

Préface

Yanick RICARD

*LGL TPE, CNRS, Université de Lyon, ENS de Lyon,
Université Lyon 1, Lyon, France*

Le manteau silicaté constitue l'essentiel du volume de la Terre (83 %) et de sa masse (66 %). Son immense inertie thermique contrôle le lent refroidissement de la planète et maintient la tectonique des plaques depuis au moins 2 milliards d'années et peut-être dès la solidification de la surface, quelques centaines de millions d'années après la formation de la Terre, il y a 4,54 milliards d'années. Les causes de la tectonique des plaques, qui n'a été observée sur aucune des planètes et satellites du système solaire, restent encore largement mystérieuses.

Si les propriétés moyennes de la Terre et du manteau ont été discutées dès la conception de la mécanique newtonienne (Cavendish (1731-1810), Laplace (1749-1827)), il a fallu attendre le début du XX^e siècle pour que les pères et mères de la sismologie (Oldham (1858-1936), Gutenberg (1889-1960), Lehmann (1888-1993)) proposent un modèle radial de ses propriétés. L'intérêt des physiciens pour l'étude de l'intérieur de la Terre n'a pas eu que des aspects positifs. La détermination du caractère solide du manteau (où des ondes de cisaillement peuvent se propager), jointe à la méconnaissance des phénomènes de convection et de radioactivité (découverte à la toute fin du XIX^e siècle par Becquerel (1852-1903)), s'opposait au concept de « dérive des continents » et aux durées géologiques très longues que géographes et géologues présentaient (de l'ordre du milliard d'années). Ce n'est finalement que dans les années 1940 que les concepts de la mécanique des fluides en convection (Bénard (1874-1939), Rayleigh (1842-1919)) furent appliqués au manteau avec les travaux de Hales (1911-2006), Pekeris (1908-1993), Hess (1906-1969) ou Runcorn (1922-1995), et que la géochimie isotopique put dater les événements géologiques (Holmes (1890-1965)) et

confirmer la très longue histoire de notre planète. Enfin, il fallut attendre la fin des années 1960 pour que les relevés bathymétriques et magnétiques des fonds océaniques permettent l'établissement de la tectonique des plaques avec les travaux de Vine et Matthews, Wilson, Morgan, McKenzie et Le Pichon. Il n'y a donc qu'une soixantaine d'années que le manteau n'est plus vu comme un objet statique, mais comme un fluide s'écoulant lentement et entraînant des plaques tectoniques à sa surface.

Si le rôle de la convection dans la dynamique du manteau était admis et illustré par différents modèles numériques de convection, la confrontation directe avec les observations était difficile tant que la structure tri-dimensionnelle du manteau était inconnue. C'est dans les années 1980 que les sismologues ont commencé à visualiser les hétérogénéités mantelliques en trois dimensions. Simultanément, la détermination du champ de gravité terrestre déduite de l'étude de la trajectoire des satellites artificiels a permis de cartographier le champ de gravité induit par les anomalies de densité qui contrôlent la convection. Les anomalies de gravité relient ainsi la mécanique des fluides en convection et l'observation sismologique du manteau. Enfin, la possibilité des simulations numériques de proposer des modèles d'évolution géologique a permis d'intégrer la dimension temporelle des observations ; la paléotectonique et la sédimentologie qui documentent les mouvements horizontaux et verticaux de la Terre fournissent des indices et des contraintes aux modèles de dynamique mantellique. Ces comparaisons entre tomographie, géodynamique et géologie constituent toujours un domaine très actif. Dans les mêmes années 1980, le raffinement des techniques de spectrométrie de masse aboutissait à une classification des sources de matériaux mantelliques en un grand nombre de « réservoirs » de compositions isotopiques ou élémentaires subtilement différentes. Si la géochimie a été si précise dans la détermination de nombreux réservoirs, elle n'avait aucun moyen de contraindre la géométrie de ceux-ci. Cette vision de la géochimie de réservoirs s'est étiolée avec l'amélioration des images tomographiques et des modèles de convection. Bien qu'une certaine résistance aux mouvements verticaux dans le manteau soit observée à la transition entre le manteau supérieur et le manteau inférieur ou, pour d'autres auteurs, de façon plus diffuse entre 600 à 1 200 km de profondeur, le manteau ne peut pas être décrit par des réservoirs aux frontières plus ou moins imperméables. Il reste cependant de ces études géochimiques deux idées majeures : les indications du recyclage de matériaux qui ont été en surface sont observées dans toutes les sources magmatiques, et les volcans de points chauds sont liés à une dynamique et des sources différentes de celles des basaltes de dorsales.

