

générateurs d'électricité en freinant le tambour. Le système de relevage et le système de manutention des trains de tiges étaient coordonnés par un système informatique, ce qui évitait les fausses manœuvres.

Les concepteurs des systèmes avaient envisagé des sollicitations considérables, mais leurs prévisions ont été dépassées. Pourtant l'installation a parfaitement fonctionné, avec un temps total de réparation et de maintenance inférieur à quatre pour cent.

Les boues de forage étaient injectées sous une pression de 350 atmosphères. Une installation de préparation, composée de tamis vibrants, de pièges à sable, de séparateurs de gaz, de séparateurs de particules, éliminait les résidus de broyage et les gaz dissous.

Généralement les forages dévient de la verticale, car le trépan suit les formations rocheuses ou part dans la direction de moindre résistance de la roche. Ces déviations augmentent les frottements entre les tiges de forage et les parois du puits de forage. Aussi le forage principal a été équipé d'un système de contrôle de la verticalité (voir la figure 4), composé d'un châssis stationnaire, de capteurs d'inclinaison, d'un système électronique de commande et de vannes magnétiques, qui activaient quatre barres de guidage latéral. Un moteur à refoulement, actionné par la circulation des boues de forage, était situé directement au-dessus du trépan, auquel il était relié par un arbre. Les mesures de l'inclinaison du trou de forage, de la température, de l'état de charge de la

batterie et de la pression étaient transmises par l'intermédiaire de variations de pression dans les boues de forage. Au total, la verticalité est restée quasi parfaite sur une profondeur de plus de 7 500 mètres, limite au-delà de laquelle les températures excessives ne permirent plus la mise en œuvre du système.

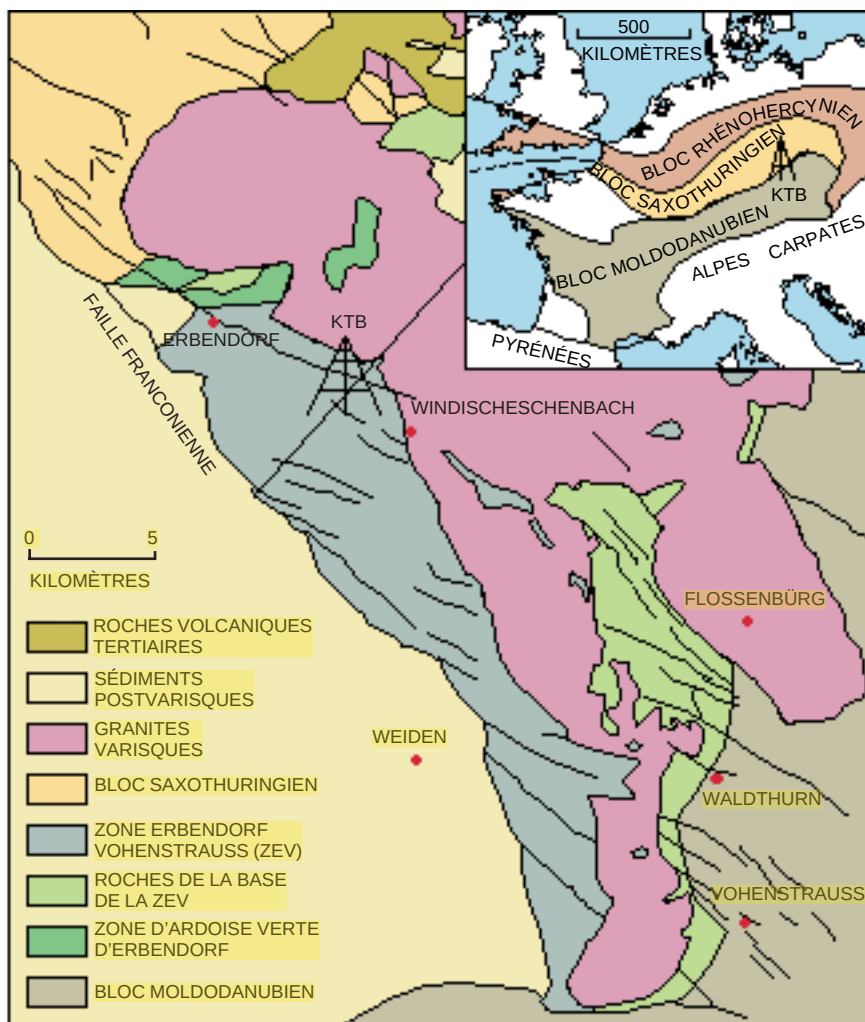
Afin de stabiliser le trou de forage et d'éviter les chutes de roches à partir des niveaux supérieurs, un chemisage était placé chaque fois que 3 000 mètres avaient été percés. La verticalité parfaite du trou de forage permit de réduire à 15 millimètres le jeu entre le tubage et la paroi (dans les forages classiques, l'espace supérieur qui est ménagé engendre un volume de déblais à évacuer supérieur de 50 pour cent).

En avril 1993, pour la première fois dans l'histoire du forage, on a chemisé le trou jusqu'à une profondeur de 6 000 mètres : il fallut descendre et visser 469 tubes d'un diamètre de 34 et 34,6 centimètres dans le trou de forage d'un diamètre égal à 37,5 centimètres. Le poids total du chemisage atteignait 706 tonnes. La vitesse d'assemblage fut réduite de 20 à 5 centimètres par seconde, afin d'éviter des pressions localisées trop importantes sur les parois du puits, en raison de l'étroitesse de l'espace entre la paroi et le chemisage, réduite à 15 millimètres. Grâce à l'extrême verticalité du puits, une profondeur de chemisage de 6 013,5 mètres a été atteinte en cinq jours seulement.

Au cours du forage, le laboratoire analysait les roches et les boues. Les résultats des analyses étaient comparés à ceux donnés par des sondes qui déterminent les propriétés de l'écorce terrestre traversée par le forage.

Structure et évolution de l'écorce terrestre

Windischeschenbach est au Nord de la zone Erbendorf Vohenstrauss (ZEV), un ensemble géologique situé à l'Ouest du Massif bohémien, et à l'Est la faille de Franconie. En surface, les roches sont essentiellement des metabasites et des paragneiss, qui se sont constitués par métamorphisme de roches initialement basaltiques ou sédimentaires. Les études préliminaires semblaient indiquer que la ZEV était le reste d'un complexe de couverture qui s'étendait au-dessus de la zone de suture entre



2. ORGANISATION GÉOLOGIQUE des environs de Windischeschenbach. Sur la carte en haut à droite, on voit que le site du forage KTB est à la limite de deux gros blocs continentaux : le bloc saxothuringien et le bloc moldodanubien. Il y a 300 à 400 millions d'années, ces blocs sont entrés en collision et se sont soudés, alors que s'élevaient les monts varisques. Windischeschenbach est dans la partie Nord de la zone Erbendorf Vohenstrauss (ZEV), un complexe géologique à l'Ouest du massif bohémien, où le socle affleure. La ZEV est délimitée, à l'Ouest, par des sédiments relativement récents, qui correspondent au grand système de perturbation de la faille franconienne.

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 metabasites 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 metabasites 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 moldo-danubien 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 moldo-danubien, et la ZEV correspondrait à une partie repoussée du bloc bohémien ou à un complexe de suture entre lui et le bloc saxothuringien.