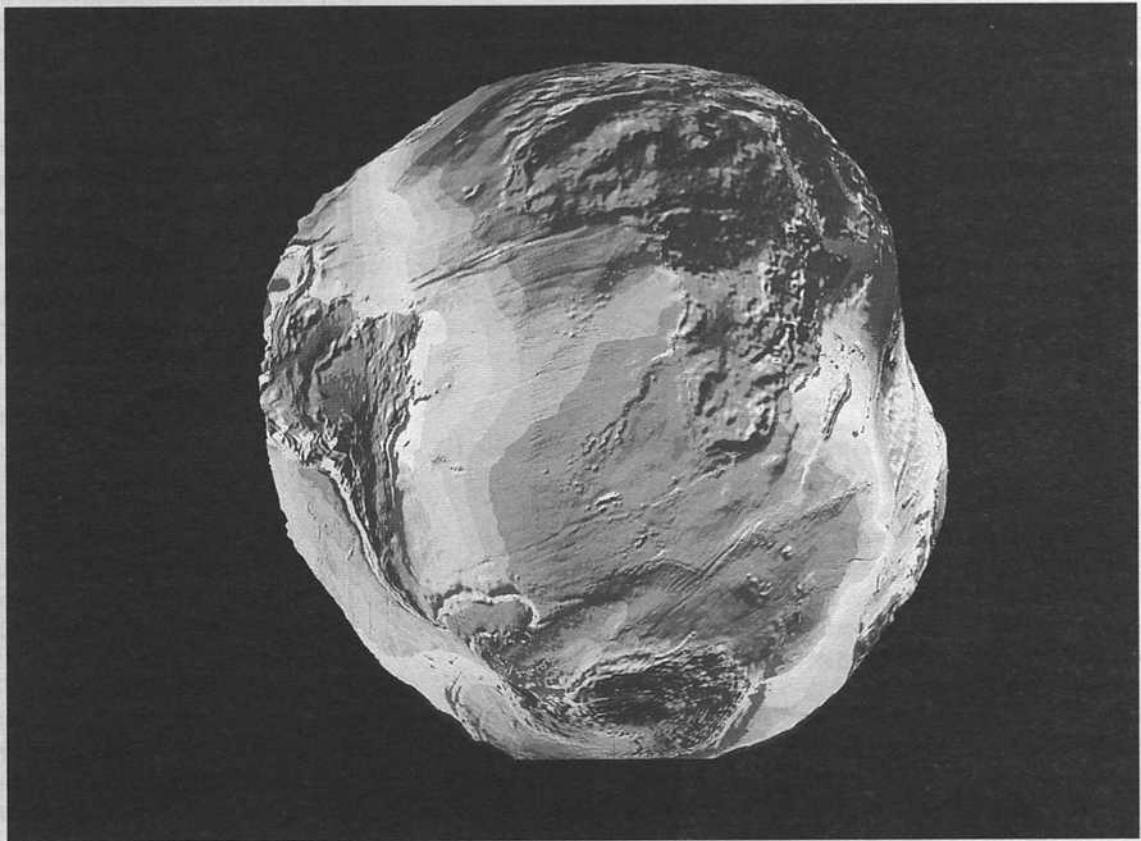


Une controverse du XIXème siècle

# La Terre, fluide ou solide ?



**VINCENT DEPARIS**  
*INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE*  
*DE STRASBOURG*

**C**ordier, le 4 juin 1827, lisait son célèbre mémoire *Essai sur la température de l'intérieur de la Terre* devant l'Académie des Sciences. Il affirmait : « Nos expériences confirment pleinement l'existence d'une chaleur interne, qui est propre au globe terrestre, qui ne tient point à l'influence des rayons solaires, et qui croît rapidement avec la profondeur. (...) Tout porte donc à croire que la masse intérieure du globe est encore douée maintenant de sa fluidité originaire, et que la Terre est un astre refroidi, qui n'est éteint qu'à sa surface ». Les recherches de Cordier correspondaient à un questionnement primordial : comment est constitué l'intérieur de la Terre ? Et surtout quel est son état : fluide ou solide ? Mais à l'époque, comme aujourd'hui d'ailleurs, nul moyen d'aller voir sur place, de sonder directement les entrailles de la Terre. Ce n'est que par les seules informations recueillies en surface et donc par des moyens détournés et des reconstructions indirectes, qu'il fallait se faire une idée. Pour Cordier — dont la vision reflète le large consensus qui s'est établi au début du XIX<sup>ème</sup> siècle —, la Terre était une énorme masse en fusion recouverte d'une mince écorce rigide d'à peine 40 à 50 kilomètres d'épaisseur. Cette affirmation d'une Terre majoritairement fluide découlait directement de ses observations sur l'accroissement de la température dans le fond des mines. L'augmentation moyenne y était en effet de 1° tous les 25 mètres

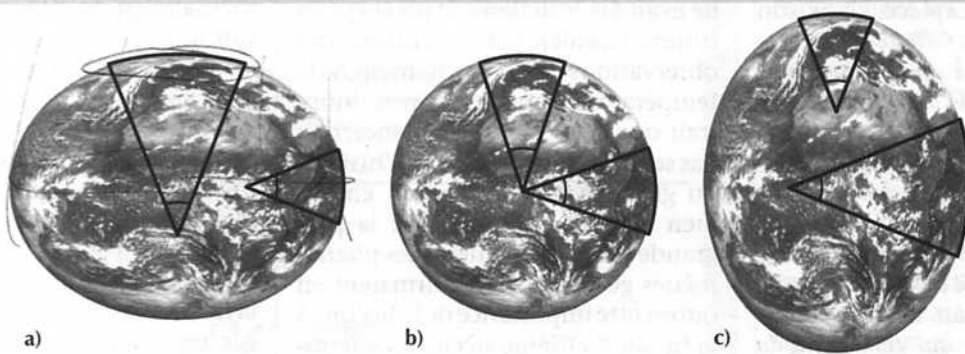
de descente. Avec une telle progression, si l'on supposait que celle-ci se poursuivait indéfiniment, la température de l'eau bouillante était atteinte à 2500 mètres de profondeur (ce qui était confirmé, le croyait-on à l'époque, par les sources d'eau chaude), et dès 50 kilomètres de profondeur, on trouvait une température de 1600 degrés, température à laquelle toutes les roches de la surface étaient en fusion. L'intérieur de la Terre ne pouvait donc être qu'un océan de magma sur lequel flottait une croûte bien fine... Cette idée d'une Terre en fusion harmonisait de plus toutes les connaissances sur la Terre de l'époque et regroupait des conceptions aussi bien astronomiques, géologiques, que de la physique du globe.

