

L'INGRÉDIENT MANQUANT DE LA TERRE (d'après pour La Science Août 2010, n°394, modifié)

Le manteau de la Terre représente environ 85 % de son volume et la couche la plus profonde est restée longtemps une énigme jusqu'à la découverte en 2002 d'un nouveau minéral dense: la **postpérovskite**. Ce minéral se forme aux températures et pressions qui règnent dans les 300 premiers kilomètres du manteau. Les chercheurs ont montré que sa présence implique une efficacité plus grande du transport de chaleur par convection.

UNE COUCHE DE PLUS POUR LA PLANÈTE

La Terre a une structure en oignon, les couches concentriques étant composées de différents matériaux. La découverte d'un nouveau matériau de haute densité, la postpérovskite, implique l'existence d'une nouvelle couche et explique certaines anomalies dans la propagation des ondes sismiques à travers la planète.

CROÛTE (jusqu'à 35 kilomètres de profondeur)

Les continents, en partie immergés sous les océans, sont constitués de diverses roches relativement légères, dont l'âge peut atteindre plusieurs milliards d'années. Ils flottent ainsi sur le manteau plus dense situé en dessous. La croûte océanique, formée de roches basaltiques, est un peu plus dense. Elle se forme à partir de matériau du manteau qui émerge au niveau des dorsales sous-marines et qui finit par y retourner en coulant, après 100 millions d'années en moyenne.

MANTEAU

Les roches du manteau sont principalement constituées de silicium, d'oxygène et de magnésium. Elles se déforment aux échelles de temps géologiques, sous l'effet de courants convectifs qui animent le manteau tout entier. Cette convection transporte la chaleur interne de la Terre et est le moteur de la dérive des continents.

MANTEAU SUPÉRIEUR (35 à 660 kilomètres)

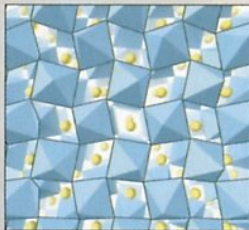
À mesure que les pressions et les températures augmentent avec la profondeur, les éléments constitutifs du manteau s'arrangent en différentes structures cristallines (minéraux), qui forment des couches distinctes. Trois minéraux – l'olivine, la spinelle modifiée et la spinelle – donnent aux couches du manteau supérieur leurs noms respectifs.

MANTEAU INFÉRIEUR (660 à 2 900 kilomètres)

On a longtemps pensé que la structure minérale du manteau inférieur était uniforme. Cependant, les données sismologiques suggéraient l'existence d'une couche distincte à la base du manteau. Elle correspondrait à la postpérovskite.

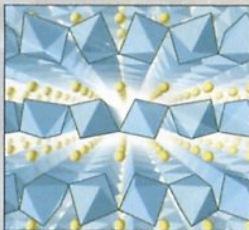
• Couche de pérovskite

Le minéral qui domine cette couche (70 pour cent de la masse) est un silicate de magnésium ($MgSiO_3$) appartenant à une famille de structures cristallines nommées pérovskites. Dans cette structure très compacte, les ions magnésium (*en jaune*) sont entourés de groupes silicium-oxygène octaédriques (*doubles pyramides bleues*). Jusque récemment, les scientifiques pensaient que cet arrangement cristallin était le plus dense possible pour ces éléments.



