

Les mystères de la physique (6)

Le cœur de la Terre, terra incognita

Au centre de la planète: probablement un noyau de fer mi-solide mi-liquide. Il générerait le champ magnétique terrestre, mais comment? Et où puise-t-il la chaleur qu'il diffuse? Incursion dans les entrailles de la Terre

Olivier Dessibourg

Ils sont les dignes héritiers du professeur Lidenbrock. Des centaines de scientifiques qui, de par le monde, progressent sur les traces du héros de Jules Verne, en voyage vers le centre de la Terre. Certes, leur périple est moins imaginaire que scientifique, jalonné d'expériences en laboratoire et de théories parfois controversées. Mais l'objectif est le même: percer les mystères de cette terra incognita qui se trouve sous nos pieds. Et qui, indirectement, permet l'évolution de la vie sur Terre.

Indiquant le nord sur les boussoles ou guidant certains animaux durant leurs migrations, le champ magnétique terrestre constitue en effet un puissant bouclier qui protège les organismes vivants contre le bombardement létal des rayons cosmiques. Mais où et comment ce champ magnétique, observé depuis deux millénaires, est-il généré? Et pourquoi varie-t-il, en intensité ou en répartition géographique, parfois jusqu'à s'inverser complètement? Pour trouver des éléments de réponse, les géophysiciens enquêtent à 6350 m de profondeur, dans les entrailles d'une Terre encore bien mystérieuse.

Bien sûr, il est impossible d'ausculter directement l'intérieur de la planète; le forage le plus profond réalisé à ce jour ne dépasse pas 13 km. Pour déterminer la structure et la densité des couches terrestres, les recherches se sont donc basées, dès les années 1930, sur la propagation des ondes sismiques créées par les tremblements de terre. Résultat: une mince croûte recouvre un manteau de roches solides épais de 2900 km, qui lui-même enveloppe le noyau. Celui-ci est composé de deux entités: une graine solide (noyau interne) composée de fer (85%), de nickel (5%) et d'autres éléments plus légers, qui baigne dans une bulle de fer en fusion (noyau externe). C'est là le berceau du champ magnétique.

Comme sur un vélo
Pour une majorité de géophysiciens, ce noyau ressemble à une sorte de dynamo, similaire à celles qui, sur les anciens vélos, produisent du courant électrique. Appliqué à la Terre, ce modèle nécessite trois conditions pour qu'apparaisse un champ magnétique planétaire. La première est la présence d'un grand

volume de fluide conducteur: on le trouve dans le noyau externe. La deuxième? Que la planète tourne sur elle-même. Enfin, il doit exister une source d'énergie mettant ce fluide en mouvement. D'une température de 6000°C, le noyau interne jouerait ce rôle. Et le processus peut commencer.

Près de la graine, le fer liquide surchauffé devient moins dense et remonte vers le manteau. Ce qui crée des mouvements de convection semblables à ceux que l'on peut voir dans un chaudron de soupe mijotant sur un brûleur. De plus, ces tourbillons sont perturbés par la rotation de la Terre. Au final, le fer liquide se déplace en circonvolutions hélicoïdales. Des mouvements qui génèrent le champ magnétique terrestre. Comment?

Supposons que le noyau interne produise lui-même un champ magnétique, même faible. Selon les lois de l'électrodynamique, des courants électriques se créent alors dans le fer liquide lorsque celui-ci se déplace dans ce champ. Toujours selon ces lois, ces courants génèrent eux-mêmes un champ magnétique secondaire, qui renforce le champ primaire présent dans la graine, ce qui entretient les courants électriques, et ainsi de suite.

Reste à régler la question, très débattue, de l'origine du champ primaire, celui du noyau interne. «Ce champ peut être créé, par exemple,