Les arguments astronomiques reposaient sur la cosmogonie de Laplace (théorie de la naissance du système solaire) que ce dernier présenta en 1797 dans son *Exposition du système du Monde*. La cohérence des mouvements dans le système solaire, qui se faisaient pratiquement tous dans le même plan et dans le même sens, lui indiquait qu'une même cause primitive avait contrôlé l'ensemble des mouvements planétaires. Il supposait alors que le Soleil avait été initialement enveloppé d'une atmosphère en rotation uniforme qui, en vertu d'une chaleur excessive, était étendue au-delà des orbites de toutes les planètes. La limite de cette atmosphère était en équilibre à cause de l'égalité entre la gravité et la force

centrifuge de rotation. Cependant, au fur et à mesure du refroidissement de l'atmosphère, celle-ci se contractait et voyait, par le principe de la conservation du moment cinétique, sa vitesse de rotation croître. A sa surface, la force centrifuge devenait plus importante que l'attraction et provoquait l'abandon d'un anneau toroïdal de gaz chaud dans le plan équatorial. A chaque contraction thermique, la nébuleuse éjectait un anneau similaire qui se condensait ensuite en une seule masse gazeuse sphérique. Cette succession d'anneaux a ainsi formé les différentes planètes, où le même mécanisme pouvait se reproduire pour engendrer les satellites. L'essentiel de cette théorie de Laplace, qui allait devenir la cosmogonie de référence durant tout le XIX<sup>ème</sup> siècle, résidait dans le postulat selon lequel la Terre provenait de la condensation d'une masse gazeuse chaude, et qu'elle avait donc originellement été en fusion.

Cette origine ignée du globe était d'ailleurs confirmée par d'autres indices, en particulier par la figure de la Terre et la répartition interne de la densité. Les expéditions françaises envoyées en 1735 au Pérou (Godin, Bouguer, La Condamine...) et en Laponie (Maupertuis, Clairaut...) pour y effectuer des mesures géodésiques ont montré que le degré du méridien était plus grand près des pôles que de l'équateur. Cette observation indiquait que la Terre n'était pas parfaitement sphérique, mais qu'elle avait la

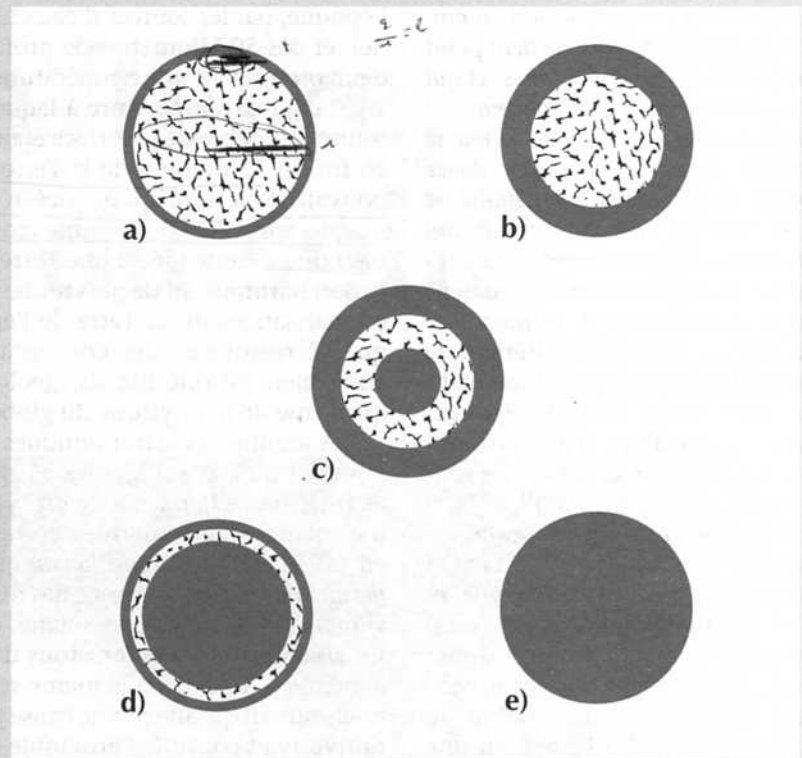
## La Terre est-elle aplatie, sphérique ou allongée ?



Nous pouvons apporter la réponse en comparant la longueur d'arcs de méridien (correspondant à un angle identique, déterminé par la hauteur des étoiles au-dessus de l'horizon), à l'équateur et aux pôles. Les expéditions géodésiques françaises, en mesurant un arc plus grand au pôle qu'à l'équateur, montrèrent que la Terre était légèrement aplatie aux pôles.

forme d'un ellipsoïde de révolution légèrement aplati aux pôles, comme l'avait pressenti Newton dès la parution de ses *Principia* en 1687. Si la Terre n'avait pas eu de rotation propre, elle aurait effectivement été parfaitement sphérique à cause de l'égalité gravité de ses parties. Mais la rotation de la Terre sur elle-même et la force centrifuge induite, **nulle** aux pôles et maximale à l'équateur, tendaient à renfler les régions de l'équateur au détriment des régions polaires, et donnait à la Terre cette forme caractéristique en ellipsoïde de révolution. L'aplatissement, qui est la différence entre le rayon équatorial et le rayon polaire divisée par le rayon équatorial, est d'environ 1/300 ; le rayon équatorial est ainsi supérieur au rayon polaire d'une vingtaine de kilomètres. Ces observations géodésiques montraient pour l'essentiel que la figure de la Terre était la même que celle que prendrait une masse entièrement fluide en rotation. D'un autre côté, en 1798, Cavendish avait pu peser la Terre sans sortir de chez lui. Il déterminait en fait la constante de la gravitation en mesurant l'attraction que deux grosses boules de plomb exerçaient sur deux petites balles suspendues aux extrémités d'un levier mobile. Puis, grâce à la valeur de l'attraction à la surface de la Terre, il pouvait obtenir la valeur de la masse de la Terre, ce qui lui donnait une densité moyenne de 5,48 g/cm<sup>3</sup> (la valeur actuelle est de 5,52 g/cm<sup>3</sup>). Or la densité des roches superficielles est de 2,8 g/cm<sup>3</sup>. Il s'ensuivait que la Terre ne pouvait pas être homogène, mais qu'il devait y avoir dans ses profondeurs des roches plus lourdes pouvant compenser le défaut de masse de la surface. Laplace, dans son *Traité de Mécanique Céleste*, s'interrogeait sur « la cause qui a donné aux couches du sphéroïde des formes à peu près elliptiques et de densité croissante de la surface au centre, qui les a disposées régulièrement autour de leur centre commun de gravité et qui a rendu sa surface très peu différente de celle qu'elle eût prise si elle avait été primitivement fluide ». Il concluait alors : « si les diverses substances qui composent la Terre ont eu 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 différents modèles de Terre proposés au XIX<sup>ème</sup> siècle (d'après Bush)



- a) Croûte solide de faible épaisseur entourant un matériau interne en fusion.
- b) Enveloppe solide épaisse entourant un matériau interne en fusion.
- c) Enveloppe solide épaisse, liquide interne, noyau solide.
- d) Globe pratiquement solide sauf une couche en fusion sous la croûte.
- e) Globe entièrement solide.

les diverses caractéristiques requises ».

