



Origin and significance of relaxation fractures in EPS1 granite core sections (Soultz-sous-Forêts, Rhinegraben)

Chrystel Dezayes, Thierry Villemin, Albert Genter, Jacques Angelier

► To cite this version:

Chrystel Dezayes, Thierry Villemin, Albert Genter, Jacques Angelier. Origin and significance of relaxation fractures in EPS1 granite core sections (Soultz-sous-Forêts, Rhinegraben). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, 1996, 323, pp.333-340. hal-03997249

HAL Id: hal-03997249

<https://brgm.hal.science/hal-03997249>

Submitted on 20 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Origine et signification des fractures de relaxation dans les carottes de granite du forage EPS1 (Soultz-sous-Forêts, Graben du Rhin)

Chrystel Dezayes, Thierry Villemin, Albert Genter et Jacques Angelier

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 323, série II a,
p. 333 à 340,
1996

Résumé La fracturation du site a été analysée sur des carottes d'un forage profond dans le socle granitique chaud et fracturé du fossé rhénan à Soultz-sous-Forêts (projet européen de géothermie profonde). Deux catégories de fractures, l'une antérieure, l'autre contemporaine ou postérieure au carottage, ont été mises en évidence. Les fractures préexistantes montrent une organisation conjuguée en failles normales liée à l'ouverture oligocène du fossé. Les fractures postérieures apparaissent par relaxation des carottes ; nous démontrons qu'elles reflètent une fracturation latente liée à l'extension oligocène. De telles fractures se formant par relaxation sont donc dépendantes, par leur orientation et par leurs mécanismes, de l'histoire tectonique du massif rocheux et pas seulement des phénomènes actuels (contraintes *in situ* et forage).

Mots-clés : Graben du Rhin, Forages, Carottes, Fractures, Granite, Contraintes, Endommagement.

Ch. D. et Th. V. : Laboratoire
de Géodynamique
des Chaînes Alpines
et UPRES-A CNRS 5025,
Université de Savoie,
73376 Le Bourget-du-Lac,
France ;

A. G. : BRGM, DR, GIG, BP n° 6009,
45060 Orléans CEDEX 2, France ;

J. A. : Département
de Géotectonique et URA 1759,
Université Pierre-et-Marie-Curie,
Boîte 129, 75252 Paris CEDEX 5,
France.

Abstract Origin and significance of relaxation fractures in EPS1 granite core sections (Soultz-sous-Forêts, Rhinegraben)

Detailed analysis of fracture patterns was carried out in the granite core sections of a deep borehole, which reached the hot and fractured granitic basement of the Rhinegraben at Soultz-sous-Forêts (European Geothermal Project). Two main types of fractures were identified, respectively older than and subsequent to drilling. Most pre-existing fractures show a conjugate, normal fault type pattern which reflects the conditions of the Oligocene graben opening. The other types of fractures are revealed by core relaxation. We demonstrate that they correspond to a latent fracturing due to the same Oligocene extension. Such development of relaxation fractures during core extraction may thus be strongly influenced by the tectonic history of the rock massif, and not by the present-day stress and drilling conditions exclusively.

Keywords: Rhinegraben, Wells, Drill-cores, Fractures, Granite, Stress, Damaging.

Abridged English Version INTRODUCTION

WITHIN the framework of the European Hot Dry Rock (HDR) program, two deep boreholes were drilled in the upper Rhinegraben at Soultz-sous-Forêts (fig. 1) (Garnish *et al.*, 1994).

Based on observations on the cores, Genter and Traineau (1991) created a data base of 3,700 oriented fractures. They distinguished two categories of fractures which differ in origin: faults or veins, and thin cracks. The first type of fractures, formed during the tectonic

Note

présentée par
Jean Dercourt.

remise le 4 juillet 1995,
acceptée après révision
le 29 janvier 1996.

history of the granite massif prior to drilling, whereas the cracks appeared during or after coring due to changes in pressure and temperature conditions.

Whether the orientation of these relaxation fractures is controlled by the present state of stress or by the previous tectonic history is the subject of this paper.

I. CHARACTERISTICS OF RELAXATION FRACTURES

The thin cracks observed in the cores do not show any observable displacement or hydrothermal infill. They may develop several days after core extraction. Such relaxation fractures are more abundant where the density of pre-existing fractures is low (fig. 2). These fractures cut across the core.

In terms of attitudes, there are typically two sets with the same dip and opposite dip directions. The dip is constant and steep, but generally shallower than that of the pre-existing fractures (fig. 2). This distribution resembles that of conjugate normal faults. The average direction of relaxation fractures rotates clockwise with increasing depth, from N-S to NE-SW (fig. 2, R). Remarkably, the trend of the main set of pre-existing fractures also rotates clockwise with depth (fig. 2, P). Considering these similarities in geometrical distribution, the two types of fractures cannot be considered independent.

