

Fig. 2. Les variations à courtes échelles spatiales du champ de gravité terrestre : carte représentant les anomalies de gravité à courtes longueurs d'onde, déduites de la mesure des ondulations de la surface de la mer par les satellites altimétriques. Cette carte, véritable image des fonds sous-marins, représente la signature gravitationnelle des grandes unités lithosphériques de la tectonique des plaques : dorsales, chaînes volcaniques sous-marines, zones de fracture et zones de subduction, etc.

▶ dant, la couverture de ces mesures est restée très inhomogène à cause des vastes étendues inaccessibles (déserts, montagnes, océans de l'hémisphère sud) ou pour des raisons de classification. Ce sont les satellites artificiels qui ont offert la première vision globale du champ de gravité terrestre. Depuis trois décennies, les variations à grande échelle du champ de gravité sont déterminées à partir de la mesure des pertur-

bations créées par ce champ sur les trajectoires des satellites. Depuis une dizaine d'années, une nouvelle technique a été développée : c'est l'altimétrie spatiale qui permet, au moyen d'un radar embarqué sur le satellite, de cartographier directement les ondulations à courtes longueurs d'onde de la surface de la mer, donc du géoïde. Cette technique cependant ne donne pas accès au champ de gravité sur les continents.

Bien qu'historiquement les variations de la gravité aient été mesurées d'abord sur les continents, c'est là qu'à présent elles demeurent le plus mal connues.

■ Anny Cazenave, ingénieur au Centre national d'études spatiales, Unité « dynamique terrestre et planétaire » (UPR 234 CNRS), 18, avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex.

Modéliser la machine thermique Terre

La modélisation numérique prend peu à peu le relais de l'expérimentation dans l'étude de la convection dans le manteau.

■ Henri-Claude Nataf

Qu'est-ce qui pousse les plaques, dont les dimensions dépassent parfois 10 000 km, à se déplacer à des vitesses de plusieurs centimètres par an à la surface de la Terre ? Il est maintenant bien établi que ces mouvements, qui façonnent le visage de notre planète, sont une des mani-

festations de la convection du manteau terrestre. Pour évacuer la chaleur produite en son sein par les éléments radioactifs (U, Th, K), la Terre s'organise en cellules convectives, constituées de courants ascendants chauds et descendants froids, qui transportent la chaleur avec une efficacité 10 à 30 fois plus grande que la conduction thermique seule. Dans ce manteau, dont la viscosité est plus d'un million de fois celle de la glace,

les mouvements sont très lents mais suffisent à évacuer quelque 40 TW ($T = \text{Tera} = 10^{12}$). Les plaques apparaissent alors comme la couche limite thermique supérieure du manteau en convection : le matériau chaud monte jusqu'à la surface aux dorsales océaniques, s'en éloigne et se refroidit lentement, formant une plaque qui s'épaissit avec l'âge. Après un voyage de quelque 100 millions d'années, il redescend dans le manteau aux zones de subduction.

La complémentarité des approches

Bien que proposée dès les années 1930, l'hypothèse de la convection du manteau terrestre ne s'est imposée que dans les années 1960 en apportant un cadre dynamique à la « tectonique des plaques » alors en plein essor. Les modèles convectifs du manteau permettent

de rendre compte de phénomènes aussi variés que l'approfondissement des fonds marins avec l'âge de la plaque, la distribution du flux de chaleur, les anomalies du géoïde, l'homogénéité isotopique des basaltes océaniques, etc. Et pourtant d'énormes points d'interrogation demeurent. Quelle est la géométrie de la convection à l'intérieur du manteau ? Y a-t-il deux couches superposées convectant séparément comme le proposent certains géochimistes, ou bien les plaques plongent-elles jusqu'au noyau comme le pensent certains sismologues ? Quelles relations existent entre les « points chauds » et la circulation convective ? On devine à travers ces questions que l'étude de la convection terrestre est une discipline avant tout à l'écoute des autres branches des Sciences de la Terre : géologie, géochimie, géophysique. Elle a néanmoins ses propres techniques, numériques, théoriques et expérimentales.

