

la Terre solide

Les profondeurs de la Terre

Jean-Paul POIRIER

1. Introduction

Jules Verne, s'il emmenait ses héros dans des "Voyages Extraordinaires", n'inventait cependant rien qui ne repose sur les bases scientifiques de son époque. Il y a environ 130 ans - lorsque pouvaient naître les grands parents de certains d'entre nous - la controverse du Feu Central était encore vive : les régions centrales du Globe étaient-elles brûlantes et fondues, ou bien la Terre avait-elle épuisé sa chaleur primitive, et l'intérieur n'était-il alors pas plus chaud que les mines les plus profondes ?

Le professeur Lidenbrock - avec d'illustres savants, comme Poisson - penchait pour la seconde hypothèse et on le voit (**Figure 1**) découvrant d'immenses cavernes et des mers souterraines sujettes aux tempêtes. Toutes choses qui n'auraient pas surpris le moins du monde Lucrèce, qui décrivait, il y a un peu plus de 2000 ans partant de cette hypothèse, les profondeurs de la Terre dans son "De Rerum Natura".

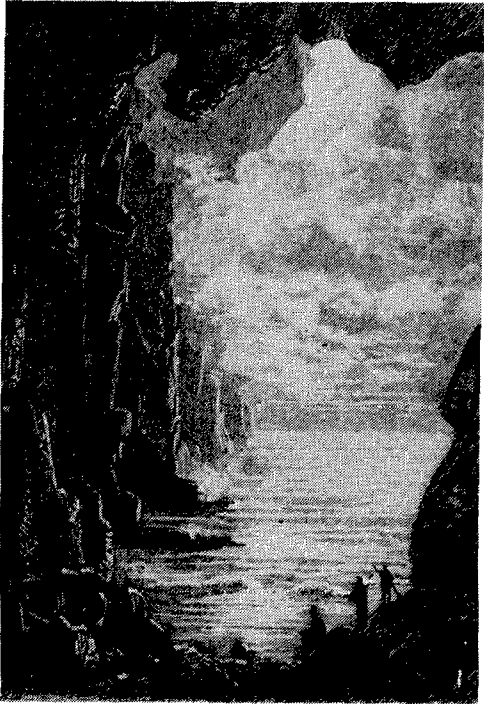


Figure 1 - Voyage au centre de la Terre

Je dois parler aujourd'hui des profondeurs de la Terre ; or, je ne les ai pas personnellement visitées et le trou le plus profond, dans la Péninsule de Kola, en Russie, s'enfonce d'une douzaine de kilomètres seulement, simple égratignure à la surface du Globe, si l'on considère que le Centre de la Terre est à près de 6400 km de profondeur. Comment donc peut-on parler des profondeurs de la Terre ? Que sait-on de plus qu'à l'époque de Jules Verne et comment le sait-on ? Mon exposé sera consacré à répondre en partie à ces questions.

Notre curiosité vis-à-vis de l'intérieur de la Terre s'exerce dans deux directions :

1) Quelle est la constitution de la Terre, depuis la surface jusqu'au centre ? Quelles sont les régions que l'on peut y distinguer ? De quoi sont-elles faites ? C'est-à-dire quelle est leur composition chimique et minéralogique ?

2) La terre est une planète active, agitée de tremblements, avec des continents qui dérivent, des océans qui s'ouvrent et des montagnes qui surgissent, (Xavier Le Pichon et Paul Tapponnier en parleront). Quel est le moteur de cette activité ? D'où vient l'énergie et comment s'échange-t-elle entre les différentes régions ? Quelle est la température de l'intérieur du Globe ? En d'autres termes et par analogie avec les organismes vivants : que sait-on de l'Anatomie et de la Physiologie de la Terre ? Pour sonder l'intérieur du corps humain et son fonctionnement, les médecins disposent d'analyses de laboratoire (analyses de sang par exemple) et d'images provenant de la propagation à travers les tissus d'ondes sonores ou électromagnétiques (échographies, radiographies) ; il en va un peu de même en ce qui concerne la Terre : les géochimistes analysent les laves et les roches remontées

par les volcans depuis plusieurs centaines de kilomètres pour certaines; les géophysiciens utilisent les renseignements fournis par la propagation des ondes sonores émises par les tremblements de terre, ou par les signaux magnétiques en provenance du noyau.