Les hypothèses sur l'origine de la Terre, sa figure et la répartition de la densité, indiquaient donc que le globe avait été initialement un corps en fusion. Cordier, par sa synthèse des observations de l'accroissement de la température dans les mines, montrait que cette fusion ne concernait pas seulement les débuts de l'histoire du globe, mais qu'elle était encore bien actuelle, et intéressait la plus grande part de la planète. Les phénomènes géologiques confirmaient en outre cette importance de la fusion. A la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, les scientifiques avaient en effet reconnu que les volcans ne résultaient pas de feux souterrains, relativement superficiels et dus à la combustion du charbon — comme on l'avait cru pendant tout le siècle —, mais qu'ils étaient des produits de la fusion des roches terres-

tres. Les volcans étaient alors considérés comme des communications directes entre la surface et la masse fondue sous-jacente. Radau, un mathématicien du XIX<sup>ème</sup> siècle, écrivait ainsi : « Les volcans sont des témoins irrécusables de l'existence d'un foyer souterrain : ils semblent vraiment les mille portes de l'enfer où couve le feu éternel ». De la même manière, les tremblements de terre étaient envisagés comme une conséquence des mouvements internes du fluide. Cependant, la synthèse de cette idée de la fluidité de la Terre fut réalisée par le géologue Elie de Beaumont : en se refroidissant, l'écorce terrestre était supposée se contracter. Ce processus créait des contraintes, des ruptures, des plissements, qui finalement formaient de nouvelles chaînes de montagnes. Bien que la dissipation de la chaleur soit continue, Elie de Beau-



mont estimait que les mouvements de contraction étaient brusques et qu'ils correspondaient aux différentes orogénèses qui s'étaient succédées au cours de l'histoire géologique. La fusion de la Terre permettait ainsi d'expliquer l'épineux problème de la formation des reliefs terrestres, qui était toujours resté irrésolu ou avait reçu des solutions très peu satisfaisantes et c'est pourquoi, inversement, cette soudaine possibilité d'explication raisonnable de la naissance des montagnes impliquait la fusion du globe...

Au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'hypothèse d'une Terre en fusion recouverte d'une mince croûte solide était presque unanimement acceptée. Elle représentait un système global séduisant où un seul processus (la déperdition de chaleur) expliquait une grande diversité de phénomènes. Cette synthèse, qui rendait si vraisemblable la fusion, ne fut cependant que momentanée. En effet, si la fluidité semblait une nécessité absolue aux géologues qui voulaient expliquer les éruptions volcaniques et la formation des montagnes, elle ne satisfaisait désormais plus les physiciens qui se demandaient comment un tel corps, majoritairement fluide, pouvait se comporter par rapport à la rotation et aux forces de marées.

Les premiers arguments contre une croûte de faible épaisseur furent avancés par un savant anglais, Hopkins, entre 1839 et 1842. Ce dernier consi-

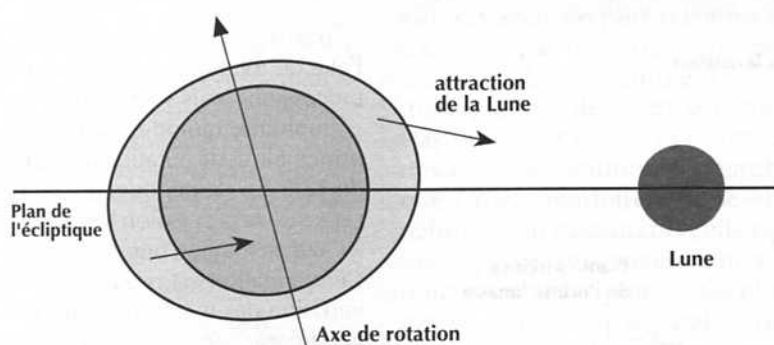
tatait d'abord que la question de la fusion des roches était délicate, car deux paramètres intervenaient : si la température la facilitait, la pression, qui elle aussi s'accroissait avec la profondeur (poids des roches sus-jacentes), s'y opposait au contraire. Ainsi, si une roche fondait à 1000° en surface, il lui faudrait une température bien plus élevée pour entrer en fusion à 100 kilomètres de profondeur. Les arguments de Cordier sur l'accroissement de la température avec la profondeur n'avaient donc de valeur si l'on ne cherchait à y inclure l'effet de la pression des roches. Pour connaître l'état des roches internes, il fallait par conséquent savoir qui de la température ou de la pression avait la plus grande influence sur le point de fusion des roches, et Hopkins notait que seules des expériences en laboratoire pouvaient lever cette indétermination. Cependant, devant l'insuffisance et l'incertitude des données de l'époque, il s'en tenait à différentes hypothèses remarquables : (1) si la température s'accroissait assez rapidement avec la profondeur pour dépasser l'influence de la pression, l'intérieur du globe devrait être complètement fluide, sous une croûte dont on ne pouvait pas connaître directement l'épaisseur ; (2) si l'influence de la pression augmentait plus rapidement que celle de la température, la solidification aurait dû commencer au contraire au centre, et comme en même temps le refroidis-

sement en surface formait une croûte, le globe devrait être formé d'une enveloppe solide, d'un noyau solide, séparés l'un de l'autre par de la matière en fusion ; (3) le globe pourrait être complètement solide si le refroidissement était complet.

## De la précession

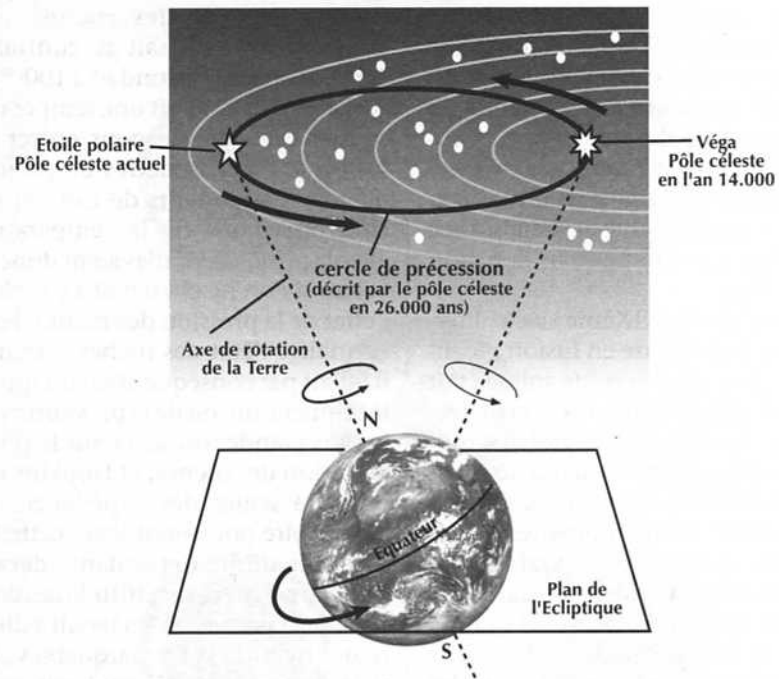
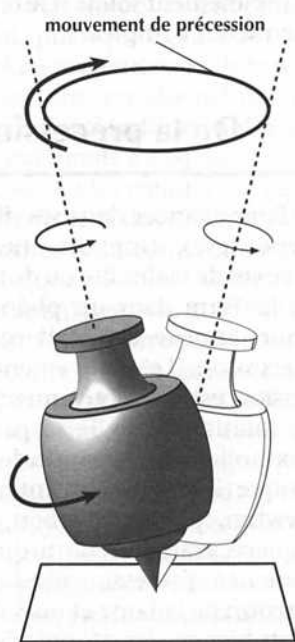
Pour avancer dans ses différentes hypothèses, Hopkins chercha des preuves de la fluidité ou de la solidité de la Terre dans un phénomène a priori annexe qui était celui de la précession. Le mouvement de précession est un mouvement de l'axe de rotation de la Terre par rapport aux étoiles, qui est connu depuis Hipparque (II<sup>ème</sup> siècle avant notre ère). Newton, puis d'Alembert, Euler et Laplace, avaient reconnu que le mouvement de précession résultait de l'attraction de la Lune et du Soleil sur la protubérance équatoriale de la Terre. En effet, du fait de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'écliptique, le bourrelet équatorial formé par la rotation n'était pas situé dans le plan de révolution de la Lune et du Soleil. Ces deux astres pouvaient alors exercer des forces qui tendaient à le ramener dans leur plan orbital : ils cherchaient ainsi à redresser l'axe de rotation. Cependant, l'effet gyroscopique de la rotation de la Terre s'opposait à un tel effet, et telle à une toupie en fin de course, l'axe de rotation décrivait alors le cône de précession autour de l'axe de l'écliptique. Dans cette explication, la Terre était cependant considérée comme un corps solide dont toutes les parties étaient liées les unes aux autres, et qui participait tout entier aux actions perturbatrices. Hopkins remarquait alors que si la Terre était une masse fluide recouverte d'une croûte solide, les actions du Soleil et de la Lune ne concernaient plus que l'enveloppe, qui glissait en quelque sorte sur le noyau fluide. Les forces perturbatrices, n'entraînant dès lors que la croûte extérieure, agissaient sur une masse beaucoup plus faible, et devaient provoquer un mouvement de précession considérablement amplifié. Hopkins arrivait alors à la conclusion remarquable (et cependant inadéquate) que, pour retrouver la valeur observée de la précession, l'écorce solide du globe devait avoir une épais-

