

LE MANTEAU

Le casse-tête des roches visqueuses

À la fois solide et animé de mouvements, le manteau terrestre défie l'entendement ! Mais grâce à l'étude de minéraux soumis à de très fortes pressions, les scientifiques commencent à en percer les mystères.

PAR CORALINE LOISEAU

A lors que la graine centrale est à 5 200 km sous nos pieds et le noyau liquide à 2 900 km, le manteau n'est séparé de nous que par la fine croûte terrestre : 40 km. Quarante petits kilomètres qui résistent à toutes les tentatives de percement. Il faut dire que, en profondeur, le kilomètre s'acquiert chèrement. La plus profonde mine du monde, celle de TauTona, en Afrique du Sud, ne descend qu'à 3,9 km. Et le forage record de Kola, en Russie, s'arrête à - 12 km. Nous sommes donc loin, très loin de toucher les premiers mètres du manteau, cette couche qui représente rien de moins que 80 % du volume de la planète ! Et qui, surtout, donne naissance aux spectaculaires phénomènes thermiques et géologiques qui animent toute la surface de la Terre. « *Le manteau reste inaccessible, se résigne Pierre Cartigny, chercheur à l'Institut de physique du globe de Paris. Tout ce que nous en connaissons, nous ne l'avons déduit qu'à partir de quelques échantillons, d'observations indirectes ou de calculs.* »

DE -40 À -2 900 km

Le manteau



Cette épaisse couche de roche, dont l'olivine (photo) est un minéral majeur, représente 80 % du volume de la planète.

Sa structure

À commencer par sa composition chimique, déterminante pour percer ses mystères. Pour la reconstituer, les chercheurs ne se sont pas tournés vers le centre de la Terre, mais vers le ciel. Notre planète ayant été formée par l'agrégation de météorites primitives, la « recette » de la Terre est donc nécessairement la même que la leur. Du moins, les ingrédients y sont-ils présents en mêmes proportions. Or, on sait que les éléments les plus lourds, le fer et le nickel, ont coulé vers le centre de la Terre pour former la graine et le noyau. « Quant à la croûte, elle ne représente qu'une proportion négligeable de la planète. Il est donc possible de déduire la composition du manteau, qui se résume majoritairement à six éléments : de l'oxygène, du silicium, du magnésium, 10 % du fer terrestre (celui qui n'a pas coulé jusqu'au noyau), de l'aluminium et du calcium », énumère Patrick Cordier, chercheur à l'université de Lille.

