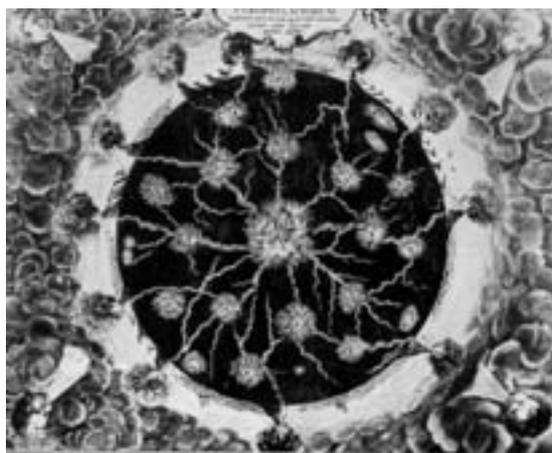


Figure 3 :Le monde souterrain de Kircher

IV. Peut-on expliquer le Déluge biblique ?

Après Descartes et Kircher, les visions du monde souterrain se multiplient rapidement, avec une grande liberté. Une des motivations est de raconter la formation de la Terre et de proposer une explication scientifique du Déluge biblique.

En 1681, Burnet (1635-1715), qui est un théologien réputé, pense que le globe était initialement un chaos fluide de tous les éléments qui s'est mis en ordre par l'effet de la gravité : les parties lourdes descendant vers le centre, les parties légères remontant vers la surface. La Terre est constituée d'une couche interne de terre, puis d'une couche fluide, puis d'une nouvelle couche de terre. Il ajoute au centre un noyau de feu. La couche externe, fissurée par la chaleur du Soleil, s'effondre, provoquant la sortie des eaux et le Déluge. C'est lors de cet épisode que la surface terrestre est façonnée avec ses montagnes et ses bassins océaniques.

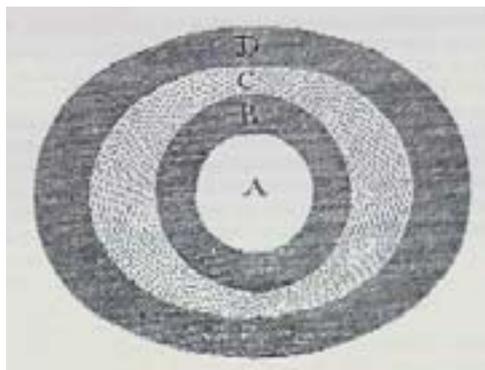


Figure 4 : L'intérieur de la Terre selon Burnet

Woodward (1665-1728), grand naturaliste de terrain, est marqué par la superposition des couches géologiques, qui forment souvent de véritables empilements. Il suppose en 1695 que toutes les roches ont été dissoutes dans l'eau du Déluge, puis se sont redéposées en couches concentriques par ordre de gravité. La Terre est formée d'une immense sphère aqueuse, recouverte des couches de terrain disposées par ordre des densités. Des fentes ou des ouvertures établissent une communication entre la sphère d'eau interne et le fond des océans.

Whiston (1667-1752), qui est chapelain, imagine en 1696 que la Terre est une ancienne comète. Elle possède un noyau solide chaud, une couche de fluide dense, puis une couche de terre en équilibre sur le fluide : le relief est créé par la différence de densité des parties de la croûte qui s'enfoncent

différemment dans le fluide. Le Déluge survient lors du passage d'une nouvelle comète. Celle-ci abandonne la vapeur d'eau de sa queue à la Terre, ce qui crée les pluies diluviennes, et fissure la couche externe du globe à cause des forces de marées qu'elle exerce, d'où l'irruption des eaux internes. Lorsque la comète s'éloigne, une partie de l'eau du Déluge s'évapore, une autre regagne les profondeurs et une dernière forme les mers : la Terre a acquis son aspect actuel.

V. Des modèles étonnants

D'autres modèles, qui peuvent paraître plus extravagants, sont proposés.