### La cause du mouvement de précession

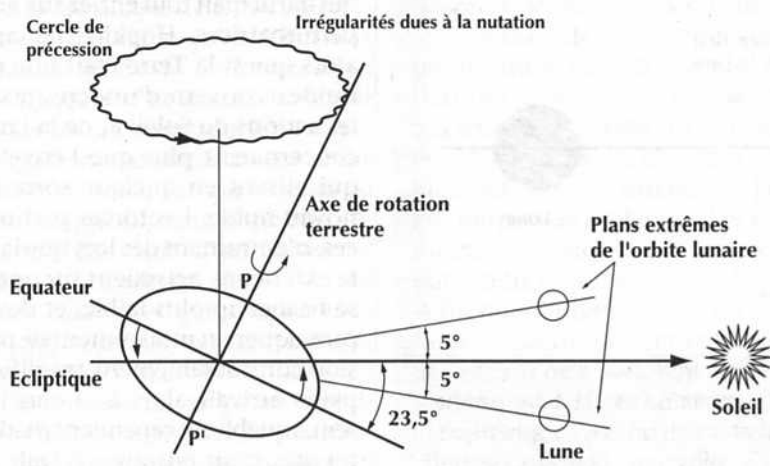


Le mouvement de précession est dû à l'attraction de la Lune sur le bourrelet équatorial de la Terre. Si la Terre renfermait un noyau sphérique, les actions perturbatrices ne concerneraient plus que l'enveloppe qui glisserait sur le noyau.

## Le mouvement de précession



Le mouvement de précession est un déplacement de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'espace. L'axe de rotation n'est donc pas fixe par rapport aux étoiles : il décrit en 25.800 ans un cône autour de l'axe de l'écliptique d'ouverture constante et égale à l'obliquité de l'écliptique (inclinaison du plan de l'équateur par rapport au plan de l'écliptique qui vaut  $23^{\circ}26'$ ). L'axe de rotation change donc d'orientation dans le ciel, et si aujourd'hui, il passe par l'étoile polaire, en 7600 il sera aligné avec Alderamin, une étoile de la constellation de Céphée, et en 14.800 avec Véga, une étoile de la constellation de la Lyre ; ce n'est donc pas toujours la même étoile qui joue le rôle de pôle céleste. Du fait de la précession, qui est un lent changement d'orientation de la Terre dans l'espace, le retour des saisons (retour d'une même configuration axe de rotation-Soleil) est légèrement avancé par rapport à une révolution complète de la Terre autour du Soleil. L'année tropique (retour des saisons) est donc plus courte que l'année sidérale (retour d'une même configuration Terre-Soleil-étoiles), la différence étant de 20 min 23 sec. C'est par rapport à l'année tropique que notre calendrier civil est conçu, de telle sorte que les saisons ne dérivent pas par rapport aux mois, et que les fêtes religieuses surviennent toujours à la même époque de l'année (Noël, par exemple, fixé le 25 décembre, survient toujours juste après le solstice d'hiver et le début du rallongement des jours). En contrepartie cependant, le calendrier ne peut coïncider avec l'année sidérale, et il y a une lente évolution pour l'époque de l'observation des étoiles : dans 12.900 ans (demi-période de la précession), les étoiles que nous observons maintenant seulement en hiver (en été, elles traversent le ciel pendant la journée) ne seront plus visibles qu'en été, et vice versa...



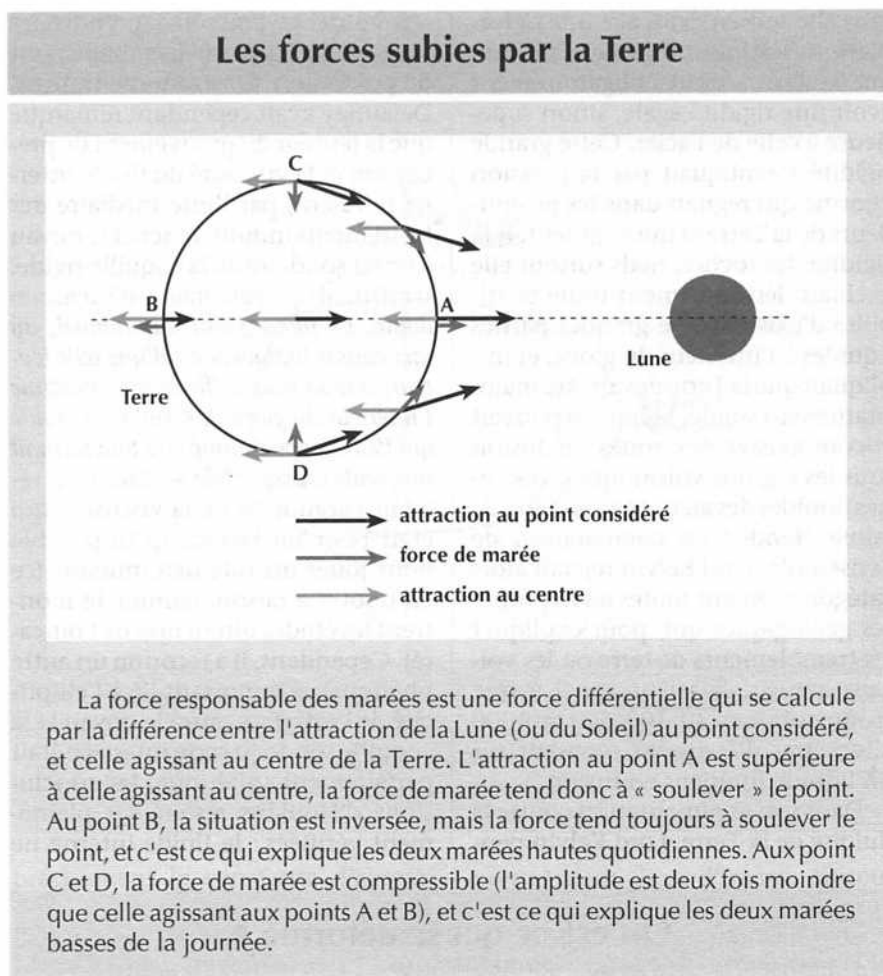
Il existe d'autres mouvements de l'axe de rotation qui s'ajoutent à la précession, mais sont de période et d'amplitude moindres. La nutation principale est la nutation de Bradley, de 18,6 ans de période, qui en l'absence de la précession ferait décrire à l'axe de rotation une petite ellipse. Cette nutation est produite par une variation des marées lunaires due à la rétrogradation des nœuds de l'orbite de la Lune, justement en 18,6 ans. Cette rétrogradation des nœuds lunaires est, elle, due aux perturbations causées par les marées solaires...

seur d'au moins 1300 à 1600 kilomètres, ce qui représentait 1/5 à 1/4 du rayon terrestre. Pour Hopkins, cette condition impliquait que les volcans ne pouvaient plus être en communication directe avec la masse fluide interne, et que leurs réservoirs devaient ainsi former des lacs souterrains de dimensions limitées plutôt qu'un seul océan interne.