Je commencerai par donner quelques idées générales sur ce que nous pensons connaître de l'intérieur de la Terre, en faisant la différence entre ce que l'on sait raisonnablement et ce que l'on suppose. Je parlerai ensuite des frontières de notre discipline, c'est-à-dire des problèmes actuels, non encore résolus.

2. La constitution de la Terre

Un tremblement de Terre résulte de la rupture de la croûte terrestre le long d'une faille, accompagnée de l'émission d'ondes sonores qui se propagent avec une vitesse qui dépend des propriétés élastiques et de la densité des milieux traversés. La densité et les modules d'élasticité augmentent avec la pression, donc avec la profondeur et, de même que les rayons lumineux se courbent dans un milieu où l'indice de réfraction varie (c'est-à-dire où la vitesse de la lumière varie), les "rais" sismiques se courbent à l'intérieur de la Terre ; ils peuvent aussi se réfléchir sur des surfaces de discontinuité des propriétés acoustiques.

En "écoutant" les tremblements de terre avec des sismographes disposés en différents points du Globe, les sismologues peuvent établir des profils de vitesse sismique en fonction de la profondeur et identifier des discontinuités sismiques à certaines profondeurs.

Les discontinuités, séparant les principales régions (cf fig. 6, p 15) sont donc :

- à la base de la croûte, le Moho (invisible à l'échelle de la figure), profond d'environ 30 km sous les continents et de 6 km sous les océans.
- la discontinuité de 670 km, qui marque la frontière entre le manteau supérieur et le manteau inférieur.
- la frontière noyau-manteau, déjà mentionnée, à 2.900 km.
- la frontière noyau liquide-graine solide, à 5.150 km.

De quoi sont donc faites ces régions ?

Passons sur la croûte, bien connue : en gros, granit pour les continents et

basalte pour les océans. Le manteau supérieur est lui aussi relativement bien connu, tout au moins dans sa partie la plus superficielle, car dans les laves basaltiques de certains volcans, on trouve, en enclaves, des morceaux de la roche constitutive du manteau : la péridotite.

A partir de 400 km et dans le manteau inférieur, les choses se compliquent et il faut ici faire une courte digression sur les minéraux. Les minéraux sont des cristaux, c'est-à-dire des empilements dans les trois dimensions de l'espace, d'atomes d'éléments différents, de tailles et de charges électriques différentes. Une structure cristalline donnée résulte d'un compromis entre diverses exigences (tailles, neutralité électrique globale, etc...), mais le compromis n'est valable que dans un domaine de pression et de température donné ; au delà d'une certaine pression et température, la structure qui était optimale à température et pression ambiantes devient instable et est remplacée par une autre structure, de même formule chimique, mais d'énergie plus faible : c'est une transformation de phase. Lorsque la profondeur augmente, la pression atteint des valeurs considérables et les minéraux vont se transformer en adoptant des structures plus compactes.

Comment connaît-on les propriétés physiques de ces minéraux qui constituent le globe, mais qui n'existent qu'à des profondeurs inaccessibles ?

La réponse est qu'on les fabrique et qu'on les étudie en laboratoire. Il faut pour cela atteindre des pressions colossales et des températures élevées ; on y parvient à l'aide d'un merveilleux petit appareil qui tient dans la main : la cellule-diamant. (Figure 3) Je vais présenter rapidement celle que Jean Peyronneau a construite et utilise, dans notre laboratoire.