En 1693, Halley (1656-1743), astronome contemporain de Newton, est intrigué par la variation temporelle du champ magnétique de la Terre observée au cours du siècle. Pour l'expliquer, il suppose que la Terre est creuse et qu'elle contient un noyau aimanté en rotation libre. Plus tard, il émet des propos plus audacieux : la Terre serait formée de trois arches (ou coquilles) et d'un noyau aimantés tournant avec des vitesses différentielles. Les dimensions des sphères internes correspondent aux rayons de Mercure, Mars et Vénus ! Les arches se tiennent en équilibre grâce à une force magnétique qu'elles génèrent et qui s'oppose à la gravitation. Elles sont supposées habitées et séparées les unes des autres par des milieux raréfiés.

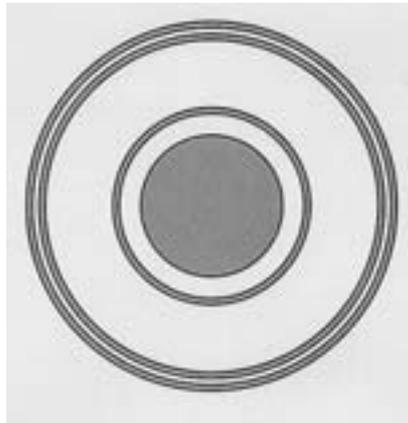


Figure 5 : Les trois arches et le noyau du modèle de Halley

En 1721, Gautier (1660-1737), un ingénieur des Ponts et Chaussées, pense lui que la Terre est entièrement creuse et qu'elle est comparable à un ballon ou à une vessie pleine d'air ! La mince couche externe, qui a moins de 5 km d'épaisseur en moyenne, est maintenue par deux forces opposées : la gravité et une force provenant de la rotation de la Terre. Les deux côtés de la croûte sont parfaitement symétriques et ainsi un monde est également possible sur la face interne avec ses mers et ses montagnes ! Le modèle curieux de Terre creuse de Gautier est fondé sur des intuitions géologiques pénétrantes. Gautier explique ainsi les soulèvements et les effondrements de la croûte, ce qu'il ne pouvait pas faire en supposant une Terre pleine.

En 1740, Moro (1667-1740), abbé à Venise, affirme que tous les reliefs ont une origine volcanique. Il a été impressionné par la surrection d'une île nouvelle dans l'archipel grec, près de Santorin et pense que les soulèvements de la croûte forment des cavités internes, soit remplies de substances ignées enflammées, soit moulées par un noyau igné déformable.

VI. De l'imagination aux investigations scientifiques

La panoplie des représentations du monde souterrain est donc impressionnante au milieu du XVIII^e siècle. Toutes sont judicieuses mais laquelle est juste ?

En 1778, Buffon (1707-1787), intendant au Jardin du Roi, se propose de développer une théorie de la Terre qui repose sur des arguments solides, durement éprouvés, acceptables pour tous. Il affirme que la Terre est pleine en s'appuyant sur la direction que prend un fil à plomb dans le voisinage d'une montagne. Il avance également, en donnant trois arguments, que le globe a été entièrement fondu au début de son histoire. Le premier est la nature des roches des régions montagneuses qui sont le résultat d'une fusion. Le deuxième est la forme aplatie de la Terre qui n'a pu être acquise que si le globe a été à un moment de son histoire malléable, donc en fusion. Le troisième est les mesures de température dans les mines qui montrent que la Terre possède une chaleur propre.

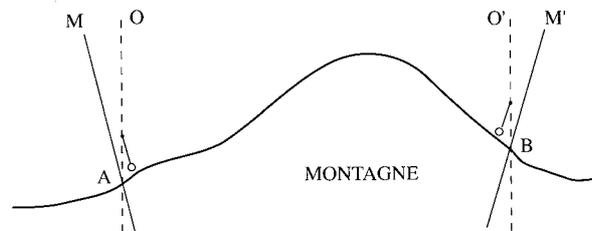


Figure 6

La déviation de la verticale : aux stations A et B, les verticales (direction du fil à plomb) sont données par les lignes pleines alors qu'en l'absence de la montagne (qui possède une capacité d'attraction), elles seraient données par les lignes pointillées. Si la Terre est creuse, la montagne représente une masse importante par rapport à la masse totale de la Terre et la déviation doit être grande. Si au contraire la Terre est pleine, la montagne ne représente plus qu'une masse insignifiante et la déviation engendrée est très faible. C'est ce qui est observé.