Les travaux d'Hopkins sur la rigidité de la Terre ont été poursuivis par l'un de ses élèves, William Thomson (qui deviendra Lord Kelvin), connu pour avoir donné une estimation de l'âge de la Terre. Lord Kelvin soulevait une autre question concernant la solidification des roches : celle-ci se faisait-elle avec une expansion, ou au contraire avec une contraction ? Dans le premier cas, les roches seraient plus légères que le liquide qui leur a donné naissance, elles pourraient donc flotter à sa surface et former une croûte stable surmontant un océan de magma. Au contraire, si, comme le pensait Thomson et comme on le vérifie aujourd'hui dans la majorité des cas, les roches se contractaient lors de la solidification, elles seraient plus lourdes que le liquide en fusion. Dans ce cas, la croûte à peine formée se fragmenterait et coulerait vers le centre de la Terre ; elle ne pourrait par conséquent se maintenir en surface que lorsque la majorité du globe serait déjà à une température proche du point de solidification. C'est pourquoi, selon Lord Kelvin, le globe devait déjà être dans un état de solidification presque complète. Lord Kelvin n'en restait cependant pas à ces considérations qualitatives (à cette époque, les expériences en laboratoires étaient sujettes à caution : certains montraient une contraction des roches lors de la solidification, alors que d'autres indiquaient une expansion) ; en 1862, il allait développer l'argument le plus convaincant en faveur d'une rigidité importante du globe, argument basé sur les marées.

## Le phénomène des marées

Le phénomène des marées océaniques provient de l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur la Terre. Il traduit le fait que les diverses parties de la Terre subissent des at-



tractions inégales, dues à leur distance légèrement différente des astres perturbateurs. Ampère, en 1833, avait déjà remarqué que : « *Ceux qui admettent la liquidité du noyau intérieur de la Terre, paraissent ne pas avoir songé à l'action qu'exercerait la Lune sur cette énorme masse liquide, action d'où résulteraient des marées analogues à celles de nos mers, mais bien autrement terribles, tant par leur étendue que par la densité du liquide* ». A l'époque de Lord Kelvin, on avait de plus reconnu qu'il n'existait pas de corps entièrement indéformable (infiniment rigide), mais que tous devaient se déformer élastiquement lorsqu'ils étaient soumis à une sollicitation extérieure brusque. La déformation élastique est une déformation instantanée, elle ne dépend que des propriétés du matériau (plus ou moins compressible, plus ou moins rigide), et disparaît entièrement lorsque la force est supprimée. Ainsi, Lord Kelvin remarquait que les marées de la Lune et du Soleil ne devaient pas seulement mettre en mouvement les océans mais également soulever le sol terrestre. La Terre, dans toute sa masse, devait donc changer de forme ! Les marées océa-

niques observées n'étaient d'ailleurs que les différences entre les déformations de la couche fluide et les déformations élastiques du sol. L'argument de Lord Kelvin en faveur d'une grande rigidité de la Terre était le suivant : si la Terre était fluide dans son intérieur, elle n'opposerait aucune résistance à la déformation et se déformerait totalement, répondant complètement à la sollicitation des marées ; les océans n'auraient plus aucune déformation à assumer, ils accompagneraient les soulèvements et les abaissements du sol en restant toujours à la même distance du fond, et les marées océaniques n'existeraient plus. Inversement, le fait que l'on observait réellement le flux et le reflux des eaux indiquait que la Terre ne se comportait pas comme un fluide, mais qu'elle possédait un certain degré de rigidité. Celui-ci pouvait s'estimer en comparant l'amplitude observée des marées océaniques à l'amplitude théorique, calculée pour une Terre indéformable. Cette comparaison, rendue délicate du fait que les marées étaient fortement perturbées par les conditions propres à chaque port, fut capitale : pour la première



fois, elle mit en évidence une déformation élastique du globe et montra que la Terre devait obligatoirement avoir une rigidité égale, sinon supérieure à celle de l'acier. Cette grande rigidité s'expliquait par la pression énorme qui régnait dans les profondeurs de la Terre et qui augmentait la rigidité des roches, mais surtout elle excluait définitivement toute possibilité d'existence de grandes parties liquides à l'intérieur du globe, et impliquait que la Terre devait être majoritairement solide. Même s'il pouvait encore exister des zones en fusion sous les régions volcaniques, ces zones liquides devaient toujours être de faible étendue en comparaison de l'ensemble. Lord Kelvin rejetait alors catégoriquement toutes les hypothèses géologiques qui, pour expliquer les tremblements de terre ou les volcans actuels, faisaient appel à une croûte solide de 30, 100, 500 ou 1000 kilomètres d'épaisseur reposant sur un liquide intérieur en fusion.

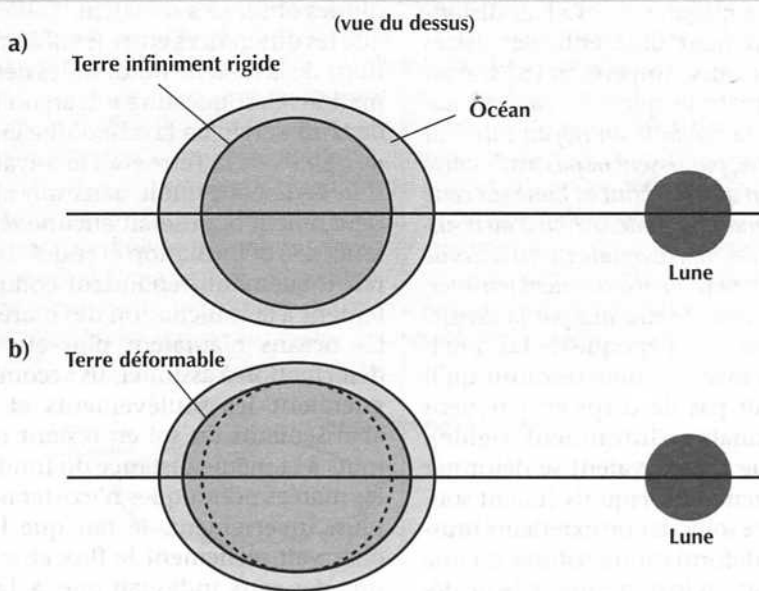
Dans son argumentation contre la fluidité de la Terre, Lord Kelvin pen-