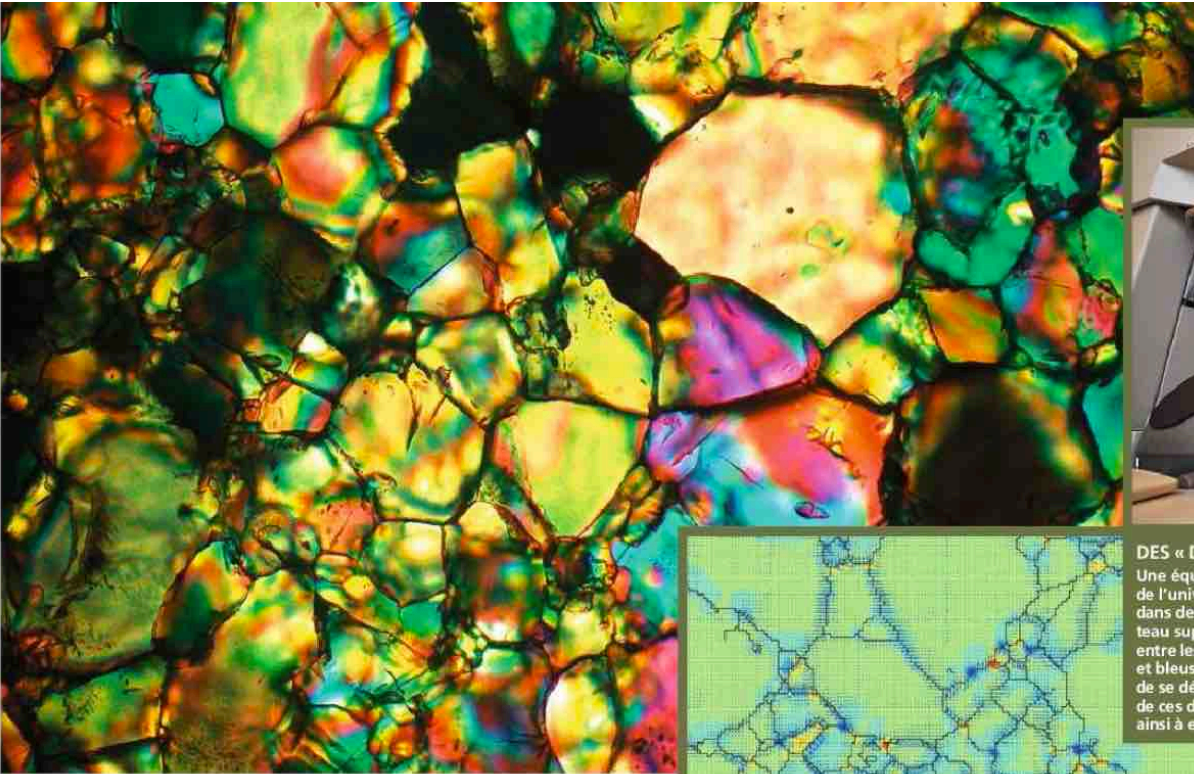
DES MOUVEMENTS DE CONVECTION

En plus de ces atomes principaux, on trouve à l'état de traces quelques éléments radioactifs (uranium, potassium, thorium) qui, malgré leur faible quantité, jouent un rôle primordial : ils émettent la majorité de la chaleur qui met en mouvement le manteau. Car le manteau bouge... En observant la propagation des ondes sismiques, dont on sait que la vitesse est plus importante dans la matière froide que dans la matière chaude, les chercheurs ont en effet découvert qu'il est animé de mouvements de convection, comme ceux qui agitent un liquide que l'on chauffe : la matière chaude remonte et la matière froide plonge dans ses profondeurs, où elle se réchauffe à nouveau. C'est ce flux de matière juste sous la croûte qui est à l'origine de la tectonique des plaques.

Pourtant, le manteau n'est pas liquide, mais en immense majorité solide ! Preuve en est que les ondes

Le manteau n'est pas liquide, mais il est néanmoins visqueux : il résiste et se meut petit à petit, comme de la pâte à tartiner

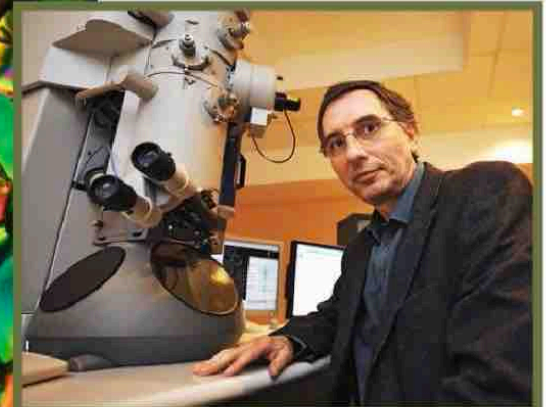
sismiques de type S – qui ne peuvent se propager dans les milieux liquides – y circulent sans problème. Autre preuve, fournie depuis la surface : les satellites ont révélé des déplacements verticaux du sol en plusieurs points du globe. Ainsi, au nord du Canada, au Nunavut, un relief en cuvette est en train de remonter et de s'aplanir, au rythme de un centimètre par an. « Lors des dernières glaciations, d'énormes glaciers se sont formés, raconte Patrick Cordier. Ces masses de glace ont appuyé sur la croûte terrestre, la faisant fléchir. Il y a cinq mille ans, toute cette glace



avait déjà fondu, mais elle a laissé l'empreinte de son passage sous forme de vastes dépressions du sol. » Si le manteau était liquide, la croûte, connectée au manteau, serait revenue en place immédiatement et non lentement comme on l'observe encore actuellement. « Le manteau n'est donc pas liquide. Mais il est néanmoins visqueux : il résiste et se meut petit à petit, un peu comme de la pâte à tartiner », ajoute le scientifique. Ces observations ont permis aux scientifiques de calculer la viscosité du manteau depuis longtemps, du moins dans sa partie superficielle, juste sous la croûte. Quant à savoir ce qu'il en