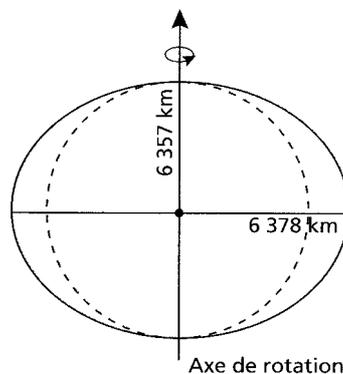


Figure 7

La forme aplatie de la Terre résulte de la force centrifuge développée par la rotation terrestre, qui chasse les particules vers l'équateur et qui augmente le rayon équatorial de 20 km par rapport au rayon polaire.

VII. « L'océan de magma » interne

Aux alentours de 1800, la géologie prend son essor et la vision de la Terre se modifie encore. Les savants qui s'interrogent sur la Terre ne sont plus des philosophes ou des théologiens mais des géologues de terrain.

Cordier (1777-1861) observe en 1827 que la température dans les mines augmente de un degré tous les 25 mètres de descente. Si la progression se poursuit, la température de 1600° C, température à

laquelle toutes les roches de la surface sont fondues, est atteinte dès 50 km de profondeur. Le globe serait donc constitué d'une énorme masse en fusion, recouvert d'une mince écorce solide. L'idée est séduisante car elle permet d'expliquer les volcans (communications directes entre la surface et la masse fondue sous-jacente), les tremblements de terre (conséquences des mouvements internes du fluide), mais aussi la formation des montagnes (la Terre en se refroidissant se contracte, ce qui crée des ruptures et des plissements).

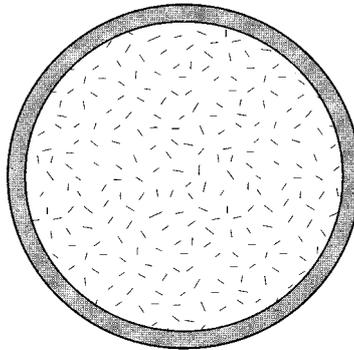


Figure 8 : La Terre en fusion de Cordier

VIII. La Terre, fluide ou solide ?

L'idée d'un globe en fusion satisfait la majorité des géologues mais certains physiciens restent dubitatifs et une polémique s'engage.

Hopkins (1793-1866) remarque en 1839 que la température de fusion des roches dépend de la pression. Si une roche fond à 1000°C en surface, il lui faut une température bien plus élevée pour entrer en fusion à 100 km de profondeur. Comme on ne peut pas savoir qui, de la température ou de la pression, a la plus grande influence, rien ne peut être conclu quant à la fluidité ou à la solidité du globe et Hopkins s'en tient à trois hypothèses.

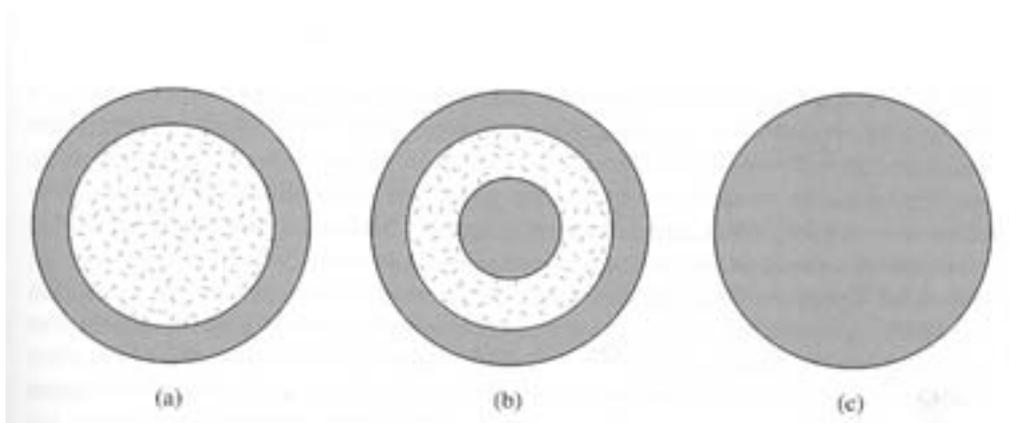


Figure 9

Les trois modèles proposés par Hopkins : (a) si la température s'accroît suffisamment avec la profondeur pour dépasser l'influence de la pression, le globe est en fusion sous une croûte dont on ne peut pas connaître directement l'épaisseur ; (b) si l'influence de la pression augmente plus rapidement que celle de la température, la solidification a commencé au centre, et comme en même temps le refroidissement créait une croûte en surface, le globe est formé d'une enveloppe solide, d'une couche intermédiaire en fusion et d'un noyau solide ; (c) si le refroidissement est complet, le globe est entièrement solide.

