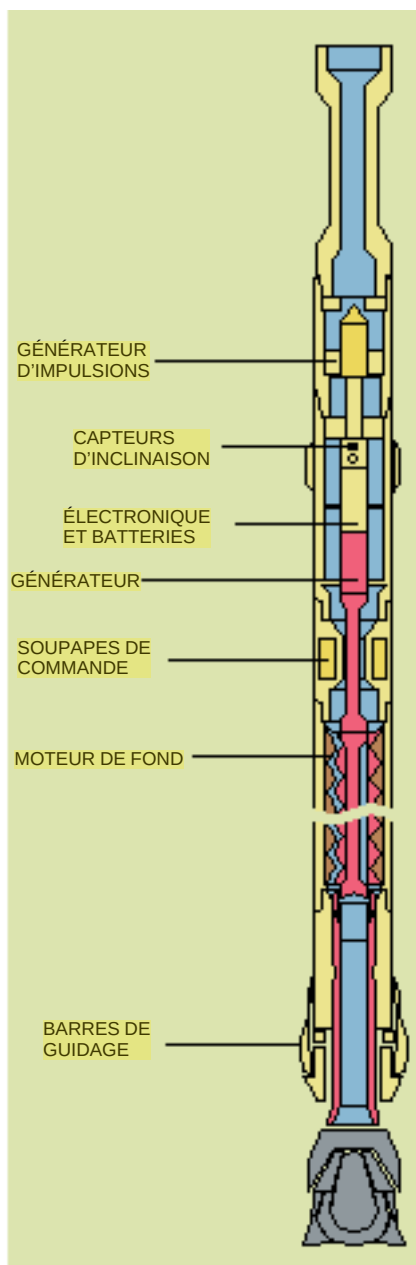




4. CE SYSTÈME DE CONTRÔLE de la verticalité a été spécialement mis au point pour le projet KTB. En l'absence de guidage, le trépan est dévié par les roches, de sorte que le trou de forage serpente dans le sous-sol. Cette mauvaise verticalité du forage provoque des frottements notables de la tige de forage contre les parois du puits et engendre des contraintes considérables sur tout le train de tiges. Dans le système de contrôle de la verticalité qui a été mis en œuvre à Windischeschenbach, un capteur vérifie en permanence toute déviation et, lors du dépassement d'une valeur limite, il active une unité de réglage constituée de quatre pistons à entraînement électromagnétique, reliés chacun à une barre de guidage située directement au-dessus du trépan. En forage normal, les barres sont sorties et maintiennent ainsi le train de tiges au milieu du trou de forage. Lorsque le capteur envoie une impulsion, on rétracte une barre, afin que le train de tiges bascule vers la barre rétractée.

Les fluides

Le programme KTB a également donné une foule de renseignements nouveaux sur les profondeurs jusqu'auxquelles on trouve des fluides (liquides et gaz), sur la mobilité de ces fluides et sur leur rôle dans l'évolution de la vie. Malgré leurs métamorphismes différents, les roches des divers types détectés ont conservé des rapports isotopiques du soufre et de l'oxygène égaux à ceux des roches d'origine : autrement dit, les phénomènes métamorphiques se sont essentiellement déroulés dans des systèmes compartimentés, sans imbibitions massives de fluides.

Ces fluides sont en partie inclus, à des concentrations infimes (de l'ordre du millionième de milligramme par gramme), dans les minéraux qui constituent les roches traversées par le forage. Les inclusions fluides les plus fréquemment rencontrées sont des solutions de chlorure de calcium (souvent mélangées à des chlorures de sodium et de potassium), qui dateraient de 65 millions d'années.

Beaucoup plus rarement, et uniquement dans certaines couches, on rencontre des solutions peu concentrées de chlorures de sodium et de potassium, qui proviennent vraisemblablement du granite de Falkenberg et qui auraient été incluses tardivement.

Dans des zones bien délimitées, et avec une fréquence qui augmente nettement avec la profondeur, certaines inclusions gazeuses contiennent du dioxyde de carbone, du méthane et de l'azote en concentrations variables. On ignore encore si ces gaz sont apparus lors du métamorphisme sous pression moyenne, mais les zones les plus intéressantes sont celles où les composés carbonés dominent et où l'on trouve souvent du graphite.

Celui-ci est souvent associé au sulfure de fer et à la chlorite dans les zones fortement perturbées. L'enrichissement local en graphite est parfois si spectaculaire, dans des zones de cisaillement épaisses de quelques millimètres à peine, que des veines de conduction électrique apparaissent. Tout porte à penser que le graphite s'est déposé là à la suite d'une réaction entre le méthane et le dioxyde de carbone. Une telle transformation a été vraisemblablement amorcée et

favorisée par les frottements, lors du cisaillement des roches. Dans cette hypothèse, des veines conductrices de graphite devraient être interconnectées dans les régions de forte activité tectonique.

L'association et la combinaison parfois complexes du graphite avec les sulfures de fer que sont la pyrite et la pyrrhotine, ainsi qu'avec la chlorite, révèlent que ces minéraux se sont vraisemblablement formés à partir de solutions hydrothermales (solutions aqueuses chaudes et sous haute pression). De telles minéralisations ont également été rencontrées lors du forage effectué jusqu'à une profondeur de 12 800 mètres sur la presqu'île russe de Kola (voir *Le forage le plus profond du monde*, par Ye Kozlovsky, *Pour la Science*, février 1985). Elles semblent être caractéristiques de massifs terrestres continentaux.