En voici le principe : un trou de la taille d'un petit trou d'épingle est percé dans une mince feuille d'acier, on place dans le trou de la poudre du minéral à transformer (olivine par exemple) et on place la feuille entre deux diamants taillés en brillants, collés l'un au bout d'un piston, l'autre au fond d'un cylindre. Le tout est serré à la main à l'aide d'une vis et d'une pince. La pression développée dans la cellule ne peut évidemment pas être mesurée avec un manomètre. Pour la connaître, on place avec l'échantillon quelques grains très fins de rubis sur lesquels on envoie un faisceau laser bleu à travers les diamants transparents. Le rubis doit la profondeur de sa couleur rouge à ses propriétés de fluorescence : éclairé par de la lumière

visible, il réémet de la lumière rouge (qui renforce la couleur rouge d'absorption). On utilise ici le fait que la lumière de fluorescence est émise à une fréquence bien déterminée, qui varie avec la pression, et dont la variation est bien étalonnée.

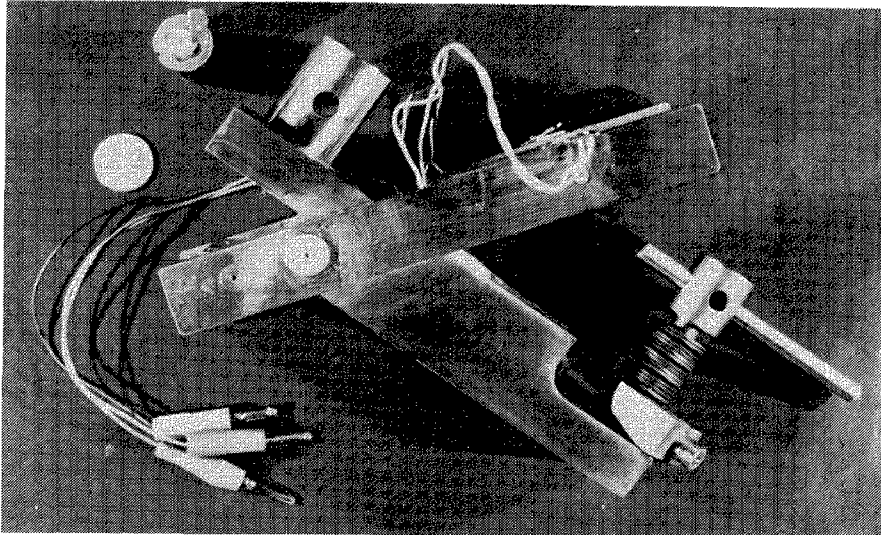


Figure 3
La cellule-diamant

La cellule est ensuite éclairée par un autre laser, infra rouge celui-ci et plus puissant. L'énergie du laser est absorbée par l'échantillon et l'échauffe jusqu'à 2000 ou 3000°C, permettant ainsi à la réaction de transformation de s'opérer.

On commence donc à connaître depuis peu de temps les propriétés physiques de ce silicate à structure de pérovskite qui constitue à peu près 80% en volume du manteau inférieur, c'est-à-dire à peu près la moitié du volume de la Terre.

Quant au noyau liquide, c'est essentiellement du fer comme l'a bien montré Francis Birch dans les années 50. La géophysique interne doit beaucoup à Francis Birch, mort au début de l'année dernière, il a en particulier établi la relation entre vitesse sismique et densité. Pour le noyau, il a montré que seul le fer, parmi les éléments suffisamment abondants dans le système solaire, pouvait permettre d'obtenir des densités comparables à celles observées dans le noyau pour des pressions de l'ordre de celles qui y règnent. Il faut cependant ajuster sa densité à celle du noyau en y incorporant un peu d'éléments légers. On discute encore s'il s'agit surtout de soufre ou d'oxygène. L'oxygène est un candidat sérieux, surtout depuis que l'on a

montré, toujours avec la cellule diamant et la microscopie électronique, qu'à très haute pression, le fer liquide réagissait avec les oxydes du manteau inférieur en dissolvant l'oxyde de fer, donc en s'enrichissant en oxygène.