sait au début pouvoir reprendre les idées d'Hopkins sur le mouvement de précession. L'astronome français Delaunay avait cependant remarqué que la lenteur du mouvement de précession et la viscosité du fluide interne devaient, par l'intermédiaire des frottements induits, amener le noyau à rester solidaire de la coquille rigide. Il affirmait : « Pour moi, il n'y a aucun doute. Le mouvement additionnel, dû aux causes indiquées est d'une telle lenteur, que la masse fluide qui constitue l'intérieur du globe doit suivre la croûte qui l'enveloppe comme si le tout formait une seule masse solide ». Thomson rejetait l'argument de la viscosité, qui était pour lui beaucoup trop faible pour jouer un rôle déterminant (ce en quoi il a raison, comme le montrent les études ultérieures de Poincaré). Cependant, il a reconnu un autre phénomène important lié à l'ellipticité de l'interface entre le noyau et la coquille solide. Si cette interface était parfaitement sphérique, les conclusions d'Hopkins resteraient pleinement vérifiées : le fluide interne ne

participerait pas à la précession et le mouvement de la coquille se trouverait amplifié. Mais il suffisait d'une très faible déviation de la sphéricité pour que le fluide et la coquille restent solidaires et aient la même précession que s'ils formaient un seul corps rigide. Plus tard, Poincaré expliquera ce comportement singulier par le couplage inertiel entre le noyau et l'enveloppe. Toutefois, ce couplage n'avait son plein effet que si la période du mouvement envisagé était grande. Lord Kelvin remarquait ainsi que le mouvement de précession dont la période est de 25.800 ans environ ne pourrait pas être affecté par la présence d'un noyau fluide. La situation devait être différente pour la nutation de Bradley, qui est un autre mouvement de l'axe de rotation et qui se rajoute au mouvement de la précession mais dont la période de 18,6 ans est bien plus courte. Si la Terre renfermait réellement un noyau fluide, cette nutation devait être sensiblement perturbée. Cependant, à son époque, les observations n'étaient pas assez fines pour vérifier ses prédictions (actuellement, on explique en effet un faible écart à la nutation de Bradley par la présence du noyau fluide — ce que Thomson considérait comme une preuve potentielle de la solidité de la Terre s'est donc au contraire révélé comme une contrainte sur la présence d'une partie fluide !). Thomson en concluait que, pour l'instant, rien ne pouvait être prouvé de manière définitive au sujet de la précession et de la nutation.

En 1870-80, la controverse entre les partisans d'une solidité complète et ceux d'une fluidité partielle restait très vive. L'objection majeure faite aux travaux de Lord Kelvin était que ses résultats n'étaient applicables qu'à la Terre considérée dans son ensemble et ainsi Sainte Claire Deville déclare : « Il n'en résulte nullement qu'il ne puisse y avoir dans la section intérieure du globe, une masse non seulement dépourvue de cette rigidité, mais constituant entre l'enveloppe extérieure et le noyau central un anneau sphéroïdal possédant une liquidité parfaite ». Les arguments mathématiques et abstraits de Lord Kelvin ne recevaient pas non plus l'adhésion de tout le monde. En outre, la fusion sous l'écorce était rendue impérative par la théorie de la contraction thermique pour expliquer la formation des montagnes. Cette fusion était d'ailleurs tou-

## Qu'est-ce qui se déforme ?



a) Si la Terre est supposée entièrement rigide, la déformation due aux marées est uniquement assumée par les océans qui s'allongent dans la direction de la Lune (ou du Soleil).

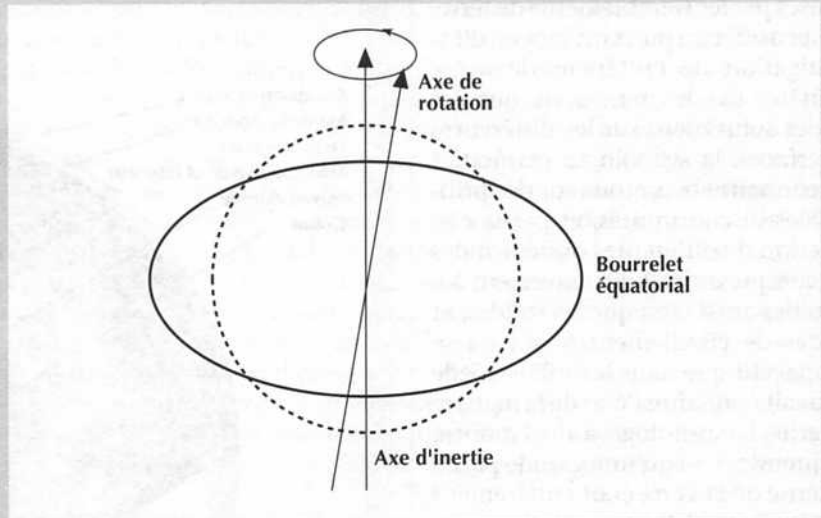
b) Si la Terre est déformable, les marées océaniques observées ne sont que les différences entre les déformations fluides de l'océan (sans résistance) et les déformations élastiques du sol. Si la Terre se déformait sans résistance, les océans ne feraient qu'accompagner les soulèvements et les abaissements du sol, et les marées océaniques n'existeraient plus.

jours fortement suggérée par les activités volcaniques, et c'est ce dont témoigne Radau : « Il est bien difficile d'admettre que les foyers souterrains qui alimentent les volcans, et dont l'activité se manifeste depuis les époques les plus reculées, puissent n'être que des accumulations locales de matière en fusion. (...) On ne peut échapper à la nécessité de chercher la cause prochaine des phénomènes volcaniques dans l'existence d'une nappe incandescente continue au-dessous d'une croûte solide d'une faible épaisseur qui peut d'ailleurs varier de 20 à 100 kilomètres ». Le modèle d'une Terre composée d'une croûte et d'un noyau solides séparés par une couche en fusion de faible épaisseur regroupait alors un certain nombre de partisans. Il avait le mérite de tenir compte de la contrainte apportée par les marées tout en conservant l'explication habituelle des phénomènes géologiques.

## Le mouvement eulérien

En 1891, un nouveau phénomène vint pourtant renforcer la thèse de la solidité. Euler, en 1765, avait montré que lorsque l'axe de rotation différait de l'axe d'inertie (axe dont la position est déterminée par la répartition des masses à l'intérieur de la Terre), le pôle de rotation se mettait spontanément à décrire à la surface du globe un cercle autour du pôle d'inertie. Pour une Terre indéformable, la période du mouvement (appelé mouvement eulérien) ne dépendait que de la répartition des masses internes et valait 305 jours. Ce mouvement n'était plus comme la précession, un déplacement de l'axe de rotation par rapport aux étoiles mais un mouvement par rapport à la matière terrestre elle-même. Et puisque la latitude d'un lieu est le complément de l'angle entre ce lieu et l'axe de rotation, ce mouvement du pôle à la surface de la Terre pouvait théoriquement être mis en évidence par des changements de latitude de tous les lieux terrestres. Cependant, ce mouvement était si faible que toutes les tentatives du début du XIX<sup>ème</sup> siècle pour repérer cette variation de 10 mois des latitudes ont échoué, ce qui amena les astronomes à penser que ce mouvement eulérien était finalement inexistant. Ce n'est qu'en 1888 que Küstner, cherchant alors à déterminer

