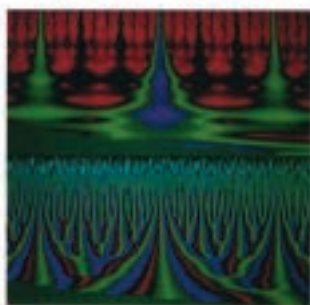


SCIENCES D'AVENIR

BARBARA BURKE HUBBARD

ONDES ET ONDELETTES

LA SAGA D'UN OUTIL MATHÉMATIQUE



PRIX D'ALEMBERT 1996

ONDES ET ONDELETTES

B. Burke Hubbard

L'élaboration des ondelettes
est une saga moderne.

Fourier a inventé la décomposition
d'un signal en éléments simples ;
pour les besoins de l'analyse
du signal, physiciens et mathématiciens
ont inventé une nouvelle décomposition
en ondelettes. Celle-ci est utile
dans de nombreuses applications
et ses richesses
ne sont pas toutes exploitées.

Barbara Burke Hubbard
est écrivain scientifique :
elle retrace avec simplicité et chaleur
comment les scientifiques pensent
et hésitent avant que n'écluse une idée,
et comment ils coopèrent.
Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Schwarzschild : l'étoile est «gelée» dans l'état de Schwarzschild.

Jusqu'à ce que le physicien John Wheeler invente le nom «trou noir» lors d'un cours en décembre 1967, ces objets étaient souvent surnommés des étoiles gelées. Comme Oppenheimer et Snyder l'observèrent dans leur article, l'étoile qui s'effondre «tend à se fermer à toute communication avec un observateur distant ; seul persiste son champ gravitationnel». Autrement dit, un trou noir s'est formé.

Que voit, d'autre part, l'observateur rivié à l'étoile qui se contracte ? Pour lui, le rayon de Schwarzschild n'a pas de signification spéciale. Il le traverse et, en l'espace de quelques heures à sa montre, il atteindra le centre. Cependant, quelques temps après cette traversée, il subira des forces de marées considérables qui le mettront en pièces.

En 1939, le monde était lui-même sur le point d'être mis en pièces. Oppenheimer partit bientôt construire l'arme la plus destructive jamais conçue par l'homme, et il ne repréoccupait jamais plus sur les trous noirs. À ma connaissance, Einstein non plus. En 1947, la paix revenue, Oppenheimer devint directeur de l'Institut des études avancées de Princeton, où Einstein était encore professeur. Parfois ils discutaient, mais rien n'indiquait qu'ils aient parlé de trous noirs. Les progrès devront attendre les années 1960, où la découverte des quasars, des pulsars et des sources compactes de rayons X ravivèrent la réflexion sur le destin mystérieux des étoiles.

Jeremy BERNSTEIN est professeur de physique à l'Institut de technologie Stevens.

A. PAIS, *Albert Einstein : la vie et l'œuvre*, InterÉditions, 1993.

K. WALI, *Chandra : A Biography of S. Chandrasekhar*, University of Chicago Press, 1991.

J.-P. LUMINET, *Les trous noirs*, Seuil, 1992.

J. EISENSTAEDT, *Trajectoires et impasses de la solution de Schwarzschild*, in *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 37, p. 275; 1987.

J. EISENSTAEDT, *La préhistoire des trous noirs*, *Pour la Science*, février 1990.

K. SUGIMOTO, *Albert Einstein, biographie illustrée*, Belin, 1990.

J. SCHWINGER, *L'héritage d'Einstein*, Belin, 1988.

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.