Lord Kelvin (1824-1907), en 1862, défend avec vigueur une Terre entièrement solide. Il argumente que si la Terre était en fusion, la masse fluide interne devrait subir des marées importantes, exactement comme les océans de la surface. Ces marées internes devraient déformer intensément le sol, le soulever et l'abaisser alternativement, ce qui n'arrive pas. Lord Kelvin observe cependant que les marées océaniques sont légèrement réduites par rapport aux prédictions théoriques. Ceci montre que la Terre se comporte comme un solide élastique, dont les propriétés sont sensiblement les mêmes que celles de l'acier. Le globe est donc solide et les seules parties en fusion sont les réservoirs de magmas sous les volcans.

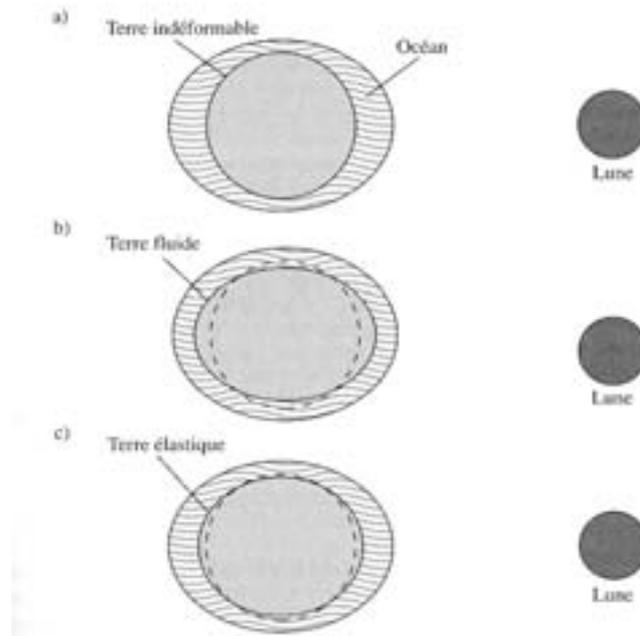


Figure 10

Déformation de la Terre sous l'influence des forces de marées. a) si la Terre est absolument indéformable, seule l'eau des océans est mise en mouvement par les forces de marées ; b) si la Terre est fluide, elle se déforme complètement sous l'influence des forces de marées et l'eau des océans ne fait que suivre les mouvements du sol : les marées océaniques n'existent plus ; c) si la Terre se comporte comme un solide élastique, les marées océaniques correspondent à la différence entre la déformation fluide des océans et la déformation élastique du sol.

Fisher, en 1881, cherche à réaliser un compromis entre le modèle entièrement en fusion des géologues et le modèle entièrement solide de lord Kelvin. Il suppose que la Terre est composée d'une croûte solide d'une faible épaisseur, d'une couche intermédiaire fluide également de faible épaisseur et d'un noyau solide. Ce modèle vérifie la condition de lord Kelvin d'un globe possédant en moyenne les propriétés élastiques de l'acier, tout en permettant de conserver les explications habituelles des phénomènes géologiques.

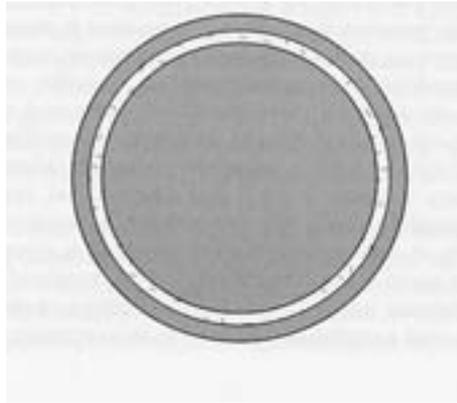


Figure 11 : Le modèle consensuel des années 1880

IX. Le noyau de fer

Parallèlement à la polémique sur l'état physique de l'intérieur du globe, des recherches sont effectuées sur la répartition interne des densités.