## Le mouvement eulérien



Le mouvement eulérien est un mouvement relatif et spontané entre l'axe d'inertie et l'axe de rotation. Du fait de ce mouvement, le pôle décrit en 430 jours, à la surface de la Terre, une courbe approximativement circulaire qui s'inscrit dans un carré de 15 mètres de côté.

précisément la constante d'aberration, remarqua que la latitude de Berlin avait décliné au cours de l'année. Chandler put alors, grâce à une compilation plus importante de données, annoncer en 1891 que le mouvement du pôle de rotation s'observait clairement (le mouvement s'inscrivait à la surface de la Terre dans un carré d'une douzaine de mètres de côté), mais que sa période ne s'étendait pas sur les 10 mois prévus, mais sur 14 (il donna une période précise de 427 jours — aujourd'hui 430). Cette extension de 120 jours de la période théorique avait de quoi surprendre les scientifiques et cependant, moins d'un an après la découverte de Chandler, Newcomb en donnait l'explication théorique. La période de 305 jours correspondait à une Terre supposée indéformable. Newcomb faisait, lui, intervenir les océans et l'élasticité de la Terre. Le déplacement de l'axe de rotation par rapport à la matière terrestre avait en effet une conséquence importante : il changeait la distribution des forces centrifuges et impliquait que la Terre n'avait jamais une forme parfaitement adaptée. Les océans, par leur facilité de déplacement, réagissaient entièrement et la Terre, par une déformation élastique, se réajustait partiellement à la nouvelle rotation. Ces déplacements et ces déformations

perturbaient l'axe d'inertie (autour duquel tourne l'axe de rotation) et induisaient un rallongement de la période eulérienne. L'essentiel, que Newcomb avait parfaitement saisi, était que ce rallongement dépendait justement de la manière dont se déformait la Terre ; il devenait donc un nouveau moyen de déterminer la rigidité du globe. Newcomb arrivait alors à la conclusion que pour retrouver théoriquement la période de 427 jours, la Terre devait être légèrement plus rigide que l'acier ; il confirmait ainsi le résultat de Lord Kelvin quarante ans plus tard. En outre, Hough, un mathématicien anglais, montra, lorsqu'il reprit les travaux de Newcomb tout à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, qu'un éventuel noyau fluide à l'intérieur de la Terre devrait raccourcir la période du mouvement du pôle, ce qui rendait encore une fois impossible la présence d'une masse fluide d'une étendue trop considérable.

## Une solidité relative

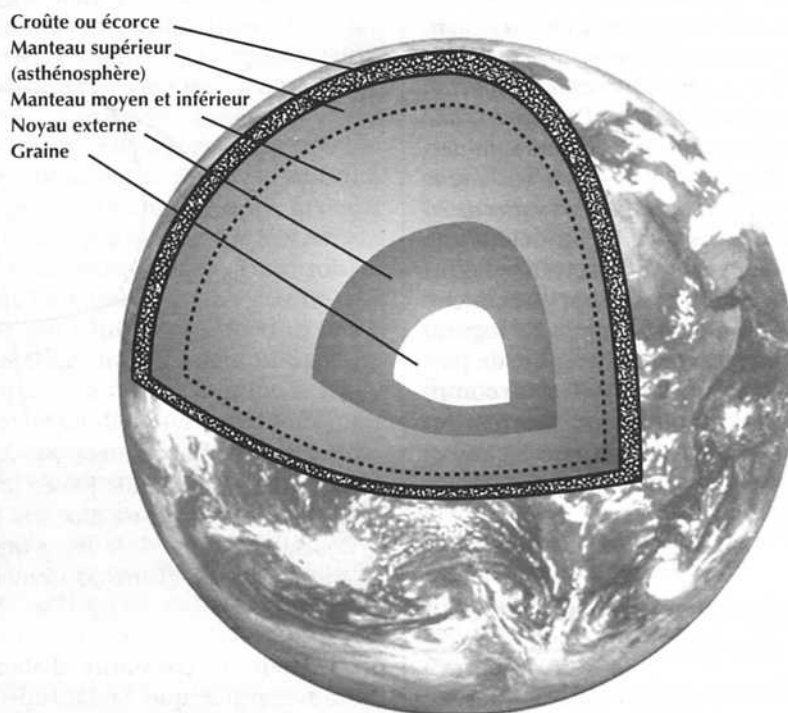
Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, les opinions de Lord Kelvin, appuyées par les conséquences du mouvement du pôle, s'étaient largement imposées : le globe devait être majoritairement solide. Cette conclusion fut



d'abord confirmée par le développement de la sismologie à cette même époque, puis partiellement infirmée. L'étude de la propagation des ondes émises par les tremblements de terre, était en effet un puissant moyen d'investigation de l'intérieur de notre planète. Par les réflexions que les ondes subissaient sur les différentes interfaces, la sismologie permettait de connaître la profondeur des principales discontinuités, et par la distinction de différentes ondes (ondes de compression P qui traversent les liquides aussi bien que les solides, et ondes de cisaillement S qui ne se propagent que dans les solides), elle pouvait connaître l'état de la matière interne. La sismologie a ainsi montré en premier lieu qu'une grande partie externe de la Terre était entièrement solide puisqu'elle transmettait parfaitement les ondes de cisaillement. Cette partie solide s'étendait de la surface jusqu'à 2900 km de profondeur et comprenait la croûte et le manteau. L'étude des ondes sismiques a ensuite permis de découvrir que sous le manteau solide, il existait une partie fluide qui ne permettait pas la propagation des ondes S. Cette partie fluide était le noyau externe (de 2900 à 5150 km de profondeur, soit 15% du volume de la Terre), qui lui-même renfermait encore une graine solide. La Terre était donc composée d'un centre solide (la graine), d'une grande enveloppe solide (la croûte et le manteau), séparés l'un de l'autre par une couche fluide (le noyau externe) ; modèle de la Terre qui ressemblait d'ailleurs étrangement à l'un de ceux proposés par Hopkins près d'un siècle auparavant...

La conclusion semblait donc définitive : la majeure partie de la Terre était solide puisqu'elle transmettait les ondes de cisaillement. Cette solidité, qui ne pouvait plus être niée, eut des conséquences importantes pour les géologues. Ceux-ci, ne pouvant plus postuler la présence d'une couche en fusion juste sous la croûte, furent en effet forcés d'abandonner leurs anciennes explications des volcans et de la formation des montagnes, et ainsi obligés de modifier profondément toutes leurs conceptions des principaux phénomènes géologiques. Cette notion de solidité restait cependant ambiguë. En effet, si la partie externe de la Terre était entièrement solide, comment expliquer les phénomènes isostatiques obser-

