

massif rocheux. On sait déjà que les roches situées au fond du puits sont beaucoup plus perméables qu'on ne le prévoyait d'après les expériences de laboratoire. Malgré les contraintes considérables qui s'exercent en profondeur, des fluides s'écoulent dans les roches.

La sismologie de l'écorce terrestre

Le forage de Windischeschenbach avait été entrepris parce que l'on voulait comprendre l'origine des nombreux réflecteurs sismiques que l'on rencontre dans toutes les zones des massifs continentaux. On a notamment étudié la zone de croisement de deux profils sismiques qui avaient révélé l'existence de réflecteurs sismiques à une profondeur accessible (voir la figure 5).

Les explorations préparatoires avaient mis en évidence deux groupes essentiels de réflecteurs : des réflecteurs plans, plongeant jusqu'à des profondeurs de plus de dix kilomètres, et des réflecteurs quasi horizontaux, plus grands et situés à des profondeurs comprises entre 8,5 et 12 kilomètres.

Ces derniers délimitaient des zones de réflectivité sismique intense, sous lesquelles devait se trouver un corps où les ondes sonores se propagent à plus de sept kilomètres par seconde. Le bord supérieur de ce «corps d'Erbenndorf» est, dans la zone du forage principal, à une profondeur de 11 kilomètres.

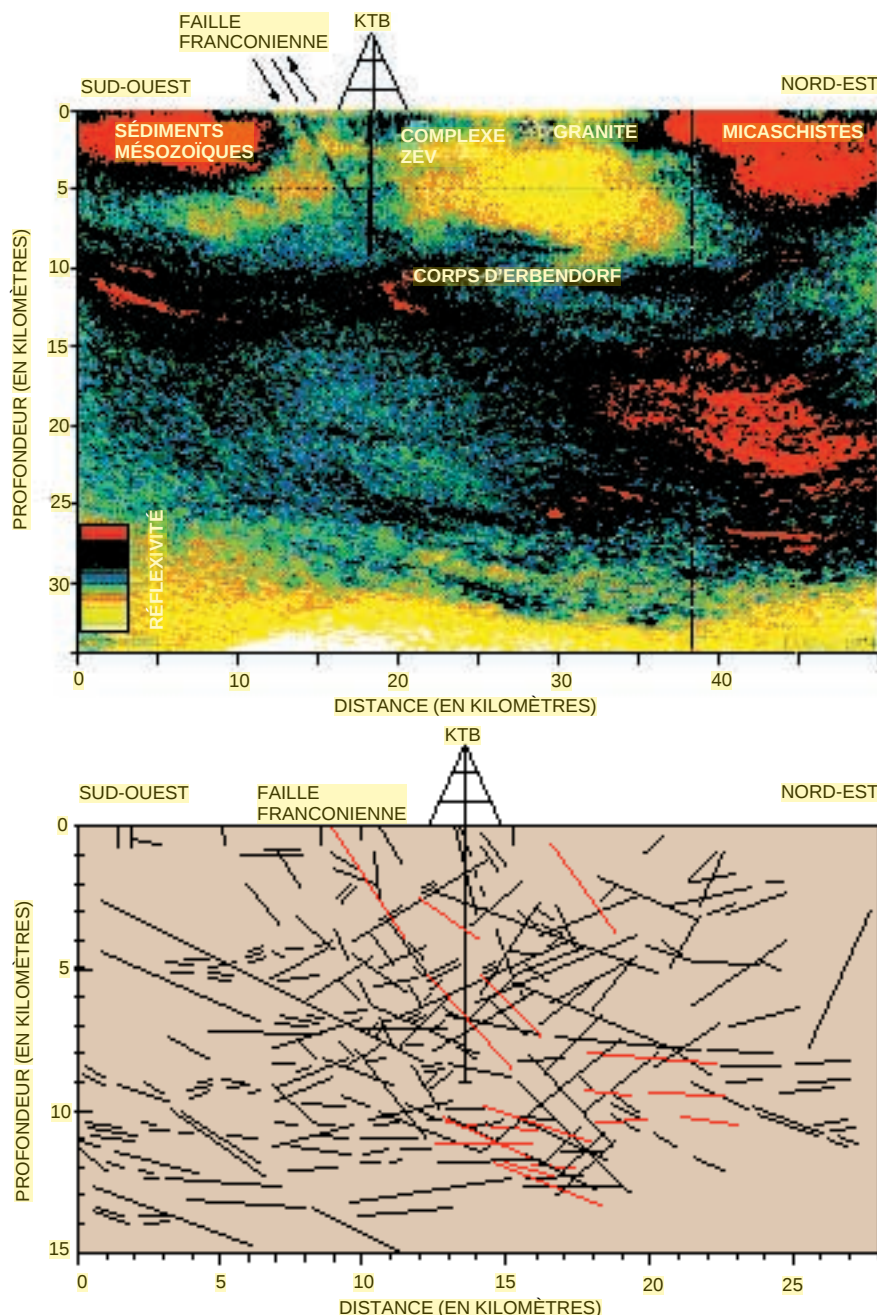
Les réflecteurs inclinés pouvaient être directement reliés à des zones de perturbation détectables en surface ; aussi avait-on supposé qu'ils étaient des prolongements de ces perturbations. Le réflecteur le plus intense, qui plonge selon un angle de 55 degrés vers le Nord-Est, semble correspondre, en surface, à la zone de perturbation d'Altensteinparken de la faille franconienne. On avait calculé que le forage principal l'atteindrait à une profondeur comprise entre 6 600 et 7 100 mètres et, effectivement, le forage traversa, entre 6 860 et 7 260 mètres, un puissant faisceau de perturbations.