L'importance de la rhéologie

Prenons l'exemple de la rhéologie : la viscosité des silicates qui constituent le manteau terrestre dépend fortement de la température, de la pression... Il était donc important de connaître les conséquences de ces variations, qui sont souvent de plusieurs ordres de grandeur, sur l'organisation de la convection. L'influence de la variation de viscosité avec la température se prête bien à la modélisation expérimentale. On voit ci-contre (Fig. 1) le champ de gradient de température observé en laboratoire dans un liquide en convection lorsque la viscosité en haut (froid) est environ 1 000 fois plus grande qu'en bas (chaud). La structure obtenue est très différente de celle observée dans un liquide dont la viscosité est constante. On note la formation d'une sorte de couvercle épais et très visqueux en haut, analogue de la lithosphère qui forme les plaques. La variation de viscosité avec la température affecte aussi grandement l'évolution du système convectif. Elle joue le rôle de régulateur de température, ce qui explique que la température du manteau terrestre n'ait décliné que de 200 à 300°C en 4 milliards d'années, alors que la production thermique radiogénique chutait d'un facteur quatre. ▶

Modelling the Earth heat engine - Thermal convection is responsible for the slow movement of tectonic plates over the surface of the Earth. Numerical and experimental studies have demonstrated the primordial role of rheology. Numerous questions remain, particularly on the stratification of convection and on the role of chemical heterogeneities.

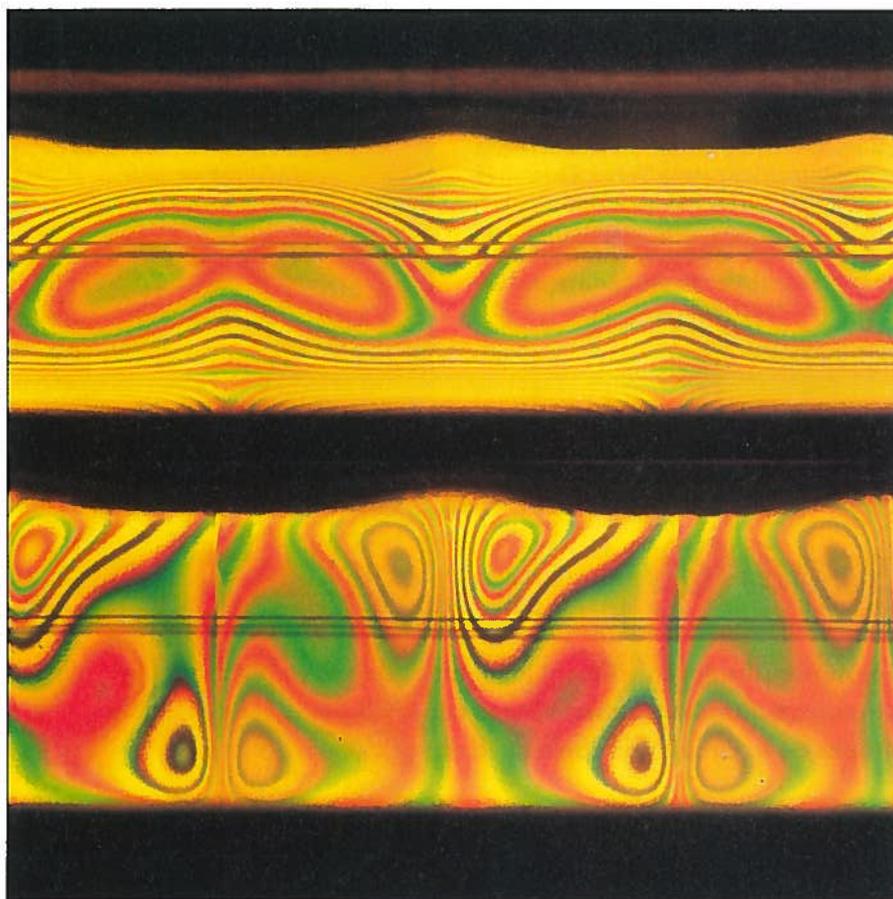


Fig. 1. Image de la convection dans un liquide dont la viscosité diminue très fortement avec la température. Le rapport de viscosité atteint 1 000 entre le haut (porté à -16°C) et le bas (66°C). Les lignes d'égal gradient de température sont visualisées dans un plan vertical grâce à une technique interférométrique (gradient vertical en haut, horizontal en bas). Expérience réalisée par Franck Richter (Chicago) et l'auteur.