En s'appuyant sur l'observation des météorites, Roche (1820-1883) présente en 1881 un modèle de Terre à deux couches : un noyau ferreux dont la densité est voisine de 7, recouvert d'une couche pierreuse de densité 3, dont l'épaisseur n'atteint pas 1/6 du rayon entier. La densité de l'enveloppe est déterminée grâce aux relevés géologiques alors que la densité et la dimension du noyau sont déterminées par le calcul pour satisfaire deux conditions : la densité moyenne de la Terre égale à 5,5 et son aplatissement qui dépend de la répartition interne des densités. En 1897, Wiechert (1861-1928) propose un modèle semblable et en 1909, Suess (1831-1914) nomme le noyau *nife* (composé de fer et de nickel), l'enveloppe *sima* (essentiellement composé de silicium et de magnésium), et les continents *sial* (essentiellement composée de silicium et d'aluminium). Les valeurs numériques retenues ne sont pas exactes : en sous-estimant l'influence de la compressibilité, Roche et Wiechert obtiennent des valeurs de densités trop faibles et par compensation une dimension du noyau trop grande. Ces modèles sont toutefois cohérents et serviront de référence pour les premières interprétations des sismogrammes.

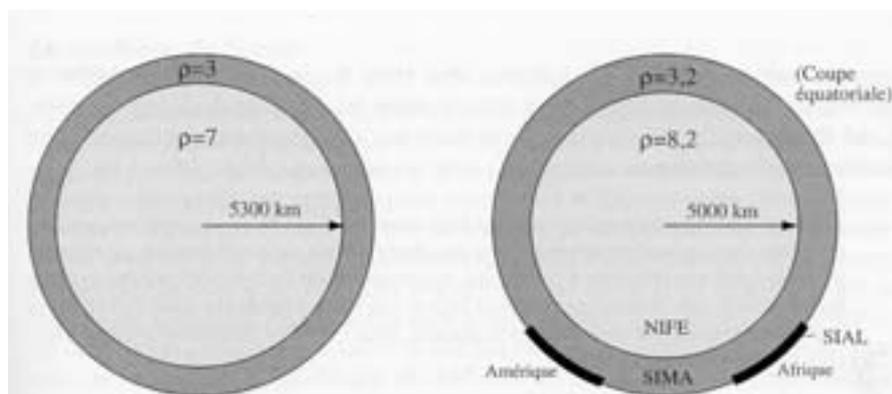


Figure 12 : Modèle de Terre en densité (ρ est la densité) calculé par Roche en 1881 (gauche) et Wiechert en 1897 (droite)

X. Un noyau de gaz ?

Ritter suppose en 1878 que la Terre est constituée d'un noyau de gaz et d'une croûte solide. Il observe en effet que la température à l'intérieur de la Terre doit dépasser la température critique des substances connues, température à partir de laquelle il n'y a plus de transition brutale entre le liquide

et le gaz mais une transition continue. De plus le dégazage des volcans ne montre-t-il pas la présence de gaz à l'intérieur du globe ?

Günther amplifie en 1884 les idées de Ritter et avance que la Terre est composée d'une croûte solide, d'une couche en fusion et d'un noyau de gaz. Le modèle devient populaire lorsqu'un scientifique de renom, Arrhenius (1859-1927), l'adopte en 1900. Il sera néanmoins éclipsé par le développement de la sismologie.

XI. Les grandes discontinuités sismologiques

L'auscultation sismologique permet à partir du début du XX^e siècle de renouveler entièrement les modèles de Terre. La détection des ondes de cisaillement (qui ne se propagent pas dans les liquides) montre que le globe se comporte comme un corps solide élastique, du moins dans toute sa partie supérieure. Les géologues doivent donc revoir leur copie et reprendre leurs explications des volcans et de la formations des montagnes ! Oldham (1858-1936) construit en 1906 un premier modèle de Terre sismologique. Sur les courbes temps-distances qu'il vient de tracer, il remarque que les ondes S subissent un retard d'une dizaine de minutes pour des distances épacentrales supérieures à 120-130°. Il l'explique en disant que ces ondes traversent une région centrale où la vitesse est sensiblement inférieure à celle existant dans l'enveloppe extérieure et il pense ainsi mettre en évidence une discontinuité sismologique majeure vers 3800 km de profondeur.