II. ORIGIN OF RELAXATION FRACTURES

In terms of strikes and dips, the relaxation fractures show a typical distribution, normal-conjugate in type. If these fractures have been created by the alone decompression phenomenon, in an isotropic rock previously submitted to isotropic stress, we would expect randomly oriented fractures to develop, which is not the case. Because the present-day state of stress at shallow depth is dominated by subvertical maximum compressive stress (Rummel and Baumgärtner, 1991) with σ_H N120°E-N160°E (Tenzer *et al.*, 1991 and 1992), vertical dilatation would also be expected due to stress drop in cores; however, horizontal or shallow dipping relaxation fractures are scarce in the cores (fig. 2, R). In contrast, steeply dipping relaxation fractures are abundant and form a

typical conjugate normal fault pattern (fig. 2, R).

We conclude that although fractures are revealed by relaxation phenomena, their occurrence and attitude are controlled by rock anisotropy. This anisotropy does not correspond to any magmatic grain orientation, the petrographic fabric is too weak (Schulmann *et al.*, 1993); it rather reflects a hidden, latent fracturing induced by a stress state which affected the batholith for a long time-span and explains the particular orientation of these weakness zones.

According to this interpretation, the conjugate pattern of fractures does not correspond to the release of the present-day stress state, but reflects the orientation of the principal stress axes of this old tectonic regime. Surprisingly, in the cores studied, the geometry of relaxation fractures is apparently controlled by a paleostress regime, more than by the present-day stress. This observation is consistent with some discrepancies between the *in situ* stress states reconstructed at Soultz-sous-Forêts.

III. INFLUENCE OF TECTONIC HISTORY

Dezayes *et al.* (1993 and 1995) computed paleostress tensors providing by inversion of fault-slip data collected in the cores. In general terms, an E-W tension state was thus reconstructed, which included two successive substates: (a) a strike-slip and (b) a pure distension. The E-W extension regime corresponds to the Oligocene Rhinegraben opening, starting at the end of the Eocene. The last tectonic regimes identified from such fault slip analyses are strike-slip in type. The σ_1 axis was horizontal, trending N70°E (c) and N120°E (d) in the borehole.

Fractures formed by the compressional regimes, (a), (c) and (d), are nearly vertical and the probability for their sampling in a subvertical borehole is low. These fractures are effectively uncommon in the cores (fig. 2, P). In contrast, the normal faults created by extension (b) display moderate dips which facilitate their sampling in a vertical borehole. This is also the case for the related veins and fractures which display normal-conjugate type patterns, as pointed out in the

cores (fig. 2, P). Most of these fractures correspond to the Oligocene extensional episode.

CONCLUSION

The fractures in the cores, for both the pre-existing and the relaxation fracturing, principally correspond to the Oligocene extensional event, that is, the main stage of formation of the Rhinegraben. The compressional states remain under-represented in fracture patterns in cores, first because nearly vertical fractures are unlikely to be met in vertical drilling, and second because these events are less important in terms of magnitude. However, vertical strike-slip faults are common in the Mesozoic sedimentary cover (Villemin, 1986), where they are

commonly inherited from older faults. For the relaxation fractures, one should also consider that during and after core extraction a higher energy is needed for fracturing along vertical planes (parallel to core axis) than for horizontal and oblique ones.

The examples described in the present paper show that relaxation fractures, which develop at present during stress drop and thermal changes during core extraction, may reflect ancient stress states and should not be interpreted in terms of present-day *in situ* stress solely. Conversely, the analysis of such relaxation fractures may provide valuable information on the tectonic evolution of the rock massif.

INTRODUCTION

Dans le cadre du programme européen de géothermie profonde, deux forages profonds ont été réalisés de 1987 à 1992, sur le site de Soultz-sous-Forêts dans le Bas-Rhin (Garnish *et al.*, 1994). Le premier puits, GPK1 (Kappelmeyer *et al.*, 1991), a été foré jusqu'à -3 600 m. Dans le second forage, EPS1 (fig. 1), le granite tardi-hercynien a été carotté en continu jusqu'à une profondeur de -2 227 m (Genter et Traineau, 1992). La présente Note traite des données de ce forage.