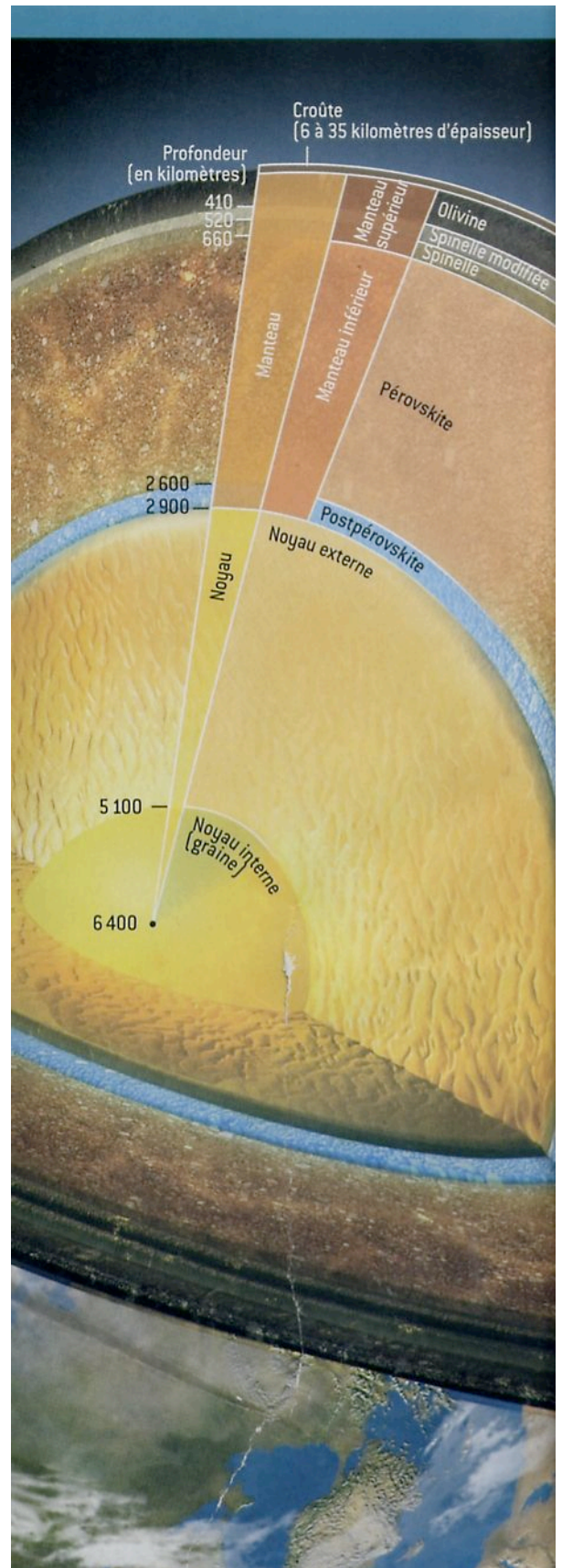
• Couche de postpérovskite

Dans les conditions de pression et de température régnant dans les 300 derniers kilomètres du manteau avant le noyau, la pérovskite se transforme en une nouvelle structure: les ions magnésium et les groupes silicium-oxygène se disposent en couches séparées. La transition réduit le volume d'environ 1,5 pour cent; une petite différence, mais avec des effets considérables sur la dynamique interne de la planète.



NOYAU (2 900 à 6 400 kilomètres)

Le noyau de la Terre est principalement composé de fer, liquide dans le noyau externe et solide dans le noyau interne (ou graine). Comme dans le manteau, la convection brasse le noyau externe, mais en raison de la densité beaucoup plus élevée du noyau, il y a très peu de mélange avec le manteau. On pense que la convection dans le noyau est à l'origine du champ magnétique terrestre.



La découverte de la postpérovskite

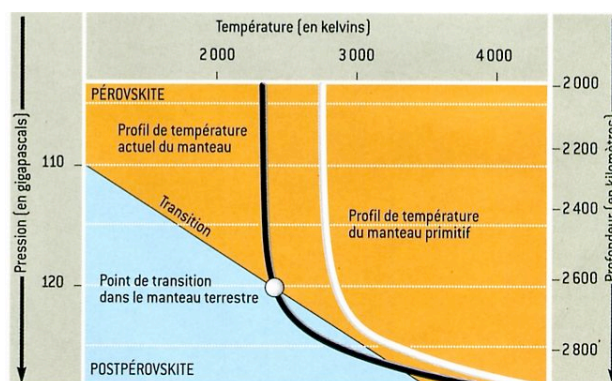
La pérovskite ($MgSiO_3$), composante principale du manteau à partir de 660 km de profondeur a été synthétisée pour la première fois en 1974 à une pression de 30 Gpa (1 Gpa équivaut à 10^5 fois la pression atmosphérique au niveau de la mer). En 1960 la découverte d'une anomalie sismique à environ 2600 km de profondeur a permis de définir une zone d'environ 300 km, frontière entre le noyau et le manteau nommée alors la **couche D''**. En 1983, les chercheurs font l'hypothèse que cette anomalie est une véritable discontinuité par **transition de phase**. En effet, les géophysiciens doutaient que la structure très compacte de la pérovskite puisse être encore plus comprimée. En 2002, l'auteur de l'article, Kei HIROSE, réussit à porter à 125 Gpa et 2400 K (soit 2100 °C environ) des échantillons de matériau semblable à celui du manteau à l'aide d'une enclume à diamant. Une étude par diffraction aux rayons X montre qu'une nouvelle structure cristalline apparaissait. De plus, lorsque l'échantillon était réchauffé à basse pression, le nouveau motif de diffraction disparaissait pour laisser de nouveau la place à celui de la pérovskite. La transition de phase était donc **réversible**. Cette nouvelle phase fut alors nommée postpérovskite. Sa densité est supérieure à celle de la pérovskite de 1 à 1,5 %. Les conditions Pression-Température de son apparition correspondent à celles qui règnent au niveau de la couche D'', là où la discontinuité des ondes sismiques fut repérée 40 ans plus tôt.