Au total, la comparaison des études sismiques et du forage montre que les réflecteurs sismiques fortement inclinés révèlent surtout le dessin des fractures de l'écorce terrestre.

Géoelectricité et magnétisme

Au cours des 20 dernières années, des sondages électromagnétiques profonds ont mis en évidence des horizons de

conductivité élevée au sein de l'écorce terrestre. Cette propriété a été attribuée à l'existence de veines liquides chargées en sels, ou à des réseaux de dépôts de graphite et de diverses combinaisons de celui-ci avec des minerais métal-



5. LES ENVIRONS DU SITE DE FORAGE ont été analysés par des techniques sismiques. L'un des objectifs primordiaux du projet KTB était d'étalonner ces techniques dans un massif cristallin, c'est-à-dire d'identifier les structures géologiques du sous-sol qui réfléchissent préférentiellement les signaux sismiques. On a représenté sur cette figure deux profils sismiques orientés du Nord-Est au Sud-Ouest. Le profil supérieur a été obtenu par une technique nouvelle. La structure la plus spectaculaire, à proximité du forage, est la faille franconienne, qui plonge vers le Nord-Est et qui a été traversée entre 6 860 et 7 260 mètres de profondeur. Tout près du fond du puits de forage se trouve le corps dit d'Erbenndorf, un massif de roches à fort pouvoir réfléchissant, où les ondes sonores se propagent rapidement. Les mêmes structures se retrouvent sur le profil inférieur, qui a été obtenu par la méthode classique. Sur ce profil, on reconnaît de nombreux autres réflecteurs supplémentaires (ceux qui figurent en rouge sont les plus intenses). Ainsi la méthode de réflexions sismique sous angle élevé indique, dans les roches cristallines, les profils de faille de l'écorce terrestre plutôt que les frontières entre diverses unités rocheuses et formations géologiques.

liques. Les recherches systématiques réalisées dans le cadre du grand projet européen *Geotraverse* ont démontré la présence fréquente d'horizons de conductivité élevée au sein de l'écorce méso-européenne varisque. Leur existence a été établie au cours de sondages préparatoires pour le choix du site de forage, tant en Forêt-Noire que dans le Haut-Palatinat. Au voisinage de Windischeschenbach, à une profondeur d'environ dix kilomètres, un conducteur électrique se prolonge loin au Nord.

D'après les mesures électromagnétiques, il est quasi parallèle à la faille franconienne.

Afin d'explorer cet horizon, les géophysiciens ont effectué, pour la première fois au monde, une expérience dite dipôle-dipôle (voir la figure 7) : ils envoyaient des impulsions électriques à partir de dipôles électriques situés à des distances allant jusqu'à 60 kilomètres du puits de forage et ils enregistraient les courants entrants à l'aide de sondes disposées dans la partie la

plus profonde et non chemisée du préforage et du forage principal, ainsi qu'en une trentaine d'autres emplacements de surface. Les résultats de cette expérience sont en cours d'analyse.