Par observation des carottes de granites du puits EPS1, Genter et Traineau (1991 et 1992) ont établi une base de données pour environ 3 700 fractures orientées. Ces fractures, de différents types, peuvent être regroupées en deux catégories : des fractures bien développées (fentes de tension et failles) le plus souvent remplies de dépôts hydrothermaux, contrastant avec des cassures très fines, ne présentant ni déplacement notable, ni remplissage hydrothermal. Les fractures de la première catégorie sont anciennes et résultent de l'histoire tectonique du batholite granitique ; celles de la seconde catégorie reflètent une fracturation se développant pendant ou après le découpage des carottes, sous l'effet des change-

ments de pression et de température, associés à la remontée en surface.

L'étude des fractures antérieures au forage a permis de reconstituer l'évolution des paléocontraintes dans le socle granitique, donc de comprendre l'organisation finale du système de fractures dans le massif granitique (Genter, 1990 ; Dezayes *et al.*, 1993 et 1995 ; Genter *et al.*, 1995). Dans la présente Note, ce sont les fractures apparues syn- ou post-carottage, que nous cherchons à interpréter. Leur apparition, liée à des relaxations instantanées à l'échelle géologique, peut être contrôlée uniquement par l'état de pression/température actuel (simple effet de relaxation thermomécanique) ; elle peut aussi être conditionnée par l'histoire tectonique antérieure (fragilisation par endommagement). Nous examinerons les causes possibles, puis l'éventuelle signification géologique de cette fracturation.

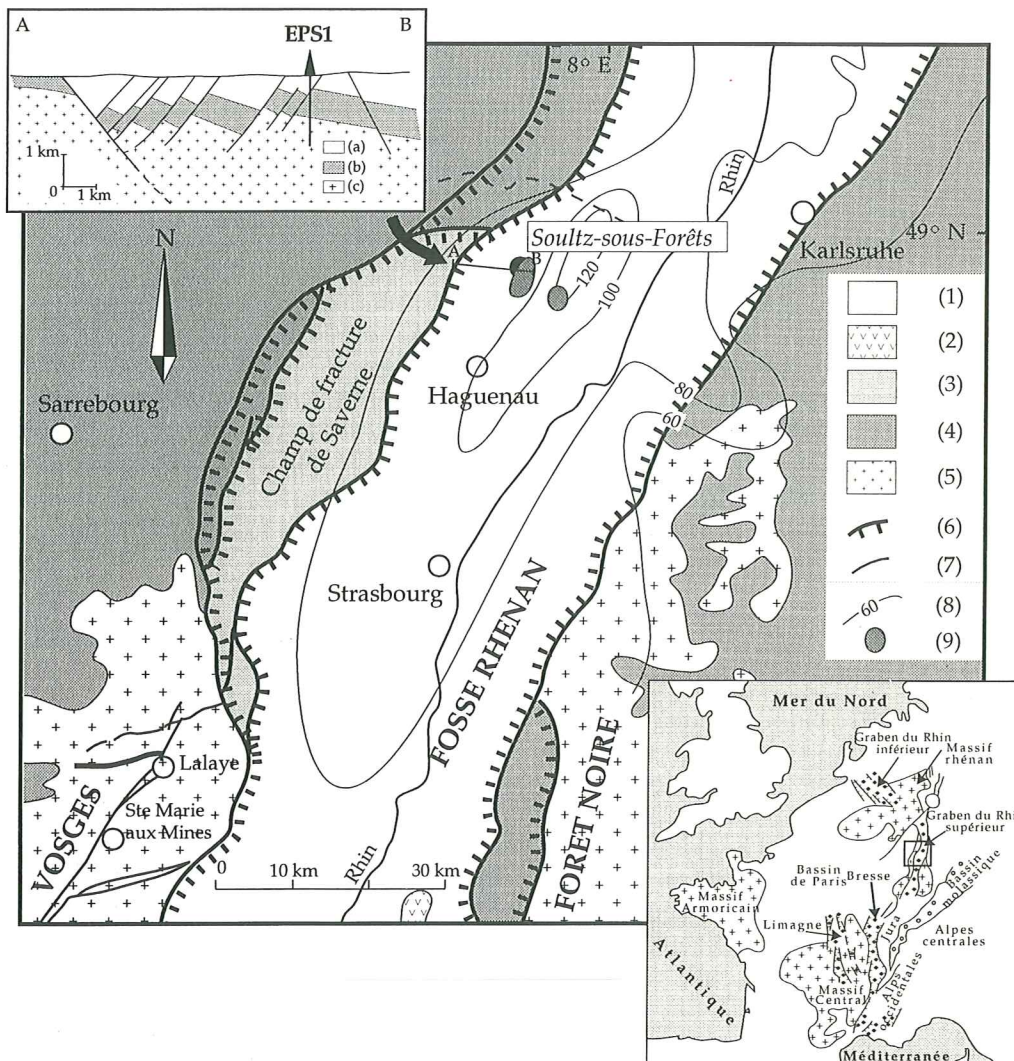
I. CARACTÉRISTIQUES DES FRACTURES DE RELAXATION