Le rôle de la postpérovskite sur le flux de chaleur mantélique

Le noyau, essentiellement constitué de fer, est presque deux fois plus dense que le manteau. Il n'y a donc aucun mélange et les échanges de chaleur se font principalement par conduction. Alors que le manteau est riche en isotopes radioactifs (thorium, Uranium et potassium) qui en se désintégrant produisent de la chaleur, la température actuelle du noyau (4000 à 5000 K) est essentiellement due à la chaleur résiduelle de la formation de la Terre. Depuis cette formation, le noyau se refroidit par transfert de chaleur vers le manteau.

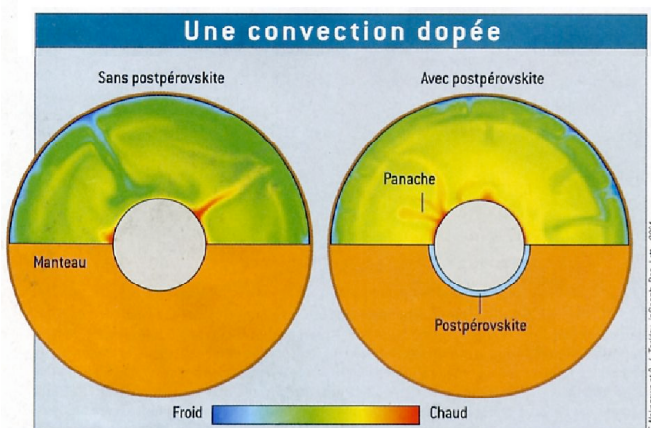
En faisant des hypothèses raisonnables sur la conductivité thermique des matériaux du manteau inférieur, le flux de chaleur estimé est de 5 à 10 TW (terawatt). Le taux de refroidissement et le flux de chaleur sont ainsi très supérieurs à ce qui était supposé. Ceci laisse penser que la température initiale du noyau devait être supérieure à ce que les scientifiques admettaient jusqu'à présent. Au sein de la jeune Terre, le noyau était liquide puis il s'est refroidi donnant une graine solide et un noyau externe liquide. Un rythme de refroidissement plus rapide suggère que la graine pourrait s'être formée il y a moins d'un milliard d'années (1 Ga), ce qui est jeune eu égard à l'âge de la Terre (4,6 Ga). En effet, une graine plus ancienne serait plus volumineuse.

Les données expérimentales montrent que la pérovskite (en bleu) se transforme en postpérovskite (en orange) à des pressions, donc des profondeurs, d'autant plus fortes que la température est élevée. Le profil actuel de température à l'intérieur du globe (courbe noire) implique que la postpérovskite doit se trouver entre 2600 et 2900 km de profondeur. Dans la Terre jeune, où la température était plus élevée (courbe blanche), la postpérovskite ne pouvait pas se former.



Les géophysiciens pensent que c'est la convection dans le noyau liquide qui engendre, par effet « géodynamo », le champ magnétique terrestre. La présence de la graine solide rend cette convection moins chaotique, produisant un champ plus intense que celui qui existerait si le noyau était entièrement liquide. Or le champ magnétique protège la planète du vent solaire et des rayons cosmiques, permettant la vie sur Terre ; le changement d'intensité du champ magnétique terrestre, qui se serait produit il y a environ 1 Ga, aurait permis la vie jusqu'alors limitée aux océans de gagner les continents.