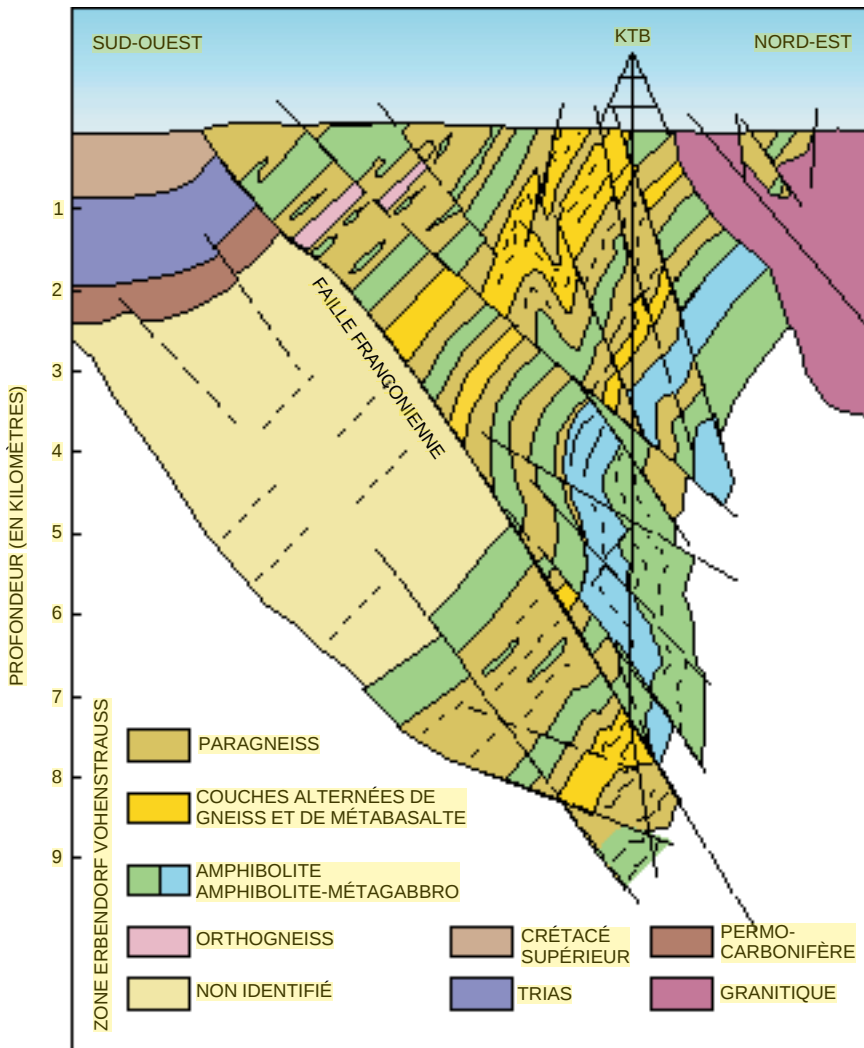
Des sondages électromagnétiques effectués dans les environs du site de forage, avant et après le forage, ont également retrouvé les horizons conducteurs proches de la surface. Ils ont montré que le trou de forage se trouve situé près d'une anomalie du potentiel électrique qui court du Nord-Ouest au Sud-Est : apparemment le sous-sol contient des zones à des potentiels différents, reliées par des conducteurs, tel le réseau de couches de graphite. Autrement dit, la tour de forage se trouve sur une sorte de pile électrique géologique.

Le programme KTB a également beaucoup apporté à la compréhension des sondages magnétiques. De manière surprenante, c'est le sulfure de fer sous la forme de pyrrhotine qui constitue le porteur principal du magnétisme, tant dans les gneiss que dans les metabasites ; les gisements de magnétite sont beaucoup plus rares et ne sont responsables du magnétisme que de manière très localisée – par exemple, dans les amphibolites qui conduisent à la formation de marbre. Les concentrations en pyrrhotine, généralement inférieures à un pour cent en volume, augmentent localement – par exemple, dans les zones les plus perturbées – pour atteindre dix pour cent. Comme nous l'avons vu, ce minerai est alors fréquemment associé à de la pyrite et autres minerais à base de sulfures, et souvent accompagné de veines de graphite et de chlorite.

