

deux énormes blocs continentaux (le bloc saxothuringien et le bloc moldo-danubien) qui sont entrés en collision et se sont soudés à l'époque de la formation du massif varisque. Aussi nous attendions-nous à détecter, une fois traversé le complexe de couverture, la suture cachée, d'une hauteur de trois à cinq kilomètres.

Cette attente fut déçue : le forage principal traversa des structures de type ZEV sur toute sa profondeur. En revanche, nous avons découvert que les couches rocheuses ont été fragmentées et cisailées à un point qu'on n'aurait jamais imaginé, car Windischeschenbach est au milieu d'une plaque tectonique que l'on croyait rigide et stabilisée.

L'écorce terrestre traversée est une alternance des trois mêmes types de roches qui dominent en surface : les paragneiss, les metabasaltes et des alternances de gneiss et d'amphibolite (voir la figure 6). Ces couches rocheuses plongent vers le Sud-Ouest avec un angle compris entre 50 et 70 degrés, et la succession des couches ne semble ni s'inverser ni présenter de répétitions de profil dues à des plissements.

La zone de faille la plus importante se trouve entre 6 860 et 7 260 mètres de profondeur. Elle est constituée d'un faisceau de zones de cisaillement, où les roches sont fortement ébranlées. Vraisemblablement le forage a traversé à ce niveau le prolongement en profondeur du grand système de perturbation qui est visible en surface sous la forme de la faille de Franconie.

Les gneiss se forment à partir de grès gris friables, riches en feldspath, qui se sont déposés sous la forme de couches alternées dont l'épaisseur est comprise entre quelques millimètres et plusieurs mètres. Ces gneiss ont en grande partie conservé la composition isotopique des roches sédimentaires dont ils proviennent. Il s'agit vraisemblablement de turbidite, un sédiment de granulométrie très fine, déposé par des cours d'eaux troubles et qui aurait glissé du plateau continental vers le fond de la mer.

Inversement la composition des metabasaltes laisse penser qu'ils étaient vraisemblablement d'anciens fonds marins de petits bassins océaniques du type de celui de la mer Rouge. Enfin les alternances de gneiss et d'amphibolite sont des mélanges de roches d'origine volcanique ou boueuse comportant des carbonates



3. LE PROGRAMME KTB a suscité la mise au point de techniques nouvelles qui ont été reprises par les industries pétrolières. Ainsi le système de manutention automatique des tiges (en jaune) comporte des bras à commande hydraulique qui saisissent les sections de 40 mètres de tiges de forage vissées ensemble et les déposent dans la tour de forage, au niveau de la plate-forme digitée (en haut à droite). Cette installation a réduit de près de 30 pour cent la durée des opérations de démontage et de réassemblage des trains de tiges, lors de l'échange des trépans de forage usés.

(tels que des veines de marbre) : on suppose qu'elles se sont formées à partir de dépôts sédimentaires dans une mer peu profonde, située dans une zone d'activité tectonique.

Toutes ces roches ont subi des transformations minéralogiques sous des pressions de 6 000 à 8 000 atmosphères et à des températures de 650 à 700 °C. Ce métamorphisme résulte de transformations complexes : après leur sédimentation sur le plateau océanique qui émergea lors de la collision avec le continent voisin, les roches glissèrent sous le bord de ce dernier au cours d'une subduction telle celle qui se produit aujourd'hui au large de la côte Ouest de l'Amérique du Sud ou de la côte Est de l'Asie. Les couches sédimentaires se retrouvèrent ainsi dans des régions profondes de l'écorce terrestre, où elles furent soumises à des pressions et à des températures élevées.