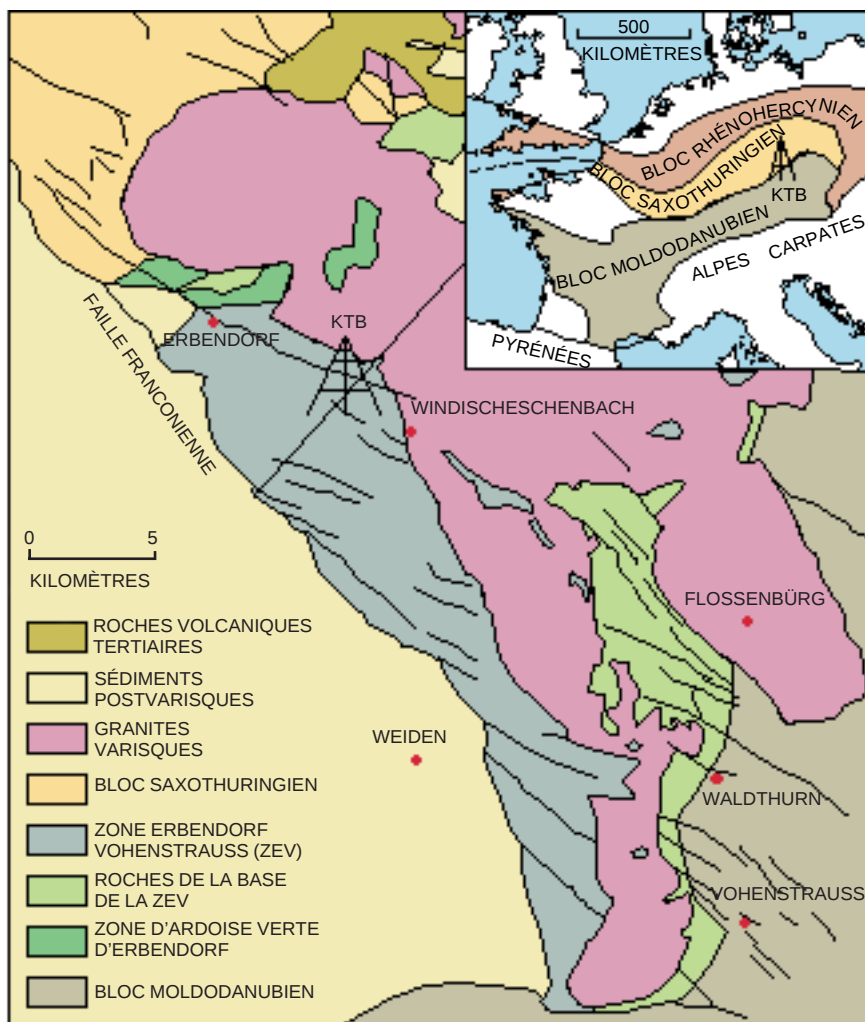
Afin de stabiliser le trou de forage et d'éviter les chutes de roches à partir des niveaux supérieurs, un chemisage était placé chaque fois que 3 000 mètres avaient été percés. La verticalité parfaite du trou de forage permit de réduire à 15 millimètres le jeu entre le tubage et la paroi (dans les forages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

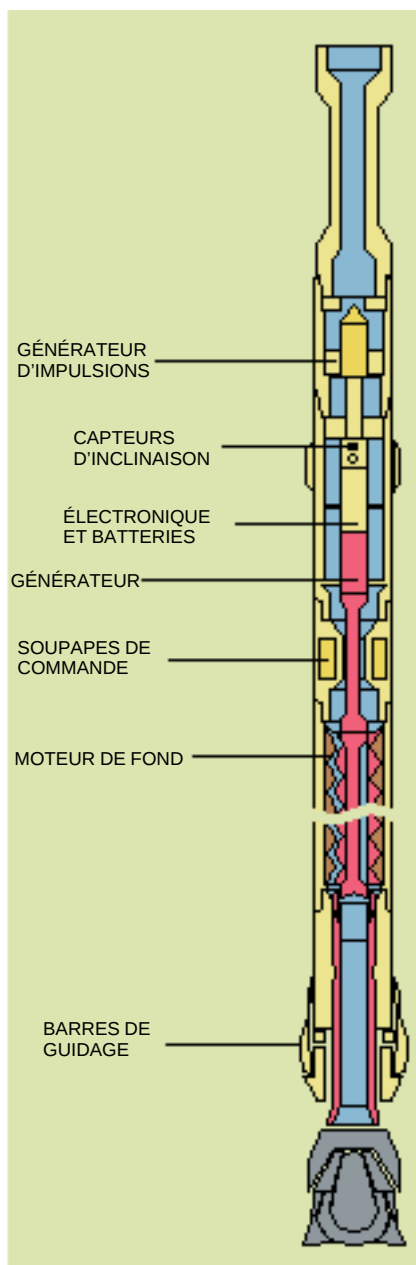
Ce métamorphisme se produisit il y a environ 410 à 380 millions d'années, mais les premières transformations minéralogiques, principalement sous l'effet de la pression, semblent dater de 480 millions d'années, pendant l'Or-

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.



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 révéla 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.