En fin de forage, on a extrait quelque 460 mètres cubes de la saumure la plus concentrée. Celle-ci provient-elle d'évaporites (roches salines) qui ont cristallisé au Permien, lors de l'évaporation de bassins marins isolés, ou a-t-elle migré vers la région du KTB il y a 290 à 250 millions d'années à partir de bassins sédimentaires, le long de structures tectoniques profondes ? Ou bien encore a-t-elle été libérée dès la phase de subduction prévarisque, il y a environ 400 millions d'années, pour gagner progressivement son niveau actuel, lors du soulèvement prévarisque et postvarisque de la ZEV ?

Nous espérons répondre à ces questions en analysant les fluides recueillis après l'achèvement du forage principal. Une expérience a consisté à abaisser le niveau de l'eau dans le trou de forage, afin de créer une dépression par rapport à la roche environnante. Les eaux profondes qui se déversaient dans le trou de forage ont fait remonter le niveau, ce qui a réduit la différence de pression (voir la figure 7). La vitesse de remontée du niveau était de 4,3 mètres par 12 heures, la saumure provenant de la zone située entre 9 030 et 9 101 mètres de profondeur (le reste du trou de forage était étanche, en raison de son chemisage cimenté).

Après cette entrée de fluide, on a fermé la partie supérieure du trou de forage et on a mesuré l'augmentation de la pression ; elle révélera la perméabilité et la capacité de stockage du

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.

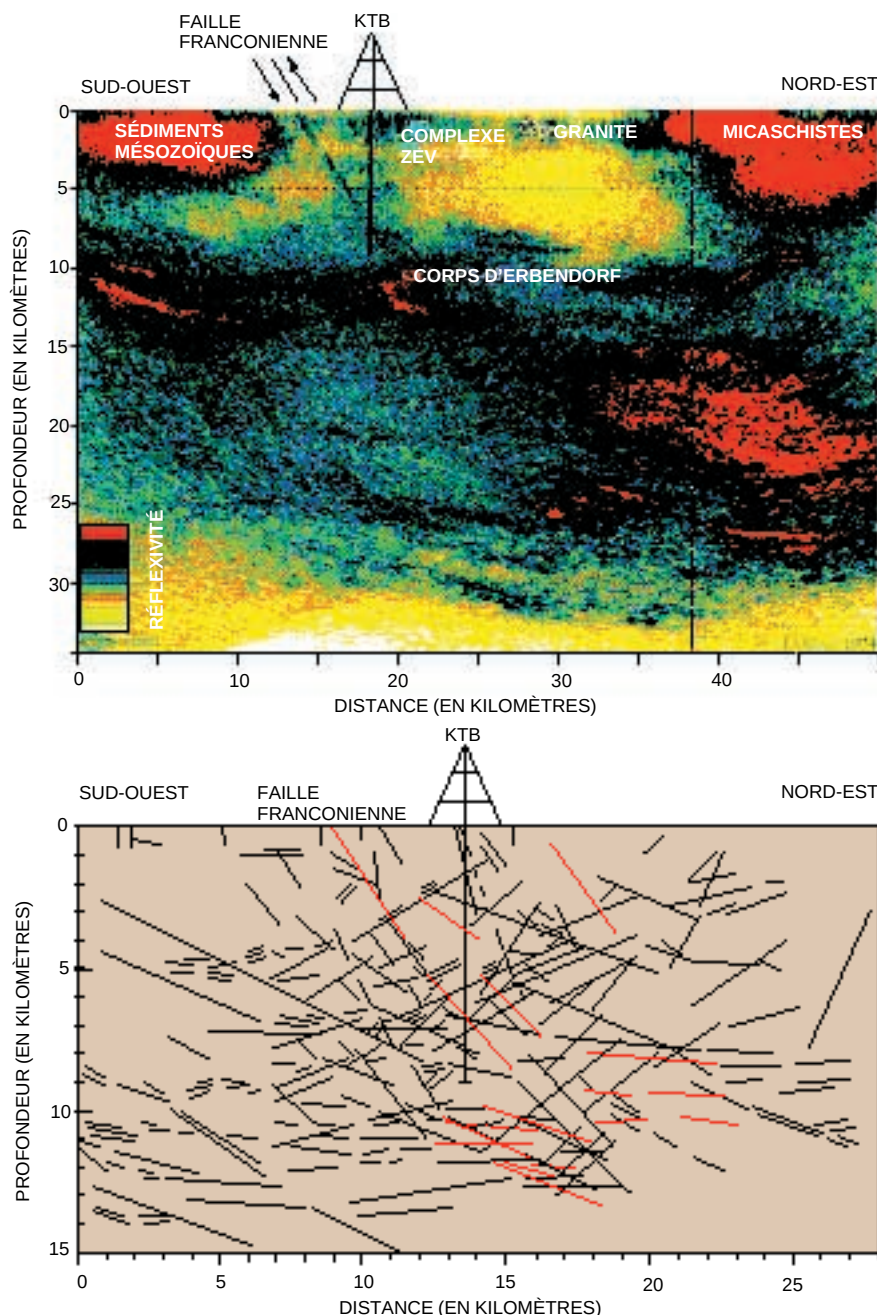
Les réflecteurs inclinés pouvaient être directement reliés à des zones de perturbation détectables en surface ; aussi avait-on supposé qu'ils étaient des prolongements de ces perturbations. Le réflecteur le plus intense, qui plonge selon un angle de 55 degrés vers le Nord-Est, semble correspondre, en 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.