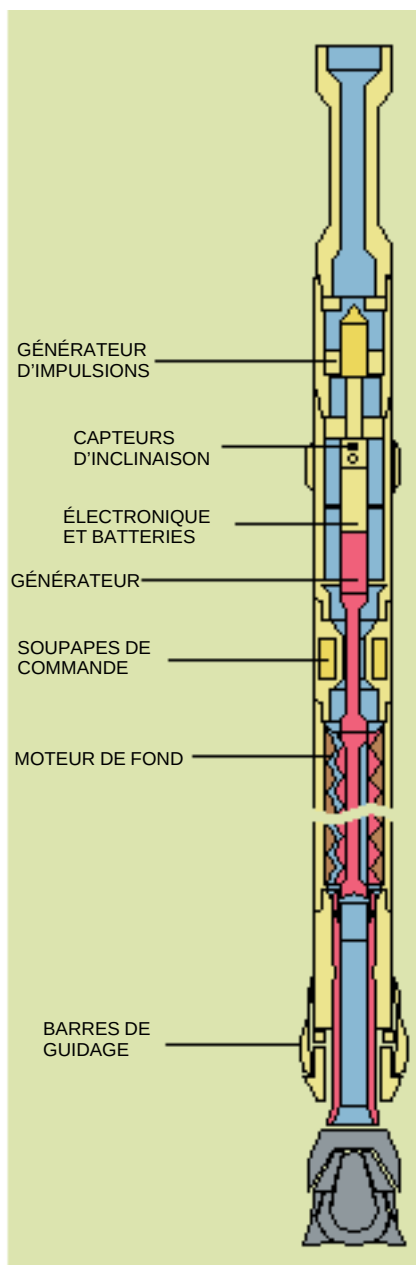
Ce métamorphisme se produisit il y a environ 410 à 380 millions d'années, mais les premières transformations minéralogiques, principalement sous l'effet de la pression, semblent dater de 480 millions d'années, pendant l'Or-

dovicien. Cette hypothèse concorde avec les derniers résultats géochronologiques, qui indiquent que des sédiments s'étaient déjà déposés à cette époque.

Pourquoi les pollens fossiles retrouvés dans ces roches proviennent-ils du Dévonien inférieur (environ 390 millions d'années)? Probablement parce qu'il y a 380 millions d'années, les roches ayant subi la subduction furent de nouveau soulevées. Ce processus a dû être rapide, car les données disponibles indiquent que la température ambiante n'atteignait plus que 300 °C, il y a 370 millions d'années. Quand la ZEV est-elle arrivée dans sa position actuelle? On l'ignore encore, mais on sait que cette zone a été peu modifiée par le métamorphisme de la déformation varisque, qui s'est déroulé à pression faible et à température élevée, il y a 330 à 320 millions d'années.

Lorsque le massif varisque s'est formé, la ZEV a été épaissie par compression et refoulement, notamment lors du plissement alpin, qui a commencé il y a 100 millions d'années et a atteint son point culminant il y a 40 millions d'années. Une telle conclusion découle d'observations indépendantes qui montrent que, dans la zone du forage principal, les propriétés des roches traversées changent peu jusqu'à une profondeur d'environ 7 500 mètres ; les effets de la température croissante ne deviennent visibles qu'au-delà. La faille franco-nienne, profonde de neuf à dix kilomètres, a probablement formé une rampe de glissement le long de laquelle la ZEV s'est trouvée repoussée vers le haut.

Ainsi les résultats des forages profonds, combinés aux recherches sur les zones avoisinantes, apportent des renseignements précieux sur la genèse et l'évolution de l'écorce varisque mésoeuropéenne. Notamment on a obtenu des informations sur les interactions de la zone Erben-dorf Vohenstrauss, du bloc saxothuringien, du bloc moldodanubien et du quatrième bloc présent dans la région, le bloc bohémien. Ces massifs rocheux indépendants ou erratiques se seraient égarés sur le bouclier continental européen. Le bloc bohémien aurait glissé sous le bloc moldodanubien, et la ZEV correspondrait à une partie repoussée du bloc bohémien ou à un complexe de suture entre lui et le bloc saxothuringien.



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