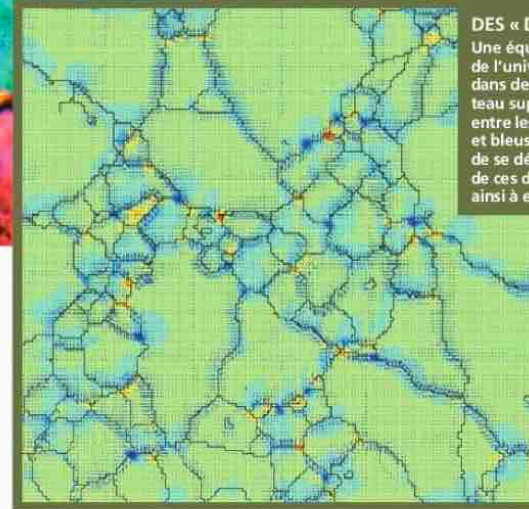
est plus loin sous terre, la question reste entière... « Pour que cela corresponde aux modèles théoriques qu'ils ont développés, les chercheurs supposent que le manteau devient de plus en plus visqueux, et donc moins déformable, avec la profondeur. Mais cela reste en débat », reconnaît Patrick Cordier.

Difficile, pour le profane, d'imaginer un amas de roche compacte animée de mouvements internes... En fait, quand on descend vers le centre de la Terre, la pression augmente, ce qui change les propriétés physiques des matériaux. Résultat : si les éléments



DES « DÉFAUTS » QUI RENDENT LA ROCHE DÉFORMABLE

Une équipe de chercheurs conduite par Patrick Cordier (ci-dessus), de l'université de Lille, a repéré en 2014 des « désinclinaisons » dans des cristaux d'olivine (à g.), le constituant principal du manteau supérieur. Ces rotations survenant au niveau de la jointure entre les grains, et par paire complémentaire (points rouges et bleus sur la modélisation ci-contre), permettraient à l'olivine de se déformer dans toutes les directions. La découverte de ces défauts de cristallisation, jusque-là inconnus, contribue ainsi à expliquer la plasticité du manteau.



chimiques qui composent le manteau restent les mêmes, ils s'associent différemment et la roche adopte différentes « phases minérales » (voir p. 66). Juste sous la croûte continentale, à environ 30 km sous terre, alors que la partie la plus haute du manteau est déjà soumise à environ 10000 fois la pression atmosphérique, c'est l'olivine qui domine. À 410 km de profondeur, elle se transforme en wadsleyite. Un peu plus bas, à 520 km de profondeur, la wadsleyite devient ringwoodite. À 670 km, à la limite entre le manteau supérieur et le manteau inférieur, alors que la pression atteint 250000 fois la pression atmosphérique, apparaissent la bridgmanite et la magnésio-wüstite. Cette ribambelle de roches aux noms curieux, les chercheurs ne les ont jamais observées directement. Mais connaissant la composition chimique du manteau, ils ont pu fabriquer des roches

de synthèse et regarder comment elles changent de structure lorsqu'on leur applique les conditions de pression et température qui règnent au cœur de la Terre. « Entre les années 1950 et 2000, le principal chantier géologique concernant l'intérieur de la Terre a consisté à établir des modèles minéralogiques qui prévoient par quelles phases minérales passe le manteau avec la profondeur », résume Patrick Cordier.