La graine, au centre, découverte en 1936 par la sismologue danoise Inge Lehmann, est de fer probablement presque pur, et elle est solide. En effet, le point de fusion du fer augmente avec la pression et dépasse la température du noyau pour la pression qui règne à 5150 km (Figure 4) : le fer liquide cristallise donc, et se purifie en rejetant les éléments légers en solution. Incidemment, si on connaissait bien la température de fusion du fer sous la pression de 3,3 Mbar, et l'abaissement du point de fusion dû aux éléments en solution, on aurait un excellent moyen de connaître la température à la frontière graine-noyau. Ce n'est pas encore tout à fait le cas, mais extrapolations d'expériences et calculs conduisent à penser que cette température doit être voisine de 5000 degrés.

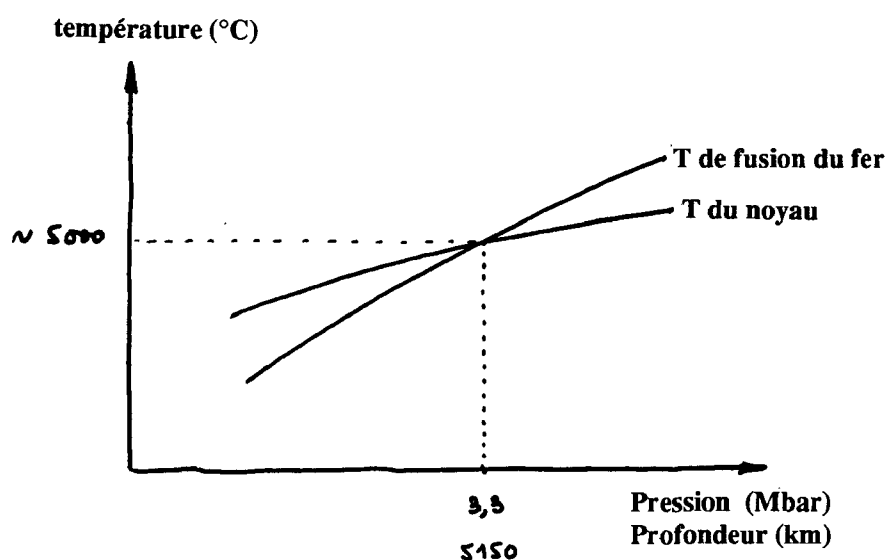


Figure 4

3. Le fonctionnement de la Terre

Parlons un peu maintenant du fonctionnement de la machine thermique Terre, ce qui va nous obliger à aborder des problèmes non encore résolus, sujets actuels de controverse.

Les sources d'énergie sont maintenant bien connues, qualitativement, sinon quantitativement. En gros, les 3/4 de la chaleur dégagée dans la Terre vient de la désintégration des isotopes radioactifs ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K , contenus dans la croûte, et surtout dans le manteau, bien plus vaste, 1/4 vient de la chaleur primitive d'accrétion, produit de la transformation de l'énergie cinétique des énormes météorites qui ont fait grossir la Terre. Au total, à peu près 40 millions de MW, correspondant à un flux de chaleur de 80 mW/m^2 , sortant de la surface terrestre.

Il existe trois façons de transporter la chaleur :

- le rayonnement, grâce auquel la chaleur de la Terre est évacuée dans l'espace interplanétaire, mais peu efficace à l'intérieur de la Terre, en raison de l'opacité des matériaux terrestres.

- la conduction, propagation de l'agitation thermique des atomes, qui laisse la matière immobile.

- et enfin, la convection, qui transporte la matière avec la chaleur qu'elle contient. C'est le mode utilisé pour le chauffage domestique par convecteurs : l'air s'échauffe, devient plus léger, monte, se refroidit et redescend se réchauffer ; on a des courants de convection.

La convection est le mode de transport le plus efficace, mais il implique que la matière puisse s'écouler comme un fluide : c'est en fait le cas du manteau qui, solide élastique à l'échelle de temps de la propagation des vibrations sismiques (inférieure à l'heure), se comporte comme un fluide très visqueux à l'échelle de millions d'années.