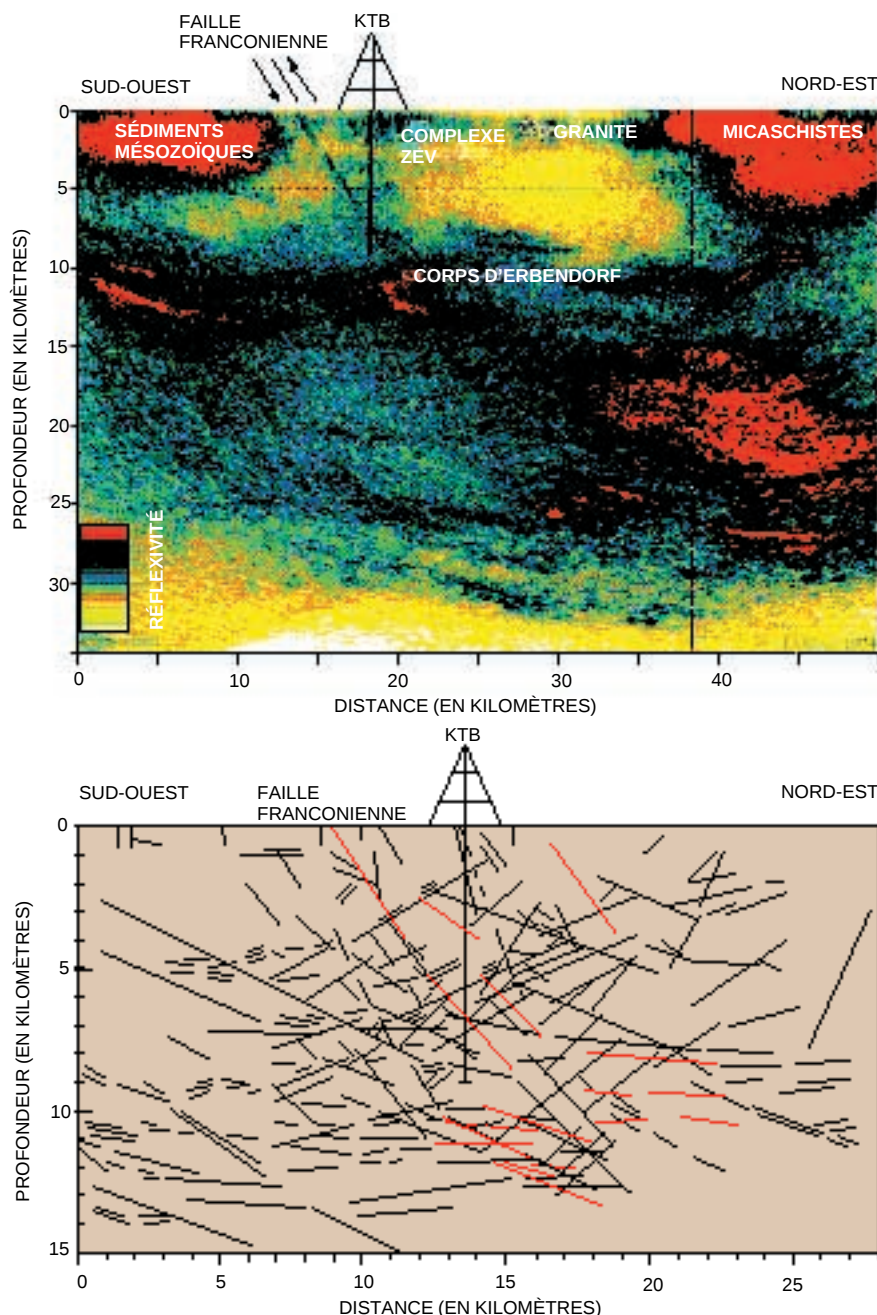
Les réflecteurs inclinés pouvaient être directement reliés à des zones de perturbation détectables en surface ; aussi avait-on supposé qu'ils étaient des prolongements de ces perturbations. Le réflecteur le plus intense, qui plonge selon un angle de 55 degrés vers le Nord-Est, semble correspondre, en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

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.