Le manteau terrestre s'organiserait donc *grosso modo* en couches concentriques de phases minérales (voir page suivante). Avec, parmi les minéraux majeurs, l'olivine, la bridgmanite, la ringwoodite, etc. Mais comment ces roches solides peuvent-elles être malléables et constituer un manteau visqueux ? Elles ne ressemblent pourtant *a priori* en rien à la pâte à tartiner qu'évoque Patrick Cordier : elles sont composées de cristaux, c'est-à-dire d'empilements d'atomes très ordonnés. Une déformation devrait donc rompre la structure du cristal et le cristal lui-même, le transformant en un amas désordonné. Or, la structure des cristaux est préservée... Un paradoxe que Patrick Cordier et son équipe se sont employés à résoudre par modélisation numérique (ci-dessus) à l'échelle atomique : « Dans les cristaux, certains atomes sont mal empliés. Ces défauts peuvent être de plusieurs types : des dislocations, comme on le savait déjà, mais aussi des désinclinaisons que nous avons mises en évidence l'année dernière. Ces

défauts permettent à la roche de se déformer dans toutes les directions, tout en conservant une structure cristalline. » Les roches du manteau sont ainsi solides et plastiques à la fois.

Grâce à leurs expériences, les chercheurs ont donc une idée de l'organisation du manteau. Mais ils ont aussi parfois l'occasion d'analyser d'authentiques échantillons pour confirmer leurs modèles... ou les ébranler ! Il arrive, en effet, que le magma arrache lors de sa remontée vers les volcans, des morceaux du manteau et les ramène à la surface. Parmi ces fragments (appelés xénolites) incrustés dans la roche volcanique refroidie, on trouve couramment l'olivine, ce qui confirme la présence de cette forme minérale dans la partie du manteau la plus proche de nous.

DE LA BRIDGMANITE TOMBÉE DU CIEL

Quant à la bridgmanite, qui constitue près de la moitié du manteau, les chercheurs n'ont eu accès à un échantillon naturel que l'année dernière, dans une météorite (voir S&V de mars 2015). Car il est bien plus facile et courant d'obtenir des échantillons venus de l'espace que du cœur de notre planète ! Il faut dire que, passée une certaine profondeur, voir un minéral refaire surface sans que sa composition n'ait été affectée par les gigantesques contrastes de pression et de température subis au cours du voyage est peu probable. Mais pas impossible ! L'année dernière, un minuscule fragment de ringwoodite, qui occupe selon les modèles 60 % du manteau entre 520 et 660 km de profondeur, est parvenu entre les mains des chercheurs. Cette forme minérale est instable aux conditions de température et de pression atmosphériques. Il était donc improbable d'en obtenir un échantillon un jour, mais celle-ci était abritée dans



DE PRÉCIEUX COMPOSANTS DU MANTEAU

En 2014, des traces de bridgmanite (1) ont été décelées dans une météorite connue pour avoir subi de monstrueux pics de pression (qui ont conduit à la formation du minéral). Protégé par un diamant, un micro-fragment de ringwoodite (2) a, lui, réussi à remonter intact à la surface. Pour les scientifiques, ces rares échantillons naturels des minéraux majeurs du manteau sont une mine d'informations inestimable.

Et, en d'autres endroits, c'est le manteau solide qui fond pour donner du magma. Longtemps, les scientifiques ont pensé que les conditions de pression et de température pour déclencher une fusion de la roche n'étaient réunies que dans la plus haute partie du manteau supérieur, et que le magma, moins dense que les roches, remontait alors vers la surface pour former les volcans. Mais les ondes sismiques ont révélé des poches de matière liquide bien plus loin sous nos pieds, dans le manteau supérieur profond.

DES MAGMAS PIÉGÉS EN PROFONDEUR ?

Serait-il donc possible d'avoir des magmas qui ne remontent pas vers la croûte ? C'est l'avis de Chrystèle Sanloup, de l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. En faisant fondre du basalte et en le soumettant à des pressions allant jusqu'à 70 gigapascals (1 GPa équivalant à 10 000 atmosphères), pression que l'on n'atteint que dans le manteau inférieur, elle a observé que dans ces conditions les liquides, qui sont bien plus désordonnés que les cristaux, sont aussi plus compressibles. « Les magmas deviennent alors plus denses que les roches, et ils peuvent très bien rester piégés dans le manteau profond », conclut-elle. Mais on est encore loin de la pression de 135 GPa atteinte à la base du manteau ! Pour connaître le comportement d'hypothétiques magmas à ces profondeurs, il faudra attendre le développement de matériel plus performant. Quant à savoir quelle est l'origine de ces poches de liquide éparpillées au cœur

