



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 trépans 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