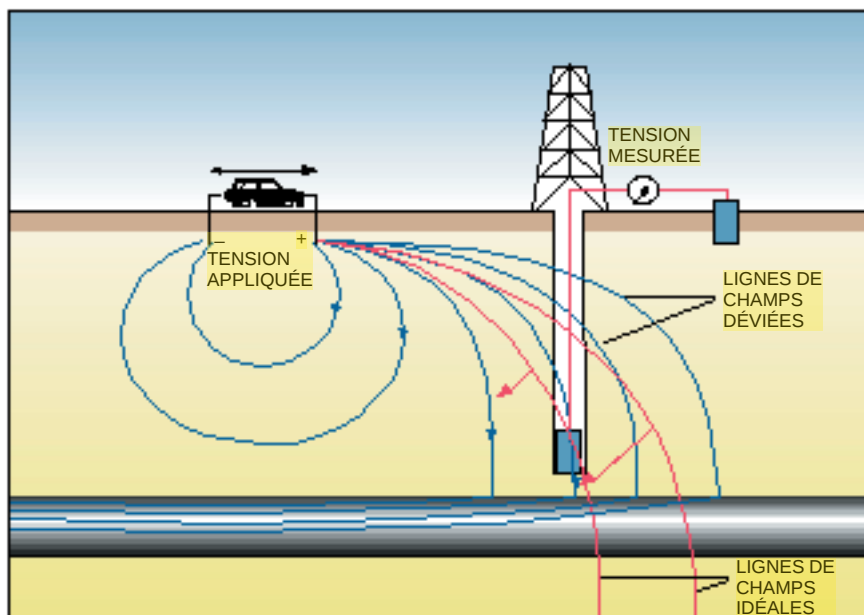
La pyrrhotine naturelle est ferromagnétique, avec une température de Curie (la température à partir de laquelle l'aimantation s'annule) d'environ 315 °C. Aux températures un peu inférieures, l'aimantabilité de tels minéraux augmente généralement de manière très forte. Au fond du puits de forage, où règne une température de 275 degrés, un tel phénomène devrait déjà se révéler par un effet important sur le champ magnétique terrestre, ce qui ouvre une possibilité d'observer directement son influence au niveau de l'écorce terrestre.

Géothermie et mécanique

Le préforage avait déjà révélé que l'échauffement de 21 °C par kilomètre ne se poursuivait que jusqu'à une pro-



6. CE PROFIL orienté du Sud-Ouest au Nord-Est et passant par le trou de forage a été construit à partir des données du forage principal KTB et des sondages sismiques. Avant l'exécution du sondage profond, on considérait que la zone Erbsdorf Vohenstrauß (ZEV) était le reste d'un complexe de couverture épais de quatre kilomètres, recouvrant la suture entre le bloc saxothuringien et le bloc moldodanubien. On sait aujourd'hui qu'il s'agit d'une formation géologique beaucoup plus profonde, qui s'est formée bien avant le plissement varisque, au cours duquel le bloc saxothuringien et le bloc moldodanubien se sont heurtés et soudés. Elle est essentiellement constituée de paragneiss, de metabasites, et de couches alternées de gneiss et d'amphibolite ; les roches qui ont engendré la zone se sont déposées il y a 490 millions d'années dans un bassin marin peu profond. Plus tard, ce fond marin a glissé sous le bord du continent voisin, où, dans les profondeurs de l'écorce terrestre, elles ont été transformées sous des pressions et des températures élevées (métamorphisme). Il y a 380 millions d'années, soulevées par l'intrusion du socle granitique, elles fusionnèrent avec les formations montagneuses voisines, avant de subir deux phases de compression, dont la dernière remonte à 70 millions d'années, sous l'influence du plissement alpin.



7. LORS DE L'EXPÉRIENCE de type dipôle-dipôle, une tension électrique était appliquée à la surface du sol à une certaine distance du puits de forage, et le parcours des lignes de champ était mesuré au fond du puits. L'existence de bons conducteurs électriques, dans les couches profondes de la Terre, a été révélée par la déformation des lignes de champ, qui normalement sont circulaires.

fondeur de 1 000 mètres environ. Ce gradient augmente au cours des 500 mètres suivants et oscille alors autour d'une valeur de 28 degrés par kilomètre.