un écrin de choix : un diamant, dans lequel elle était piégée en tant qu'inclusion. Pierre Cartigny pense que cette découverte en amènera d'autres : « Il est possible que d'autres diamants de grande profondeur nous soient déjà parvenus sans même que nous sachions les reconnaître. Maintenant que l'on sait à quoi ressemble un diamant contenant de la ringwoodite, il sera peut-être plus simple d'en identifier d'autres. D'ailleurs, un échantillon similaire aurait été identifié tout récemment. »

Cette première ringwoodite cachait elle-même un trésor : une trace d'eau ! Pas de l'eau liquide, mais de l'eau « dissoute » dans les minéraux sous forme de groupements hydroxydes. Une impureté dans la roche, en quelque sorte. Par des expériences sur des roches de synthèse, les chercheurs avaient déjà montré dans les années 1990 que les cristaux de ringwoodite pouvaient probablement en recéler. Cette découverte est donc une confirmation : non seulement le manteau a la possibilité de contenir de grandes quantités d'eau, mais en plus il en contient énormément. Or, dans ce potentiel « réservoir » souterrain offert par la ringwoodite, on pourrait stocker l'équivalent de une à deux fois tous les océans de la planète ! Pierre Cartigny tempère : « Tout ce que

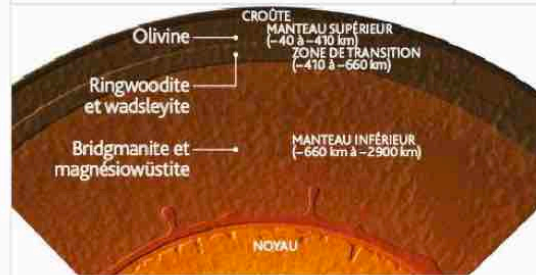
cela signifie, c'est qu'il y a de l'eau dans le manteau au moins localement. » Il est en effet impossible pour l'heure de savoir si cette énorme capacité de stockage est utilisée intégralement. Or il sera très important de répondre à cette question, car l'hydratation des minéraux chamboule complètement leurs propriétés physiques, notamment leur température de fusion ou leur viscosité. Si la présence de cette énorme quantité d'eau dans le manteau était avérée, elle pourrait amener à réviser les théories sur les magmas de grandes profondeurs.

Les chercheurs ont parfois l'occasion d'analyser d'authentiques échantillons pour confirmer leurs modèles... ou les ébranler !

Les chercheurs ont donc une bonne connaissance du manteau, de sa chimie, de ses mouvements, de ses roches. Mais l'organisation des phases minérales en cercles concentriques est une description simplifiée du manteau, car celui-ci est loin d'être homogène : au sein des différentes couches identifiées (manteau supérieur, zone de transition, manteau inférieur) des phénomènes ponctuels se produisent. Ainsi, un morceau de plaque océanique qui plonge dans le manteau le refroidit localement.

de la roche, mystère. « Il pourrait aussi bien s'agir de croûte océanique qui a fondu en plongeant dans le manteau, que de magmas résiduels datant de la formation de la Terre », imagine la chercheuse.

Le manteau n'a donc pas fini de livrer tous ses secrets. Condamnés à l'observer depuis la surface, les chercheurs devront développer de nouveaux outils pour résoudre les nombreuses questions en suspens. Un travail qui s'annonce difficile, passionnant... et probablement sans fin.



Les phases minérales de l'olivine

Lorsqu'on descend vers le centre de la Terre, la pression augmente et change les propriétés physiques des matériaux. Constituant principal du manteau terrestre, l'olivine se transforme ainsi en de nouveaux minéraux - de même composition chimique, mais de structures cristallines différentes - appelés « phases ».

M. KONTEJE - CH. MA - R. SIEMENS, UNIV. OF ALBERTA