Dans les vingt dernières années, la recherche sur le manteau a tout à la fois amélioré continument ses méthodes et a réussi à aborder son objet avec un nouveau regard. Dans l'amélioration des méthodes et outils, on notera bien sûr les effets des gigantesques avancés de l'informatique qui permettent de construire des modèles basés sur des millions de données, reconstruisant le signal sismique dans de larges gammes de

fréquences. Le progrès informatique a aussi démocratisé les codes de convection et les simulations de convection ont su prendre en compte un grand nombre des spécificités du manteau : géométrie sphérique, grande vigueur de convection, complexité de la loi rhéologique, génération autoconsistante de plaques tectoniques, etc. Le calcul *ab initio* (une modélisation chimique basée sur la mécanique quantique) est également devenu une nouvelle méthode d'exploration de la minéralogie. Les progrès technologiques ont aussi permis d'étudier beaucoup plus finement la minéralogie à très hautes température et pression et des phénomènes rapides (changement de phases, atténuation sismique, percolation de fluides, etc.) peuvent maintenant être suivis « en direct » à l'échelle du cristal.

De nouveaux axes sont apparus avec leurs nouvelles problématiques : la différenciation de la Terre lors de son accréation, la nature du manteau profond, la prise en compte du rôle de l'extraction du magma dans la compréhension du signal géochimique et enfin les prémisses d'une géodynamique extrasolaire. Dans ces différents domaines, sismologues, géochimistes, minéralogistes, astrophysiciens et géodynamiciens ont dû croiser leurs idées et leurs concepts, et ces quatre axes de recherche se sont mutuellement hybridés.

La géochimie, augmentant toujours la précision de ses mesures, a pu mettre en évidence des fractionnements très primitifs du manteau terrestre, ce qui a totalement remis en cause l'idée d'un manteau primordial homogène. Le manteau n'est ni constitué de réservoirs homogènes inégalement échantillonnés par des volcans ou des dorsales, ni le résultat du mélange d'une lithosphère océanique extraite d'un manteau homogène. La minéralogie expérimentale suggère que la formation du noyau s'est effectuée dans une terre primitive très largement fondue où manteau et noyau se sont équilibrés à des profondeurs correspondant à celles du manteau moyen. Enfin, l'observation de fines lentilles de silicates fondus à la surface du noyau, associée à deux larges zones du manteau où les propriétés sismologiques semblent indiquer des variations compositionnelles, a aussi changé notre vision du manteau. Comment s'est formé le manteau ? Quel était son état après la séparation du noyau ? Les larges provinces abyssales de propriétés anormales et les lentilles fondues sont-elles des fossiles de la cristallisation du manteau ? Les premiers temps du manteau peuvent nous donner la clef de son état actuel.

Les progrès de la minéralogie expérimentale et *ab initio* qui ont précisé les conditions d'équilibre de la formation du noyau ont aussi changé notre compréhension du manteau profond. Alors que les changements de phase des silicates semblaient s'effectuer dans la zone de transition (entre 400 et 700 km de profondeur) et que la phase dite bridgmanite était considérée comme la phase ultime, la plus compacte, des silicates, une nouvelle phase a été proposée. Cette transformation s'effectue alors qu'un autre changement, celui de l'état de spin du fer, affecte l'équilibre oxyde-pérovskite.

L'ensemble de ces changements se produit dans le manteau profond à des pressions proches de celle de la frontière du noyau où la température est proche de la température de fusion des silicates. Cela rend la zone surmontant le noyau extrêmement complexe. Bien sûr, cette problématique du manteau actuel rejoint celle du manteau primitif et de l'évolution du manteau depuis sa formation.

Si la description du manteau en termes de réservoirs individualisés a perdu de sa pertinence, c'est aussi parce que les sources des magmas ont cessé d'être vues comme des milieux homogènes. Les observations à différentes échelles comme les modélisations des hétérogénéités entraînées par la convection suggèrent un manteau extrêmement hétérogène, un « gâteau marbré » où les variabilités chimique et isotopique s'expriment jusqu'à l'échelle du grain. Ainsi, le signal isotopique observé en surface n'est plus directement celui d'une source homogène, mais le produit d'une dynamique de fusion partielle dont la modélisation doit prendre en compte la complexité chimique et toute la dynamique multiphase de l'extraction du magma.

Enfin, il n'y a pas de vraie compréhension scientifique lorsqu'un seul objet est expliqué. Comprendre l'évolution de la seule Terre n'assure pas que les mécanismes géologiques aient été compris. La planétologie comparée, la comparaison de la Terre avec les autres planètes et satellites solides, la comparaison de celles-ci et des satellites de glace et d'océans, et enfin la comparaison des planètes de notre Système Solaire et celles des planètes extraterrestres ouvrent de nouvelles perspectives scientifiques et devront, entre autres, résoudre une question majeure : quelles sont les conditions qui conduisent à la tectonique des plaques ?