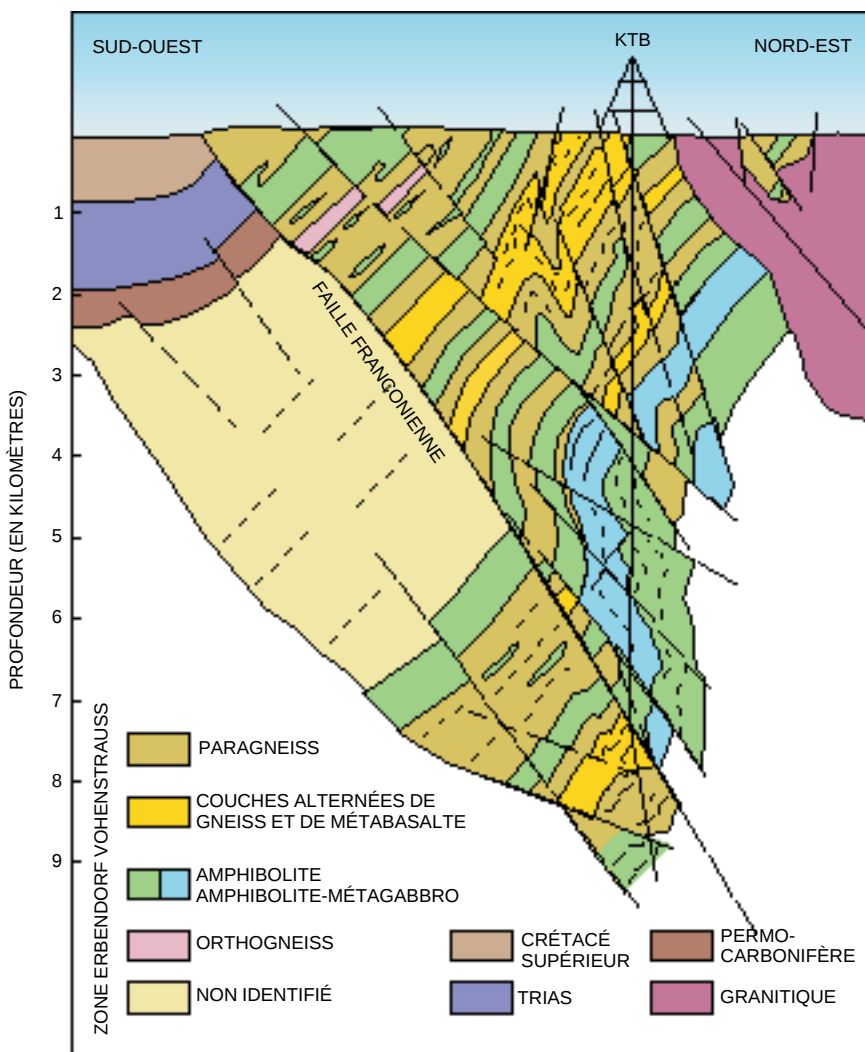
Des sondages électromagnétiques effectués dans les environs du site de forage, avant et après le forage, ont également retrouvé les horizons conducteurs proches de la surface. Ils ont montré que le trou de forage se trouve situé près d'une anomalie du potentiel électrique qui court du Nord-Ouest au Sud-Est : 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.

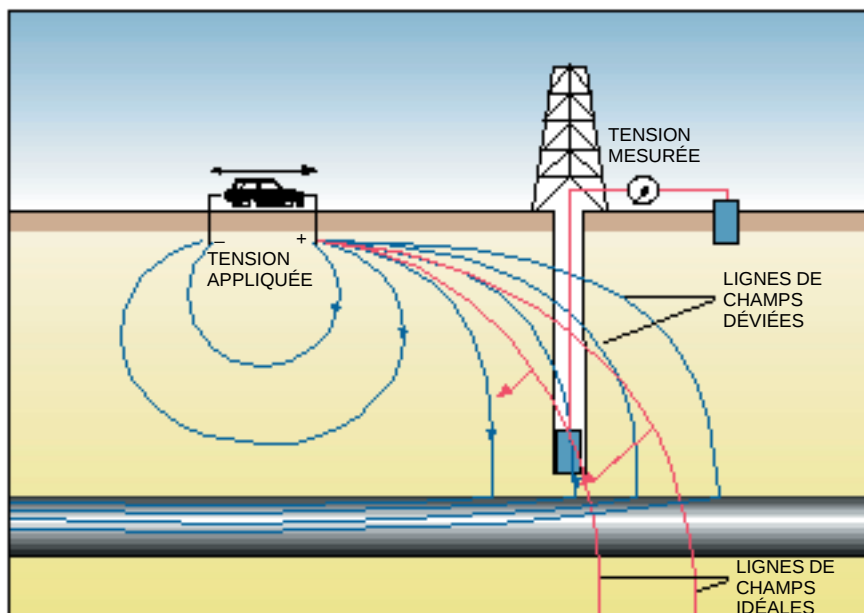
La pyrrhotine naturelle est ferromagnétique, avec une température de Curie (la température à partir de laquelle l'aimantation s'annule) d'environ 315 °C. Aux températures un peu inférieures, l'aimantabilité de tels minéraux augmente généralement de manière très forte. Au fond du puits de forage, où règne 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 Erbendorf 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.