L'expansion des fonds océaniques, la dérive et la collision des continents, la subduction des plaques océaniques.... bref tous les phénomènes de la tectonique des plaques sont l'expression de surface de la convection qui évacue la chaleur de l'intérieur de la Terre : des courants de matière chaude montent des profondeurs, se refroidissent en surface et replongent aux zones de subduction.

La technique récente de "tomographie sismique" montre que les choses sont en fait assez compliquées. Le principe de la tomographie sismique est analogue à

celui du scanner des hôpitaux, mais en utilisant des données sismiques. Des réseaux d'observatoires sismologiques répartis sur tout le Globe enregistrent les temps d'arrivée des ondes sismiques de nombreux tremblements de Terre ; le réseau Géoscope établi par l'IPGP et l'INSU (Figure 5) dont on a fêté le dixième anniversaire l'année dernière. Par un traitement mathématique et informatique approprié des temps d'arrivée, on restitue une image à trois dimensions des hétérogénéités latérales de vitesse sismiques, c'est-à-dire des régions où la vitesse est supérieure à la moyenne ("rapides"), et de celles où elle est inférieure ("lentes"). On peut associer les hétérogénéités de vitesse à des hétérogénéités de densité et faire l'hypothèse que celles-ci sont dues à des hétérogénéités de température : les régions lentes, moins denses et plus chaudes correspondent donc à des courants ascendants de matière chaude, alors que les régions rapides, plus denses et plus froides correspondent aux courants descendants.

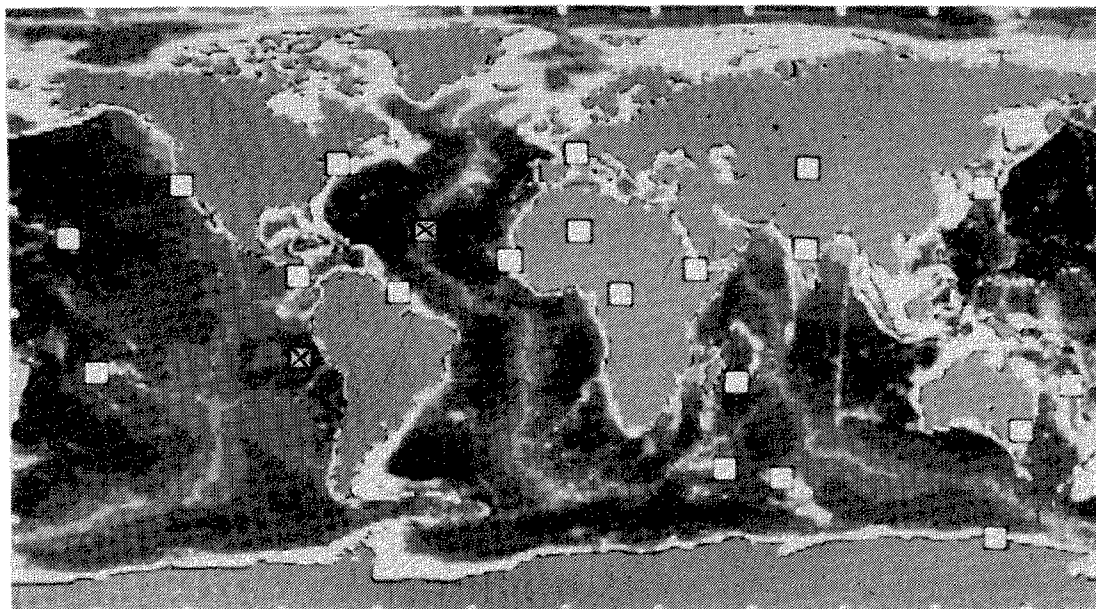


Figure 5
Implantation du réseau Géoscope en 1989

(O.B.S Ocean Bottom Seismeters = Sismographes Fond de Mer)

□ station Geoscope ⊠ sites OBS proposés

La tomographie du manteau supérieur montre que les zones de remontée chaude des dorsales océaniques ne sont pas enracinées plus bas que 300 km environ.