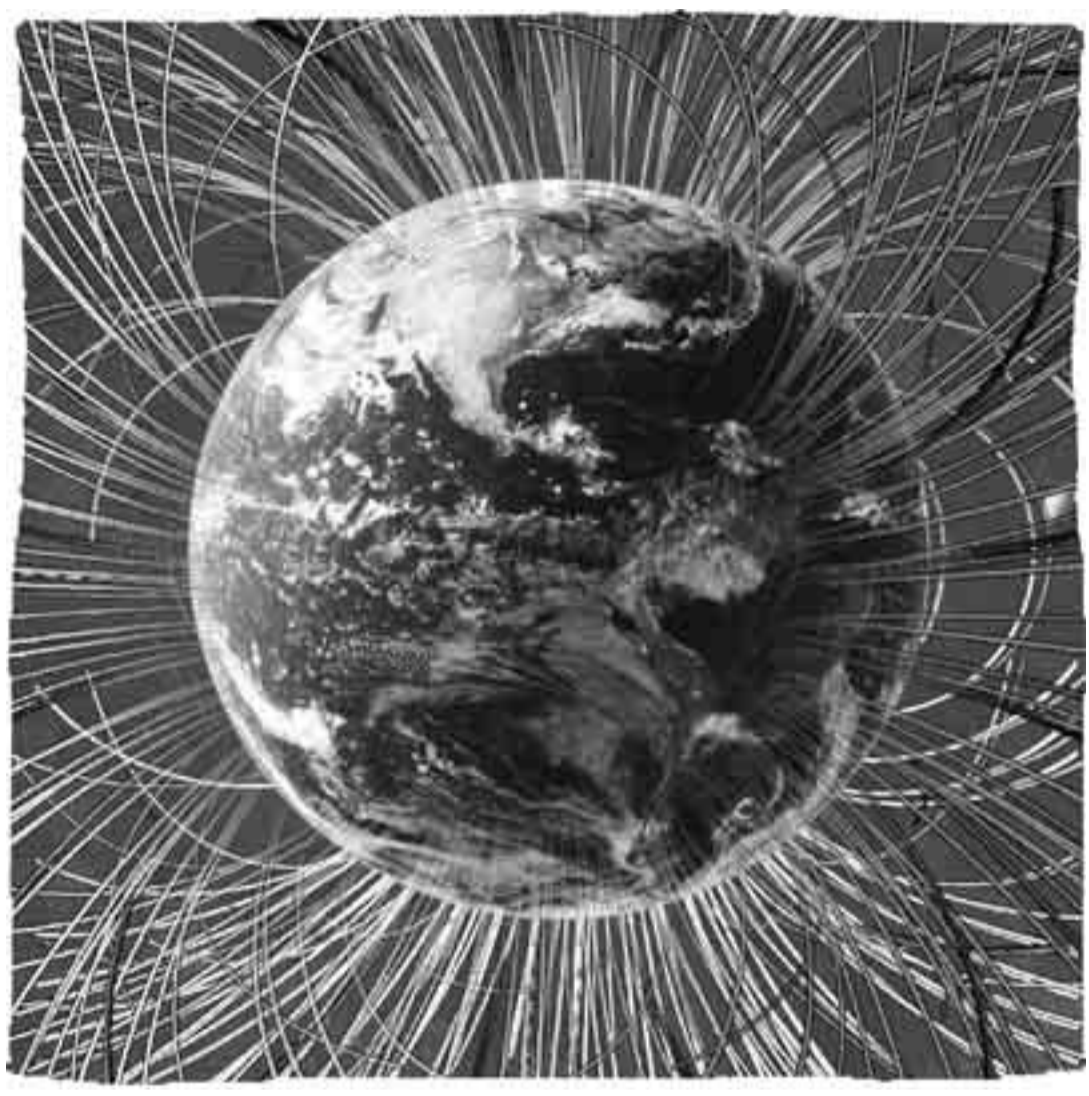
aimanté placé à travers la Terre, avec un pôle nord et un pôle sud magnétique (différents des pôles géographiques).

Affiné par des simulations numériques, le modèle est séduisant. D'autant plus qu'il semble être confirmé en laboratoire, grâce à l'expérience «Derviche tourneur sodique» imaginée par des géophysiciens de l'Université de Grenoble. Une boule de cuivre aimantée, représentant le noyau interne, baigne dans une sphère de 40 cm de diamètre remplie de sodium liquide à 120°C et pouvant tourner à 2000 tours par minute. Le sodium liquide a été choisi parce qu'il imite le comportement du fer en fusion. La différence de vitesse de rotation des deux sphères crée des tourbillons dans ce liquide. L'ensemble simule donc l'intérieur de la Terre. «En mars et mai derniers, des tests ont montré qu'un champ magnétique secondaire était effectivement induit, se réjouit le chercheur Philippe Cardin. Des mesures plus poussées seront effectuées cet automne.»

Quelle source de chaleur?

Cette expérience ne s'intéresse par contre pas à un autre aspect du problème. Si de la chaleur est produite dans le noyau interne pour soutenir ces mouvements de convection, d'où vient-elle? Car, depuis sa naissance il y a 4,5 milliards d'années, notre planète n'aurait-elle pas eu le temps de se refroidir et de se solidifier complètement? L'hypothèse obtenant le plus large consensus est celle de la radioactivité naturelle. Des éléments radioactifs appelés radionucléides (le thorium 232, l'uranium 235 et 238) seraient «coincés» dans le noyau interne et se désintégreraient en produisant de l'énergie, alors transformée en chaleur.

