

Neuf kilomètres sous l'Allemagne

ROLF EMMERMANN

En Allemagne, les géologues ont foré à neuf kilomètres de profondeur, afin de comprendre la formation et l'évolution du continent européen.

Le 12 octobre 1994, après 1 468 jours de forage qui ont amené les tré-pans à une profondeur de 9 101 mètres, où la température atteignait 275 °C, les géologues allemands participant au programme KTB ont cessé leurs activités. Après trois expériences, la phase opérationnelle a cessé, conformément aux prévisions, le 31 décembre 1994.

L'idée d'une exploration de la croûte terrestre par un forage à grande profondeur avait été proposée dès 1977, lors de la session de printemps de la Société allemande de recherche : malgré les progrès considérables de l'exploration profonde, de la pétrochimie et de la géochimie, seule l'étude directe du sous-sol permettrait, espérait-on, d'interpréter sans ambiguïté les images sismiques, électriques et magnétiques du sous-sol.

Comme on prévoyait des modifications notables des propriétés mécaniques des roches et une accélération des réactions chimiques aux profondeurs où la température est supérieure à 250 °C, on décida de forer jusqu'à une profondeur d'environ dix kilomètres. En 1986, on choisit le site du forage : Windischeschenbach, dans le Haut-Palatinat, 40 kilomètres à l'Est de Bayreuth.

Les raisons de ce choix étaient nombreuses. Tout d'abord, cette localité est située dans la zone de collision de deux grands blocs constitutifs des monts varisques (voir la figure 2), qui se sont formés il y a 400 à 500 millions d'années (ces monts tirent leur nom de la peuplade germanique des Varisques, qui vivait dans la région). La géologie locale se caractérise par des complexes rocheux de diverses origines et qui ont

subi des transformations métamorphiques variées (le métamorphisme est l'ensemble des modifications minéralogiques qui se produisent à température et à pression élevées, dans les profondeurs de l'écorce terrestre).

D'autre part, les géophysiciens avaient établi, pour la région de Windischeschenbach, un modèle géologique qui pouvait être testé par un forage à grande profondeur. Des sondages géophysiques avaient montré que des structures géologiques qui réfléchissent les ondes sismiques étaient présentes à une profondeur accessible, et qu'un plan de bonne conduction électrique se trouvait à une profondeur de 9 à 11 kilomètres sous la surface du sol. Enfin, la proximité du fossé de l'Eger, d'âge géologique récent, promettait l'élucidation d'intéressantes anomalies thermiques et géochimiques du sous-sol.

Le double forage

Les conditions qui règnent dans les grandes profondeurs étant mal connues, un forage pilote fut décidé : ayant une idée du sous-sol, on pourrait ensuite mettre au point des équipements et des instruments d'analyse qui tireraient pleinement parti du forage à très grande profondeur. En outre, on pourrait tester les modèles géophysiques de cette partie du sous-sol, tout en facilitant le début du forage final, les prélèvements d'échantillons étant déjà effectués. Enfin les foreurs voulaient accumuler des renseignements sur les paramètres litho-structuraux (types de roches, alternance des couches plissées, angle d'incidence des couches, etc.), sur la forabilité du

massif et sur la stabilité du trou de forage. Ils voulaient notamment savoir s'il existait des horizons d'apport, par lesquels des liquides provenant du massif pénétreraient dans le trou de forage, ou des zones de perte, qui absorberaient les boues de forage.

Le préforage commença le 22 septembre 1987. Après 560 jours de forage, la technique de carottage à câble spécifiquement mise au point pour ce projet atteignit une profondeur de 4 000 mètres. Pendant un an, les géologues examinèrent le trou de forage à l'aide de sondes variées ; la structure géologique du sous-sol fut explorée par l'expérience géophysique ISO 89, qui comprenait un sondage sismique tridimensionnel sur une surface de 18 × 19 kilomètres, avec le trou de forage au centre.

Le préforage montra ainsi que les couches de roches plongeaient de manière abrupte jusqu'à la profondeur finale atteinte. L'augmentation de la température, beaucoup plus rapide que prévu, conduisit à penser qu'on devrait limiter la profondeur du puits principal à dix kilomètres au lieu des 12 prévus initialement.

Le forage vertical

Entre avril 1989 et octobre 1990, les géologues installèrent le matériel du forage principal (voir la figure 1). La tour de forage, haute de 83 mètres, fut équipée d'un système de manutention semi-automatique des tiges de forage, composé d'un système de manutention, de dispositifs de transport et de basculement des tiges, de systèmes hydrauliques de vissage des tiges, d'un élévateur et d'un système intégré de cales de blocage automatique. C'était

la première fois qu'un tel système était mis en œuvre dans l'histoire du forage. Grâce à l'utilisation de trains de tiges de 40 mètres de long (au lieu des 27 mètres classiques), le temps de remplacement des outils de forage usés a

été raccourci de près de 30 pour cent au cours de chacun des 500 remplacements effectués (voir la figure 3).