Cette observation pose toute une série de questions encore ouvertes. Pour l'instant, les mesures de température, dans le forage principal, sont trop rares et trop imprécises, car les opérations de percement ont perturbé la température de la roche environnante. Leur retour à l'équilibre thermique prendra un temps de l'ordre de celui de la durée du percement.

Enfin l'un des buts principaux du programme KTB était d'analyser le comportement mécanique de l'écorce terrestre. Les connaissances dans ce domaine sont fondamentales, car elles expliqueront la tectonique des plaques continentales internes, la formation des chaînes montagneuses, la création de bassins sédimentaires, ainsi que les causes et les mécanismes des séismes.

Notre connaissance actuelle des propriétés de l'écorce terrestre est fondée sur des expériences de laboratoire qui ont montré que la résistance de la partie supérieure de l'écorce terrestre dépendrait de la résistance au frottement sur des «surfaces de rupture» ; les contraintes maximales augmenteraient proportionnellement à la profondeur. D'autre part, des expériences menées à haute température et à faible

vitesse de déformation ont montré que la plasticité des roches augmenterait de manière exponentielle au-delà d'une certaine température.

À l'intersection de ces deux régimes correspond la transition fragile-plastique. Dans le cas du quartz, omniprésent dans l'écorce terrestre, cette transition devrait se produire aux environs de 300 °C.

La compréhension de cette transition étant d'une importance considérable en sciences de la Terre, les géophysiciens du programme KTB procédèrent à toute une série d'expériences, afin de déterminer les contraintes jusqu'au fond du forage principal. Ainsi ont-ils découvert que les contraintes mécaniques sont effectivement transmises à partir de la partie superficielle et rigide de l'écorce terrestre. Elles augmentent avec la profondeur jusqu'à ce qu'elles atteignent la limite de rupture des roches.

Pour mieux connaître ce comportement, on a fracturé les roches, à des profondeurs variées, par des moyens hydrauliques, au cours d'une expérience de vidage du trou de forage et d'injection de fluides. Un sismographe disposé au fond du préforage a détecté plus de 400 microséismes d'une intensité atteignant une magnitude de 1,2. L'expérience a d'ores et déjà démontré que des systèmes de fissures existent également dans les couches

profondes de l'écorce terrestre et qu'elles peuvent s'ouvrir sous l'action de la pression hydraulique.

Un indicateur approximatif du début de la zone fragile de l'écorce profonde est donné par la profondeur jusqu'à laquelle des tremblements de terre localisés se produisent. L'analyse des microséismes de la zone KTB à l'aide du réseau local de sismographes a montré que les épicentres sont souvent situés à une profondeur d'une dizaine ou, au maximum, d'une douzaine de kilomètres sous la surface. L'observation microscopique et submicroscopique des caractéristiques structurales de minéraux tels que le quartz, qui subit des modifications considérables lors de la transition vers la plasticité, fournit un autre indice qui permet l'identification directe du domaine de transition. Ces modifications sont aisément reconnaissables sur les plus petits échantillons de forage observés au microscope électronique, et elles ont révélé que le forage principal avait effectivement atteint le domaine de transition.

Depuis la fin du forage, Windischeschenbach est devenu un observatoire géologique. L'ensemble des deux puits, distants de 200 mètres, permet d'analyser la roche intermédiaire. On effectue aussi des expériences sismiques de «trou croisé», au cours desquelles une source d'ondes sonores est placée dans un puits, et une sonde réceptrice dans l'autre ; on a également analysé la communication hydraulique entre les deux puits. Windischeschenbach est aussi l'amorce d'une collaboration internationale pour l'étude de l'écorce terrestre. Le programme international de forage continental profond doit repartir cette année.

Rolf EMMERMANN travaille au Centre de recherches géologiques de Potsdam.

The German Continental Deep Drilling Program (KTB). Site Selection Studies in the Oberpfalz and Schwarzwald, sous la direction de R. Emmermann et J. Wohlenberg, Springer-Verlag, 1989.

Geodynamik und Plattentektonik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1995.

Scientific Rationale for Establishment of an International Program of Continental Scientific Drilling, sous la direction de Mark Zoback et R. Emmermann, GeoForschungsZentrum Potsdam, 1994.