La première étude confirmant cette hypothèse a été publiée le 28 juillet dernier dans la revue *Nature*. Lors de ces désintégrations, des antineutrinos sont émis. Ces particules très légères interagissent peu avec la matière qu'elles traversent. À l'aide d'un détecteur particulier installé au Japon, des chercheurs sont tout de même parvenus à en détecter, en provenance directe du centre de la Terre. Une première mondiale! Mais la question n'est pas complètement réglée. Car selon eux, ces désintégrations radioactives, si elles confirment que de la chaleur est produite de cette manière au



SAMUEL ROUGE

centre de la Terre, n'y contribueraient que pour la moitié environ...

Marvin Herndon, lui, propose une théorie sensiblement différente: le centre de la terre serait plutôt un immense réacteur nucléaire naturel d'uranium, d'un diamètre de 8 km. Des réactions de fission atomique en chaîne, source de quantité d'énergie calorifique, y auraient lieu. Depuis 1993, ce géophysicien californien construit son idée audacieuse à partir d'une découverte faite en 1972, au Gabon. Dans des mines, des chercheurs français ont trouvé des éléments radioactifs issus de réactions de fission nucléaire naturelles, et non provoquées comme c'est le cas dans les centrales nucléaires. Si un tel phénomène naturel est possible à la surface de la Terre, pourquoi ne le serait-il pas en son centre? La communauté scientifique réfute pourtant largement cette hypothèse, arguant qu'elle n'est «pas nécessaire», ou que les conditions pour que fonctionne un tel «géoréacteur» sont loin d'être garanties. Rob de Meijer, lui, n'est pas si catégorique. Il propose même de la vérifier expérimentalement.

«Toutes les théories sur le centre de la Terre ne sont que des hypothèses, rappelle ce professeur de l'Université de Groningen (Pays-

Bas). Celle de Herndon, comme les autres, mérite d'être explorée.» Son équipe planifie donc de creuser un puits de 500 m sur l'île de Curaçao, et d'y introduire des détecteurs à antineutrinos. Car ces particules, si elles ont certaines caractéristiques, peuvent aussi constituer la signature de l'existence d'un réacteur naturel de fission nucléaire. Et pourquoi sur cette île des Caraïbes? «Parce qu'elle se situe loin des sources artificielles d'antineutrinos que sont les centrales nucléaires, et que la croûte terrestre y est mince, favorisant les mesures.» Devisé à 50 millions d'euros, le projet n'en est encore qu'à ses balbutiements: «Nous devons en démontrer le principe. Mais si elle fonctionne, cette expérience permettra de dire si les antineutrinos sont générés par un géoréacteur nucléaire, ou par d'autres sources radioactives naturelles.»

Une idée brouille les cartes

Une troisième théorie est née dans les années 1970. Et si un autre élément radioactif, du potassium 40 (⁴⁰K), se trouvait aussi au centre de la Terre. Un élément dont la désintégration produirait le supplément d'énergie calorifique nécessaire à achever le portrait du noyau interne? Hors de question, ont d'abord unanimement rétorqué les scientifiques. Il était en effet admis que, plus léger que les métaux lourds comme le fer, le ⁴⁰K ne pouvait avoir «coulé» jusqu'au centre de la Terre, lorsque celle-ci s'est formée dans la fournaise des collisions avec des météorites. Or, en mai 2003, des géochimistes de l'EPFZ ont décelé des indices montrant que le ⁴⁰K pouvait se mêler au fer, alors que l'on pensait qu'un tel alliage était impossible. Ces résultats ont été confirmés six mois plus tard par des géophysiciens américains. Ainsi, du ⁴⁰K combiné au fer pourrait bel et bien se trouver dans le noyau interne. Et même fournir 25% de la chaleur dissipée par la Terre, selon ces scientifiques. Loin d'être définitive, cette hypothèse vient une nouvelle fois brouiller les cartes. Ceci alors qu'un autre phénomène reste encore largement plus mystérieux.