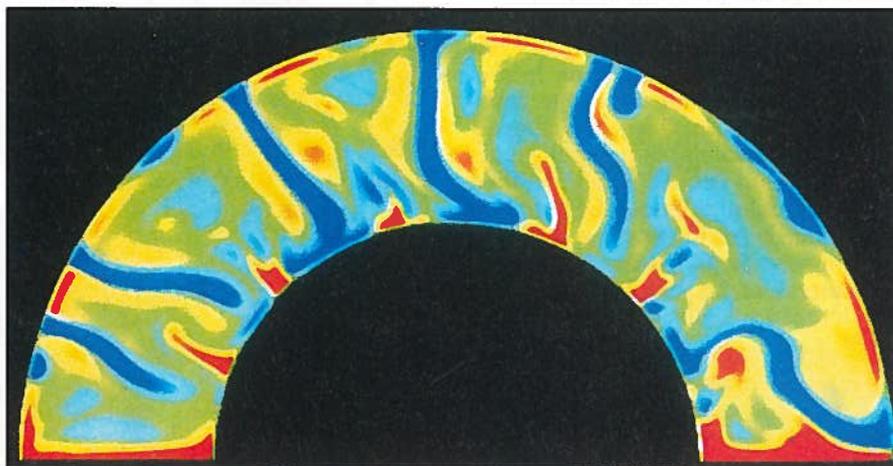


Fig. 2. Hétérogénéités latérales de température dans une coque sphérique. Les variations de température ont été traduites en variations de vitesses sismiques, afin de les comparer aux images tomographiques du manteau. L'inclusion de la compressibilité et du chauffage interne permet d'obtenir des amplitudes de variation de $+ ou -5\%$, en bon accord avec les observations. Calcul effectué par Philippe Machetel (GRGS, Toulouse) et David Yuen (Minneapolis).



► Et pourtant, la Terre est ronde...

Grâce au développement des gros ordinateurs, la modélisation numérique est maintenant possible en tenant compte de la sphéricité de la Terre. On voit ci-contre (Fig. 2) le champ de température calculé dans une coque sphérique, en tenant compte de la compressibilité et de la présence de chauffage interne. Les

modèles ainsi calculés sont comparés aux images tomographiques du manteau. Un des atouts essentiels de la modélisation en sphérique est en effet de permettre une comparaison directe entre les prédictions et les diverses observables : géoïde, tomographie, vitesses des plaques, etc.

On n'aura abordé ici que quelques exemples des progrès récents dans la compréhension de la dynamique du

manteau terrestre. Il reste beaucoup de chemin à parcourir avant d'arriver à un modèle qui réconcilie les vues, souvent fort contrastées, des spécialistes des différentes disciplines des Sciences de la Terre.

■ Henri-Claude Nataf, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de géologie (URA 1316 CNRS), Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05.

La convection dans le manteau supérieur

Les matériaux qui constituent le manteau supérieur du globe ont enregistré dans leurs assemblages minéralogiques les principales étapes de la circulation convective dans l'asthénosphère.

■ Jacques Kornprobst

Le manteau supérieur du globe terrestre est situé sous la croûte continentale et sous la croûte océanique. Il peut cependant apparaître en surface : en enclaves dans des basaltes, ou sous forme de massifs (1 à 10^3 km^3) aux limites des plaques lithosphériques. Il est essentiellement constitué de péridotites (olivine + pyroxènes), riches en magnésium et en silicium, avec des proportions réduites de fer, calcium et aluminium.