En fait, il semble assez probable maintenant que l'essentiel des courants ascendants de matière profonde soit constitué par des panaches de matière chaude légère, qui remonteraient de la frontière entre manteau inférieur et manteau supérieur ou de la frontière noyau-manteau (Figure 6). Ces panaches, fixes alors que les plaques sont mobiles, débouchent à la surface et percent les plaques en donnant des volcans : les "points chauds" (Figure 7).

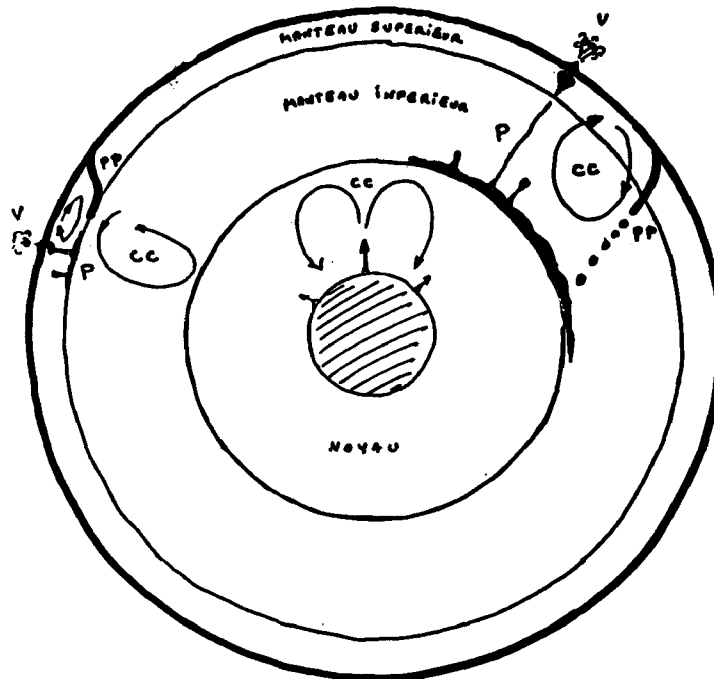


Figure 6

CC : courants de convection PP : plaques plongeantes
P : panache V : volcans

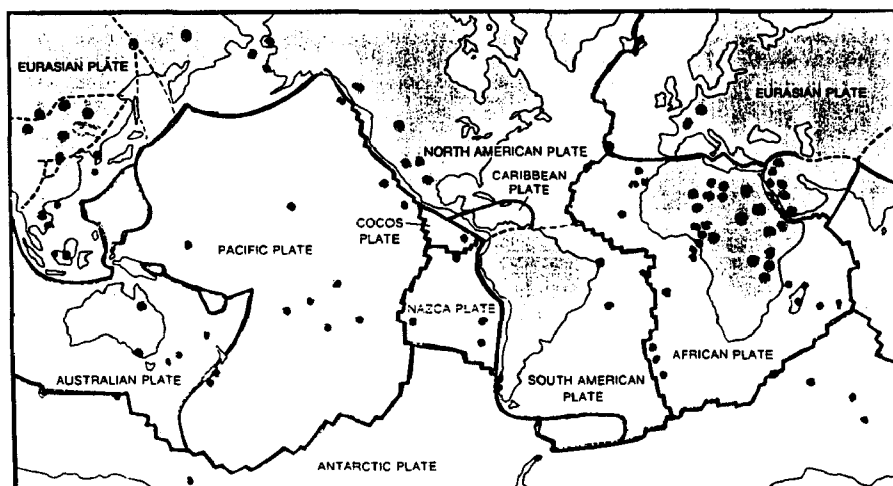


Figure 7

Carte des "points chauds"
(le trait en gras représente la frontière de plaques)

Les points chauds sont des éléments essentiels de la dynamique terrestre, ils ont à certaines époques craché d'énormes quantités de laves : ainsi les traps du Deccan qui couvrent une partie importante de l'Inde sur plusieurs kilomètres d'épaisseur (les grottes bouddhiques d'Ajanta sont creusées dedans) ont été épanchés à partir du point chaud de la Réunion, toujours actif de nos jours, il y a 65 millions d'années, lorsque l'Inde passait au-dessus de lui, lors de son voyage vers le Nord, qui devait aboutir à la collision avec le continent asiatique et la surrection de l'Himalaya et du Tibet.