Certaines roches volcaniques ou glaces polaires révèlent en effet que l'orientation du champ magnétique

terrestre s'est inversée des centaines de fois depuis que la Terre existe. La dernière inversion aurait eu lieu il y a 780 000 ans. De plus, l'intensité moyenne de ce champ a décliné de 10% depuis qu'on la mesure, en 1831. Récemment, des satellites ont aussi repéré une répartition inégale du flux magnétique à la surface de la

Le champ magnétique terrestre s'est inversé plusieurs fois depuis que la Terre existe

terre. Mais d'où viennent ces changements? Probablement de profonds bouleversements dans le noyau externe. Des simulations numériques ont montré que des mouvements de convection anormaux pouvaient, dans certaines zones, créer une inversion du champ magnétique terrestre local. Problème: ces dérèglements sont difficiles à expliquer avec le modèle d'un noyau interne produisant de la chaleur de manière graduelle et continue, par désintégration des radionucléides. Selon la théorie de Herndon, en revanche, le géoréacteur nucléaire naturel pourrait, de temps à autre, avoir des «ratés», et même s'arrêter. Ce qui pourrait de fait modifier le champ magnétique terrestre.

Selon les scientifiques, il est clair que si ce dernier s'altère «brusquement» - à savoir durant tout de même quelques millénaires -, les conséquences en seraient dramatiques. Impossible toutefois de dire si l'affaiblissement observé depuis peu est un phénomène passager ou un signe avant-coureur d'un tel événement. Quoi qu'il en soit, mieux connaître le centre de la Terre reste un immense défi. En 2009, l'Agence spatiale européenne doit d'ailleurs lancer un trio de satellites, dans le but de fournir l'analyse la plus détaillée du champ magnétique terrestre, ainsi peut-être qu'une nouvelle image du cœur de notre planète.

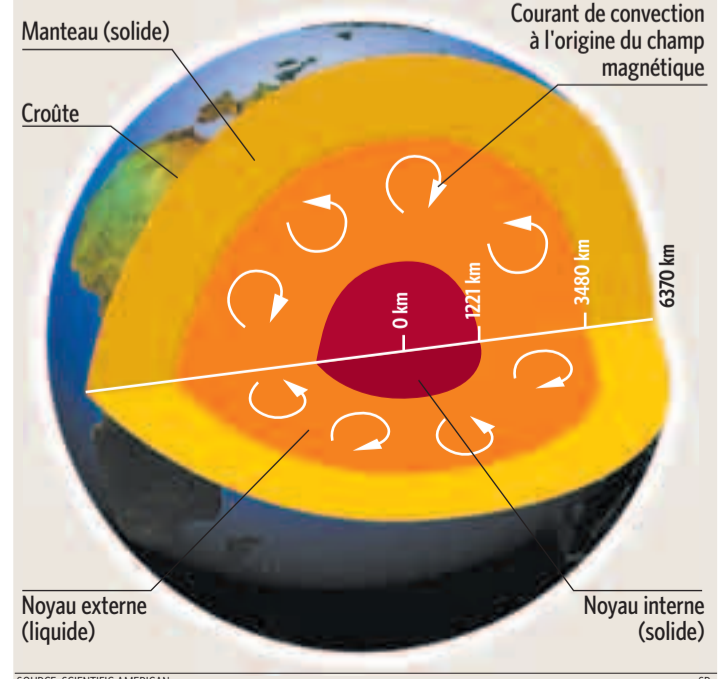
Quand la fiction inspire la science



Le centre de la Terre cesse de fonctionner. Le champ magnétique terrestre s'effondre, provoquant diverses catastrophes. Une mission de sauvetage est mise sur pied. Son but: lancer dans le manteau terrestre un engin habité, censé larguer des bombes nucléaires afin de réactiver le noyau. Et ainsi sauver le monde.

In vraisemblable, le scénario du film de science-fiction *The Core*, sorti en 2003? Pas pour tout le monde. Cette même année, Dave Stevenson, du California Institute of Technology, propose d'envoyer une capsule-sonde, grosse comme un pamplemousse, vers le centre de la Terre. Son idée: créer une immense entaille dans la croûte terrestre, et y insérer la sonde bourrée de capteurs dans une goutte géante de fer en fusion de quelques millions de tonnes. Ce matériau, plus lourd que ceux composant le manteau terrestre, coulerait vers le noyau, emportant avec lui la sonde. L'engin créerait des ondes de choc mécaniques pour transmettre les données récoltées, dans une sorte de langage en «morse». «Le plus grand défi, c'est d'ouvrir la faille», reconnaît tout de même Dave Stevenson. Selon lui, plusieurs mégatonnes de TNT ou une bombe nucléaire suffiraient à faire l'affaire... O. D.

La Terre vue en coupe



SOURCE: SCIENTIFIC AMERICAN SR

La semaine prochaine: Dans les archives du CICR