Le système de relevage des tiges était installé dans un logement spécial, à la base de la tour de forage, et il était

télécommandé à partir de la salle de commande. Trois moteurs actionnaient le tambour de relevage, sur lequel s'enroulait le câble de relevage des tiges ; lors de la descente du train de tiges, ces mêmes moteurs fonctionnaient comme



1. LES INSTALLATIONS du forage principal KTB, près de Windischeschenbach, en Allemagne. Dans le grand bâtiment situé à droite de la tour de forage se trouve la station de traitement des fluides de forage. En bas à droite, les conteneurs bleus et blancs protègent les installations de mesure, tel un treuil fixe équipé d'un câble d'une longueur de dix kilomètres, au bout duquel des sondes de mesures sont

régulièrement descendues dans le puits. Le bâtiment central, situé à gauche à l'arrière-plan, abrite les bureaux, ainsi que le laboratoire principal où les échantillons de roches sont répertoriés, décrits et analysés dès leur remontée à la surface. Dans les bâtiments préfabriqués sur la gauche sont abritées les équipes de forage, ainsi que les installations d'approvisionnement.

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.

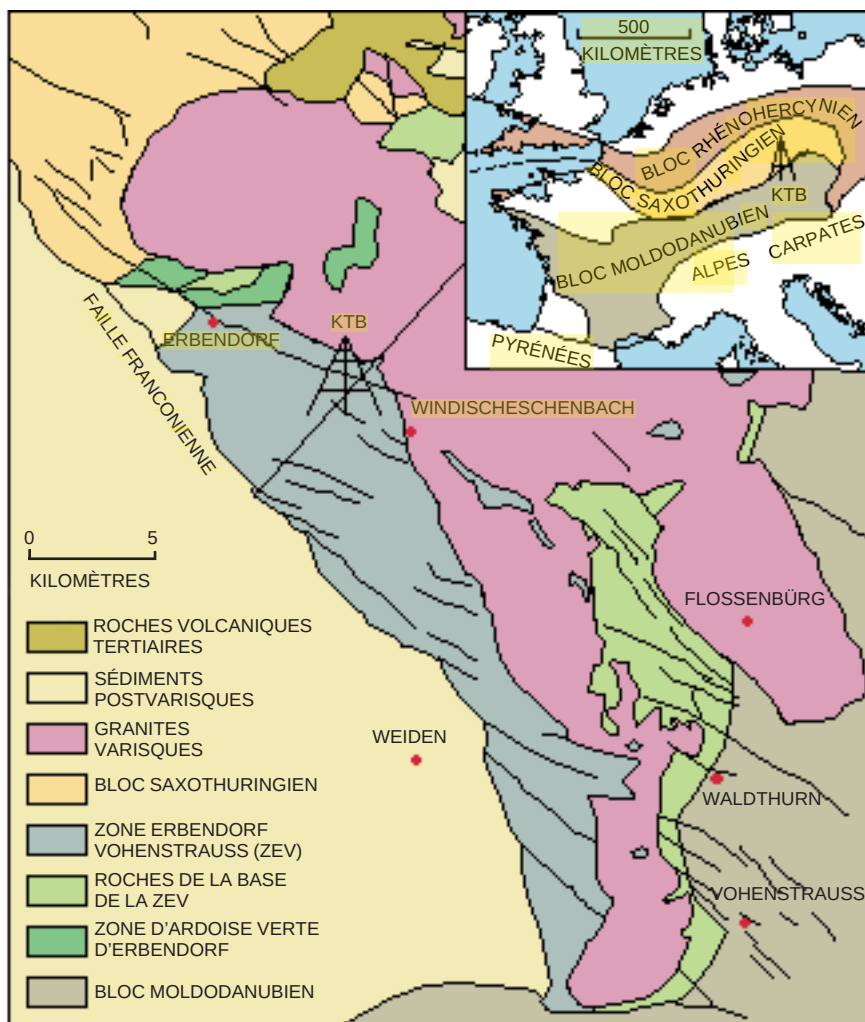
Afin de stabiliser le trou de forage et d'éviter les chutes de roches à partir des niveaux supérieurs, un chemisage était placé chaque fois que 3 000 mètres avaient été percés. La verticalité parfaite du trou de forage permit de réduire à 15 millimètres le jeu entre le tubage et la paroi (dans les forages 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 Erbindorf 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 Erbindorf 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.