En 1909, Mohorovicic observe un accroissement des vitesses sismiques sous la Croatie à environ 54 km de profondeur. Cet accroissement est ensuite confirmé par d'autres sismologues dans différentes régions du monde ; il est interprété comme l'interface entre la croûte et le manteau. En 1912, Gutenberg (1889-1960) repositionne la discontinuité d'Oldham vers 2900 km de profondeur (qui est la valeur adoptée de nos jours). Il observe que les ondes P émises par un séisme sont enregistrées normalement jusqu'à la distance épacentrale de 105°. Entre 105 et 142°, les ondes P ne sont plus observées, puis à 142°, elles réapparaissent. C'est le phénomène de « zone d'ombre » que Gutenberg explique comme le résultat de la réfraction des ondes P à travers une discontinuité marquant une chute brutale de la vitesse des ondes. En 1923, il interprète cette discontinuité comme l'interface entre le noyau et l'enveloppe de Wiechert.

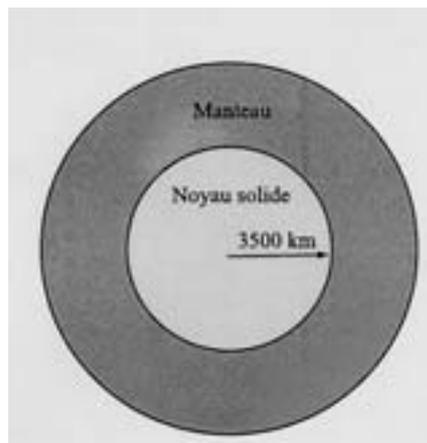


Figure 13 : La Terre solide de Gutenberg

Les dimensions du noyau de fer ont été considérablement réduites depuis les modèles de Roche et de Wiechert.

XII. Le noyau métallique de la Terre est-il fluide ou solide ?

Pour une grande majorité de sismologues du début du siècle, le globe est entièrement solide et le noyau possède même une rigidité supérieure à celle de l'enveloppe. Si les ondes S traversant le noyau

ne sont pas directement observées, c'est parce que la qualité des sismogrammes n'est pas encore suffisante pour les détecter mais leur existence n'est pas mise en doute.

En 1926 Jeffreys (1891-1989) prouve la fluidité du noyau métallique. Il ne s'appuie pas sur l'absence de transmission des ondes S (qui est aujourd'hui le critère habituel de la fluidité) mais sur un raisonnement indirect, en montrant que la rigidité déduite de la propagation des ondes dans l'enveloppe est supérieure à la rigidité déduite de l'étude de la déformation élastique de la Terre sous l'influence des marées. L'opinion de Jeffreys est rapidement adoptée par la communauté scientifique.

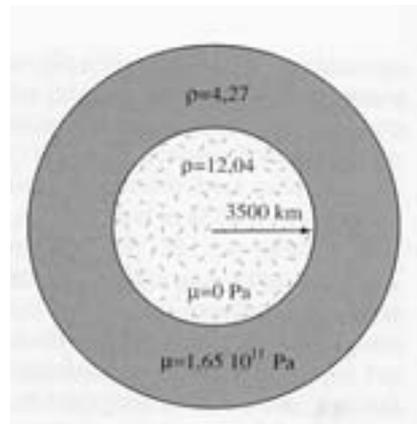


Figure 14 : Le modèle de Jeffreys avec un noyau fluide (ρ est la densité, μ la rigidité)

XIII. La découverte de la graine

En 1936, Lehmann (1888-1993) découvre que le noyau liquide de la Terre contient une partie centrale distincte : la graine. La « zone d'ombre » entre 105° et 142° n'est pas entièrement vide mais on y observe l'arrivée d'ondes P, interprétées comme des ondes diffractées à la frontière du noyau. Lehmann montre que ces ondes reçoivent une explication bien plus satisfaisante si l'on suppose qu'elles ont été réfléchies à la surface d'une partie centrale. L'interprétation est reçue avec enthousiasme et les dimensions de la graine sont fixées par Gutenberg en 1938 et par Jeffreys en 1939 entre 1200 et 1250 km (la détermination actuelle est de 1221 km). Birch affirme en 1940 que la graine est solide mais l'assertion n'est vraiment confirmée que dans les années 1960 par l'analyse des oscillations propres de la Terre.