Dans un panache mantélique ascendant, où la température est plus élevée que dans le manteau environnant, la transition de la postpérovskite en pérovskite se déroule à plus haute pression. Cette transition se produisant à la discontinuité entre le noyau et le manteau, déjà instable à cause de la chaleur du noyau sous-jacente, elle déstabilise la base du manteau et augmente la formation des panaches chauds. La pérovskite ayant une densité inférieure, la transition de phase confère aux panaches une poussée d'Archimède supplémentaire ce qui renforce leur mouvement ascendant. La convection est ainsi « dopée », comme le suggère la modélisation



La postpérovskite et l'accélération de la dynamique mantélique

En accélérant la convection mantélique, la postpérovskite augmente la température du manteau supérieur comme le suggère la modélisation précédente (la zone de teinte jaune est plus étendue). L'une des conséquences est le renforcement de l'activité volcanique.

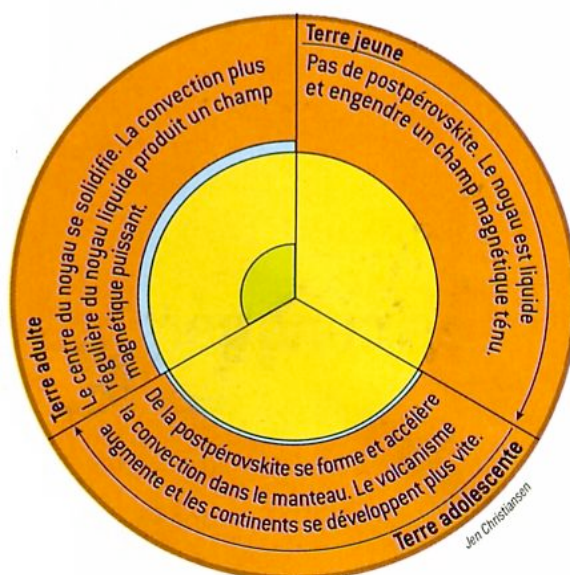
Des mesures récentes révèlent que la conductivité électrique de la postpérovskite est beaucoup plus élevée que celle de la pérovskite, rendant la base du manteau plus conductrice de plusieurs ordres de grandeur. Ainsi, la couche de postpérovskite renforcerait l'échange de **moment cinétique**¹ entre le noyau externe liquide et le manteau solide lorsque le régime d'écoulement du noyau varie. Des simulations numériques montrent que cet échange modifierait la vitesse de rotation de la Terre permettant d'expliquer la **précession**² périodique de l'axe de rotation de la Terre (nutation).

Conclusion

La couche D'', riche en postpérovskite, pose encore de nombreuses questions. En effet, l'étude de la vitesse des ondes sismiques montrent deux anomalies positives, l'une sous l'Afrique et l'autre sous l'océan Pacifique. Cela signifie-t-il qu'il existe deux masses, plus denses que le manteau environnant mais assez légères pour « flotter » au-dessus du noyau externe ? Ces masses pourraient modifier le régime d'écoulement à la base du manteau et, indirectement, les modalités de la convection. Cette couche n'est donc pas uniforme.

La découverte de la postpérovskite et de ses propriétés permet de proposer une « histoire mantélique » de la Terre en trois temps.

1. Après formation de la Terre, le noyau était entièrement liquide et le manteau ne contenait pas de postpérovskite. Le manteau ne dissipait pas la chaleur de manière efficace et la Terre se refroidissait lentement.
2. Il y a environ 2,2 Ga, la température avait alors assez diminué pour permettre la formation de postpérovskite à la base du manteau, accélérant ainsi la convection. Ceci a pu stimuler la croissance des continents.
3. L'efficacité grandissante du transfert de chaleur du noyau vers le manteau a refroidi suffisamment le noyau au sein duquel la graine solide s'est formée. La convection dans le noyau externe liquide est devenue alors plus régulière, engendrant un champ magnétique terrestre intense, la protégeant du vent solaire et des rayons cosmiques et autorisant le développement de la vie.



¹ Le moment cinétique ou moment angulaire est la grandeur physique qui joue dans le cas d'une rotation, un rôle analogue à celui de la quantité de mouvement pour une translation.

² Phénomène découvert par Hipparque vers 150 av. J-C. Il remarqua, en comparant ses observations avec celles de ses prédécesseurs effectuées sur plusieurs siècles que l'axe de la Terre, passant par les pôles, n'occupe pas toujours la même position par rapport aux étoiles.