## Structure interne de la Terre



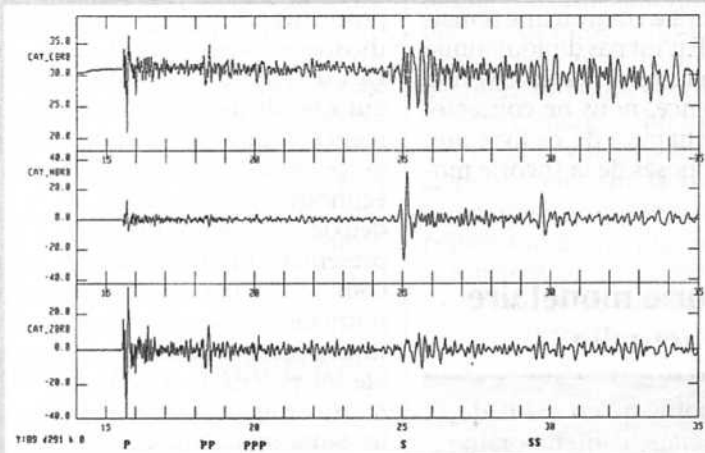
vés depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle ? Ces phénomènes correspondent aux réajustements de la croûte qui s'enfonce lorsqu'elle est surchargée (par exemple un delta qui reçoit les sédiments apportés par le fleuve), ou qui se soulève lorsqu'elle est allégée (remontée de la Scandinavie, suite à la fonte de la calotte polaire qui la recouvrait lors de la dernière glaciation du Würm, il y a 10.000 ans). Ces compensations suggéraient assez fortement un comportement fluide du substratum sous-jacent. Comment, également, concevoir des mouvements de convection dans un manteau solide, mouvements qui allaient pourtant être postulés après la proposition de la dérive des continents par Wegener en 1910 ? Ce paradoxe ne put être résolu qu'au cours du XX<sup>ème</sup> siècle. La notion essentielle à faire intervenir ici est celle du temps. En effet, le comportement de la Terre est complètement différent en fonction des durées qui sont impliquées. Ainsi, la Terre réagit comme un solide élastique pour des sollicitations brèves : elle transmet les ondes de ci-

saillement et se déforme élastiquement sous l'action des marées et des perturbations de son mouvement de rotation. La caractéristique de ces déformations élastiques est qu'elles sont réversibles, et disparaissent instantanément lorsque la contrainte extérieure est supprimée. D'un autre côté, lorsque les sollicitations qui affectent la Terre sont beaucoup plus lentes, le comportement de celle-ci change entièrement de nature et devient plastique. Comme un glacier qui, bien qu'apparemment rigide à l'échelle de la journée, se déforme et avance au cours des mois (on dit qu'il flue), la Terre peut « couler » lorsqu'elle est soumise à des excitations constantes pendant des durées très longues. Alors, elle se comporte comme un fluide visqueux. Ce comportement reste d'ailleurs vrai pour l'ensemble des corps solides, que ce soit l'acier ou le béton. Extrêmement rigides pour des durées courtes, ceux-ci fluent et s'adaptent comme des fluides visqueux lorsqu'ils sont sollicités par une contrainte longue. Cette déformation visqueuse est permanen-

## La sismologie

La sismologie est l'outil le plus adapté pour « voir » l'intérieur de la Terre. En effet, elle permet une véritable auscultation du globe, de la même manière que les rayons X et les ultrasons permettent une auscultation du corps humain. La sismologie repose sur l'étude de la propagation des ondes émises par les tremblements de terre. Ceux-ci nés de la rupture brutale d'une faille, sont en effet des ébranlements puissants qui rayonnent une grande énergie sous forme d'ondes élastiques capables de traverser toute la Terre, et même pour certaines, d'en faire plusieurs fois le tour. Ces ondes, qui correspondent à la propagation de déformations élastiques des matériaux terrestres, sont de plusieurs types : les ondes de volume qui traversent la Terre et qui comprennent les ondes P de compression-dilatation (la déformation élastique de l'onde se fait dans le même sens que la propagation, ces ondes traversent aussi bien les liquides que les solides), et les ondes S de cisaillement (la déformation élastique de l'onde se fait dans le plan perpendiculaire à la propagation ; ces ondes ne se transmettent pas dans les liquides), ainsi que les ondes de surface qui se propagent dans une région de faible profondeur et qui comprennent les ondes de Rayleigh et les ondes de Love. Chacune de ces différentes ondes a une vitesse qui lui est propre et qui dépend des propriétés élastiques ainsi que de la densité du milieu traversé. Les ondes, émises au même moment n'arrivent donc pas en même temps à la station d'enregistrement. En outre, les ondes de volume P et S ont des trajets complexes à l'intérieur de la Terre. Celles-ci sont en effet en tous points similaires à des rayons lumineux. Elles sont courbées vers la surface par l'augmentation des vitesses sismiques avec la profondeur qui fait varier l'indice de réfraction. Elles subissent également à chaque discontinuité brutale du milieu des réflexions et réfractions qui multiplient les trajets possibles.

Finalement, le temps de parcours d'une onde depuis le foyer du tremblement de terre jusqu'à une station, où elle est enregistrée par un sismographe qui mesure les vibrations du sol induites, dépend de la nature de celle-ci (P, S, Rayleigh ou Love), des propriétés du milieu traversé et du nombre de réflexions et réfractions subies. Un sismogramme montre ainsi différentes phases qui correspondent aux arrivées successives des différents trains d'onde. C'est à partir de l'identification et du temps d'arrivée de ces différentes phases, et de la reconstruction des trajets parcourus que le sismologue peut élaborer son modèle de la Terre, c'est-à-dire déterminer la profondeur des différentes discontinuités et établir les variations des paramètres élastiques et de la densité des matériaux terrestres avec la profondeur.



Sismogramme du tremblement de terre de Loma Prieta (au sud de San Francisco), le 18 octobre 1989, enregistré à la station Géoscope de Cayenne (Guyane). De haut en bas, composante horizontale E-O, composante horizontale N-S, composante verticale. Le premier train d'onde, bien visible, à gauche, sur les trois composantes, correspond aux ondes P, longitudinales ; arrivent ensuite les ondes PP (réfléchies une fois sur la surface) et les ondes PPP (réfléchies deux fois), moins visibles, puis, de nouveau bien visibles, les ondes S, transversales.

(in Poirier, Les profondeurs de la Terre, Masson)

te, irréversible, et elle se poursuit tant que la contrainte extérieure agit. La viscosité d'un corps ne limite pas en effet l'ampleur de la déformation, elle détermine la vitesse de l'écoulement (un corps tombe plus vite dans l'eau que dans le miel). Pour la Terre, aux constantes de temps où surviennent les mouvements isostatiques (dizaine de milliers d'années) ou les mouvements de convection (dizaine de millions d'années), le matériau solide à l'échelle de temps humaine, peut fluier et se comporter comme s'il était fluide (c'est bien sûr le « comme si » qui importe). De la même manière, aux constantes de temps de la rotation, la Terre, tout en étant par-

faitement rigide, a pu s'adapter entièrement et acquérir la même figure que celle que prendrait une masse entièrement fluide, sans pour autant avoir eu besoin de passer par une origine ignée.

Le comportement de la Terre est donc multiple et déconcertant : solide à l'échelle humaine, il devient fluide pour des temps géologiques. La solidité affirmée avec tant de vigueur par Lord Kelvin n'est ainsi relative qu'à la durée que l'on prends en compte. La controverse sur la fluidité de la Terre, qui anima tant les scientifiques au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle, s'estompe donc à la lueur des connaissances actuelles : les différents points

ont cessé de s'opposer les uns aux autres pour se compléter ; ce ne sont que les facettes multiples d'un comportement complexe. Cette controverse montre cependant les difficultés de l'investigation de l'intérieur de la Terre et les astuces déployées pour sonder les profondeurs de notre planète ; elle met également en évidence un écueil fondamental lié à des échelles temporelles et spatiales qui n'ont plus rien de commun avec l'expérience courante : comment concevoir le comportement global de la Terre, les mouvements de convection, la formation des montagnes, alors que ces phénomènes ne correspondant plus avec l'échelle humaine ? ■