La composition minéralogique du manteau supérieur varie selon la profondeur : une pression croissante impose des structures de plus en plus compactes et des assemblages minéralogiques de plus en plus denses. A des pressions inférieures à 1 giga pascal (GPa) (moins de 30 km de profondeur), le manteau est composé de péridotites à plagioclase ; entre 1 et 2 GPa, il est formé de péridotites à spinelle, et de péridotites à

grenat au-delà de 2 GPa. Sous des pressions élevées (10 GPa), l'olivine acquiert un réseau cristallin cubique comparable à celui du spinelle. Dans ces conditions, les pyroxènes développent des structures compactes du type péroovskite ou grenat : la nature minéralogique du manteau n'a plus rien de comparable à ce qu'il est possible d'observer en surface. Sous des pressions plus modérées (5 GPa), un élément rare mais

présent dans le manteau supérieur, le carbone, subit une transformation de phase caractéristique : graphite \rightarrow diamant.

La mémoire du manteau supérieur

Impliqués dans la dynamique convective de la tectonique des plaques, les matériaux qui constituent le manteau supérieur subissent au cours du temps d'importantes variations de pression et de température qui sont la cause de diverses transitions de phase. Celles de ces transitions dont la cinétique est suffisamment lente peuvent être observées dans les affleurements du manteau supérieur, et permettent de caractériser différentes étapes de l'évolution géodynamique de cette unité.

Il est fréquent d'observer la transition péridotite à spinelle \rightarrow péridotite à grenat (Fig. 1). Ce comportement « pro-

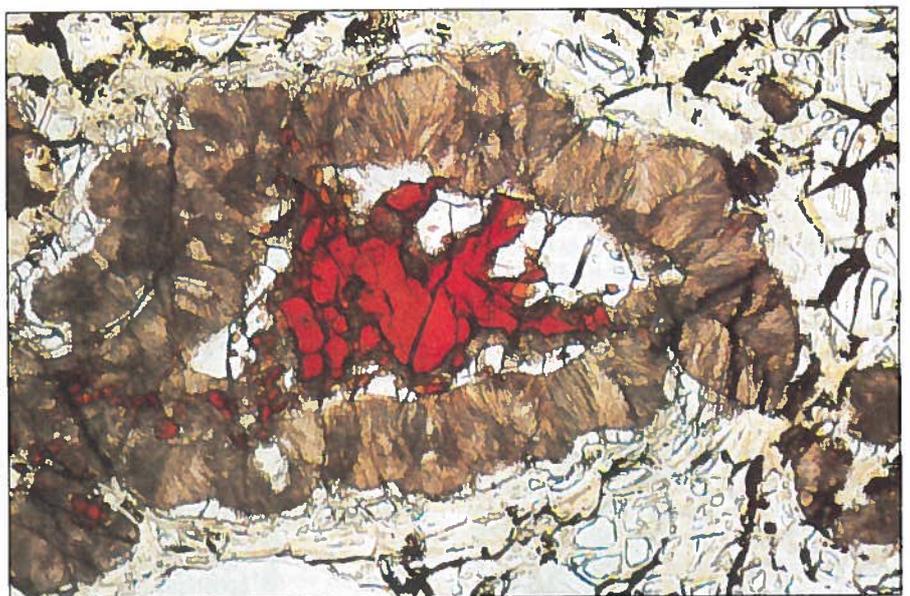


Fig. 1. La transition prograde péridotite à spinelle \rightarrow péridotite à grenat. En réponse à une augmentation de pression, le spinelle chromifère rouge est corrodé et remplacé par un grenat incolore. Longueur de la photo : 2 mm. (Cliché V. Gardien).

Convection in the upper mantle - Phase transitions observed in peridotites from the upper mantle of the Earth show the existence of prograde (increase in pressure) or retrograde (decreases in pressure and temperature) changes in time. These transitions demonstrate the effects of subduction or lithospheric thinning, and are in agreement with models of mantle convection.