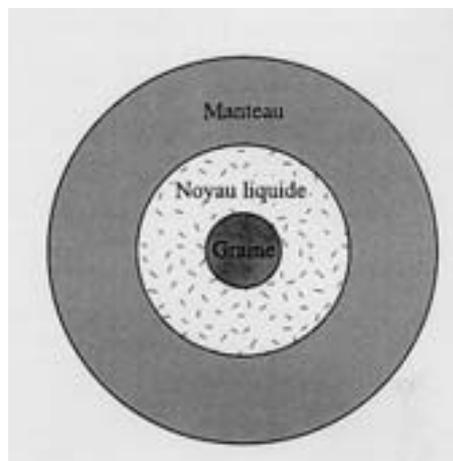


Figure 15 : La graine solide de la Terre découverte par Lehmann

XIV. Les premiers profils de densité

Pour déterminer la variation de la densité avec la profondeur à partir des vitesses sismiques, il est nécessaire de posséder une équation d'état reliant les différents paramètres élastiques entre eux. En 1923, Adams et Williamson franchissent l'étape essentielle en établissant leur équation, qui permet de calculer les variations de la densité due à la compression dans les régions homogènes du globe. En 1936, Bullen en fait la première application à la Terre et établit le premier profil de densité en supposant le globe constitué de différentes enveloppes concentriques homogènes. Il n'aura ensuite cessé de le perfectionner. En 1952, Birch montre que l'équation d'Adams-Williamson est valable dans le manteau inférieur et le noyau mais qu'elle ne peut pas être appliquée dans la partie supérieure du manteau. Pour pallier ce défaut, il développe une équation d'état empirique reliant la vitesse des ondes P à la densité. L'équation d'Adams-Williamson et la loi de Birch sont à la base des calculs modernes du profil de densité.

XV. Les images tomographiques

Aujourd'hui, on ne cherche plus seulement à améliorer le modèle sphérique de Terre, avec des couches imbriquées les unes dans les autres, mais on effectue des images à trois dimensions du globe, exactement comme en tomographie médicale. On cherche ainsi à mettre en évidence les variations d'épaisseur de la croûte, et la topographie de la frontière noyau-manteau qui n'est pas parfaitement sphérique mais qui possède des ondulations. On cherche aussi à cartographier les zones rapides (zones où la vitesse des ondes sismiques est plus élevée que la moyenne) et les zones lentes du manteau. Et comme les zones rapides sont associées à du matériau froid et les zones lentes à du matériau chaud, on peut ainsi obtenir des informations précieuses sur la géométrie des mouvements de convection, avec la localisation des courants montants chauds et des courants descendants froids.

Dans les images produites, on distingue de grandes structures froides qui atteignent parfois la frontière noyau-manteau. Celles-ci correspondent aux plaques plongeantes qui s'enfoncent très profondément dans le manteau. Les plaques subductées semblent donc constituer le meilleur moyen pour refroidir la Terre en profondeur. Un des défis à venir est de détecter la trace des panaches mantelliques, qui sont des cheminées étroites de matériaux chauds, provenant du manteau profond et perçant, tels des chalumeaux, les plaques en surface. Ces panaches sont à l'origine du volcanisme dit de « point chaud », formant des alignements d'îles volcaniques. C'est donc une véritable « géographie des profondeurs » qu'on essaie aujourd'hui de dresser. Mais la tâche est loin d'être terminée, et les profondeurs du globe n'ont pas encore dévoilé tous leurs secrets...

Bibliographie

DEPARIS V. et LEGROS H., *Voyage à l'intérieur de la Terre. De la géographie antique à la géophysique actuelle. Une histoire des idées*, Paris, CNRS Éditions, 2000.

Les illustrations proviennent de l'ouvrage.

Textes étudiés

BURIDAN, *Questions sur le traité des Météores*, 1350.

DESCARTES, *Principes de la Philosophie*, 1644.

CLAIRAUT, *Théorie de la figure de la Terre*, 1743.

BOUGUER, *Observation sur la gravité*, 1749.

CORDIER, *Essai sur la température de l'intérieur de la Terre*, 1827.

WEGENER, *Les forces translatrices*, 1928.