La répartition des points chauds à la surface du Globe est corrélée avec les zones plus chaudes à la base du manteau inférieur et avec les bosses du géoïde. Le géoïde est la surface équipotentielle du champ de pesanteur terrestre qui correspond avec le niveau de la mer. Cette surface est bien déterminée à l'aide des satellites à radar altimétrique (on voit entre parenthèse l'importance des techniques spatiales pour la géophysique interne) (Figure 8) (due à A. Cazenave). Le géoïde n'est pas sphérique, il est bosselé (les creux et les bosses sont exagérés) plutôt vers les endroits où les courants chauds de matière, liés à la distribution des points chauds, montent des profondeurs du manteau : 2 bosses antipodales de 300 m environ au-dessus de l'Afrique Occidentale et du Pacifique Ouest.

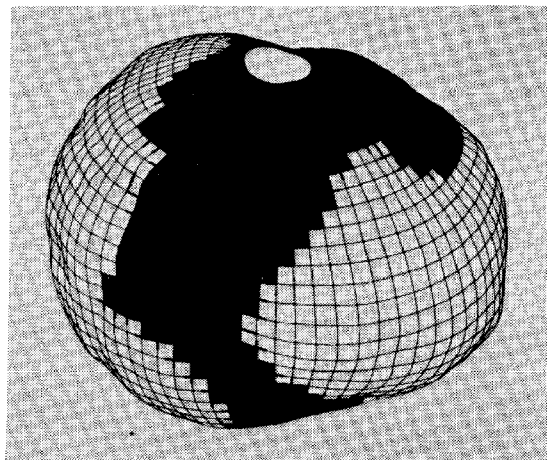


Figure 8 - Le géoïde

Pénétrons maintenant au coeur de la Terre, dans le noyau, en traversant la frontière noyau-manteau. Nous quittons le manteau rocheux, très chaud certes (environ 3000° C) mais solide à cause de la pression, avec une densité voisine de 6, et assez mauvais conducteur de l'électricité, pour plonger dans du métal en fusion,

sans doute aussi peu visqueux que l'eau, de densité égale à 10, et bon conducteur de l'électricité. Les contrastes sont au moins aussi forts que ceux qui existent à la frontière que nous habitons entre la Terre solide et l'atmosphère et il ne fait guère de doute qu'il se passe là des phénomènes importants qui excitent fort l'intérêt des géophysiciens.

Les sismologues s'accordent pour penser que la frontière noyau-manteau présente un relief, probablement de l'ordre du kilomètre, bien qu'un désaccord persiste sur ce point. Quoi qu'il en soit, les bosses de la frontière permettent un couplage entre le noyau et le manteau. Il y a transfert de moment angulaire (équivalent de la quantité de mouvement pour les mouvements de rotation) entre le noyau fluide et le manteau solide, ce qui se traduit par des petites variations de la vitesse de rotation de la Terre, c'est-à-dire par des variations de la longueur du jour (de l'ordre de la milliseconde). Les variations de la longueur du jour suivent l'évolution de la variation séculaire du champ magnétique (liée aux mouvements du noyau) avec un retard d'environ 9 ans. (Figure 9). Sur la base d'une telle corrélation et des enregistrements de la variation séculaire, Courtilot et Le Mouél ont prédit en 1978 une augmentation de la vitesse de rotation de la Terre au début des années 80, et une diminution au début des années 90, prédiction vérifiée pour la seconde fois.

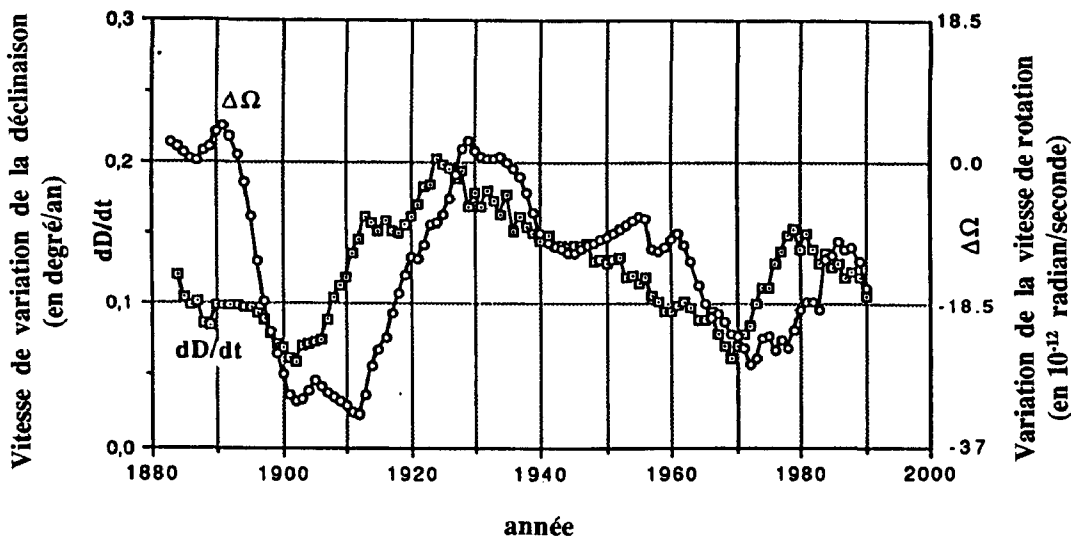


Figure 9

Le noyau fluide convecte, comme le manteau mais bien plus vite, puisque beaucoup moins visqueux. La cause de la convection est aussi différente. On pense maintenant que la force d'Archimède qui fait monter les courants fluides est due, non pas à la dilatation thermique comme dans le cas du manteau, mais à la cristallisation fractionnée qui s'opère à la surface de la graine : le fer contenant des éléments légers, se solidifie pour donner du fer presque pur, le liquide s'enrichit donc en éléments légers et tend à monter.

Cette convection d'origine non thermique est dite "solutale", elle fournit l'énergie nécessaire à l'entretien du champ magnétique terrestre produit dans le noyau par effet dynamo : les courants électriques dans le fluide métallique en mouvement engendrent le champ magnétique qu'on observe à la surface de la Terre. L'Observatoire Magnétique National, situé à Chambon la Forêt dans la forêt d'Orléans, enregistre le champ magnétique et ses variations, de façon continue depuis bientôt 110 ans. En particulier les enregistrements de la variation séculaire du champ magnétique apportent des renseignements précieux sur les mouvements fluides, près de la surface du noyau. Jean-Louis Le Mouél et son équipe ont ainsi montré que ces mouvements, dont les vitesses sont de l'ordre du mètre par heure, présentent une structure symétrique : le fluide plonge à l'équateur et émerge en position antipodale.

Les mouvements qui animent le noyau, au plus profond de la Terre, font donc sentir leur influence jusqu'à la surface : ils créent le champ magnétique qui nous protège du vent solaire, il n'est pas impossible qu'ils déclenchent des instabilités dans le manteau et causent la naissance de points chauds (cf figure 6), ils perturbent la rotation de la Terre et sans doute, en conséquence, le régime de la circulation atmosphérique et, qui sait, le climat.

En bref, la frontière noyau-manteau est la Nouvelle Frontière de la géophysique interne.

Jean-Paul POIRIER
Physicien à l'Institut de Physique du Globe de Paris