Les cassures fines observées sur les carottes ne présentent ni signe de déplacement éventuel, ni témoin de circulation de fluides. Elles ne découpent généralement pas la totalité de la carotte. La carotte est rarement rompue, et ces structures se déve-

Fig. 1 Localisation du site géothermique de Soultz-sous-Forêts dans le fossé rhénan, à l'aplomb du pic de l'anomalie thermique régionale. (1) remplissage sédimentaire cénozoïque ; (2) volcanisme cénozoïque ; (3) Jurassique ; (4) Trias ; (5) socle hercynien ; (6) failles bordières ; (7) failles ; (8) isothermes à 1 500 m de profondeur (températures en °C) ; (9) anomalies thermiques locales. ((8) et (9) d'après l'Atlas Géothermique de l'Europe, 1980). Coupe A-B : (a) remplissage sédimentaire cénozoïque ; (b) sédiments mésozoïques ; (c) socle granitique se situant sous environ 1 400 m de sédiments.

Location of the geothermal drill site of Soultz-sous-Forêts, Rhinegraben, above the peak of thermal anomaly.

(1) Cenozoic filling sediments; (2) Cenozoic volcanism; (3) Jurassic; (4) Trias; (5) Hercynian basement; (6) border faults; (7) faults; (8) temperature distribution at 1,500 m depth (in °C); (9) local thermal anomalies. ((8) and (9) in l'Atlas Géothermique de l'Europe, 1980). Cross-section A-B: (a) Cenozoic filling sediments; (b) Mesozoic sediments; (c) granite basement under 1,400 m of sediments.



loppent préférentiellement aux dépens des mégacrists de feldspath potassique. Lorsque la carotte se casse, les surfaces de fractures apparaissent fraîches, sans altération, et les grains de la roche sont nets. L'aspect est comparable à celui obtenu en fracturant le granite au marteau. Sur les 810 m de carottes de granite, 635 fractures de ce type (soit 1/5 de l'ensemble des fractures) ont été observées et orientées par Genter et Traineau (1992). Nombre de ces fractures sont apparues seulement après plusieurs jours de relaxation des carottes. D'après leur aspect morphologique, les fractures de relaxation que nous avons observées sont différentes des fractures verticales induites décrites par

Daneshy (1973) et Lorenz *et al.* (1990) (« scribe-line fractures », Lorenz *et al.*, 1990). Elles apparaissent plutôt comme des « petal fractures » décrites par Lorenz *et al.* (1990).

Ces fractures de relaxation sont plus abondantes dans les tronçons où la densité des fractures pré-existantes est faible (fig. 2). Dans les tronçons où la densité de fracturation est élevée, la relaxation s'opère probablement sur les plans pré-existants et n'est donc pas « visible ». Lorsque le lot de données est de taille significative (fig. 2, 2R à 4R), les fractures de relaxation s'organisent en deux familles de mêmes inclinaisons et de directions de plongement opposées (fig. 2, 2R à 4R). Les inclinaisons, fortes

pour les deux familles et constantes en profondeur, sont en moyenne plus faibles, d'une dizaine de degrés, que celles des fractures pré-existantes (fig. 2, 1, 3 et 4). Remarquablement, la disposition de ces fractures de relaxation est similaire à celle de failles normales conjuguées.

La direction moyenne du système de fractures de relaxation est N-S à NE-SW ; en fait, elle varie graduellement de $N0^{\circ}E \pm 5^{\circ}$, dans la partie supérieure du puits, à $N40^{\circ}E$ en fond de puits (fig. 2). Par ailleurs, la dispersion des orientations de ces fractures se fait autour d'un axe vertical dans la partie supérieure du forage, mais autour d'un axe horizontal dans la partie inférieure.

Comparant ces fractures de relaxation aux autres fractures, on note que les fractures anciennes présentent, elles aussi, une variation de direction dans le sens horaire quand la profondeur augmente. Dans la partie supérieure du puits, leur direction est principalement $N350^{\circ}E$ (fig. 2, 1P), puis elle passe à $N0^{\circ}E$ (fig. 2, 2P), enfin à $N20^{\circ}E$ (fig. 2, 3P et 4P). Cette ressemblance dans les évolutions directionnelles ne permet pas de considérer comme totalement indépendants les deux types de fractures.

II. ORIGINE DES FRACTURES DE RELAXATION

Les fractures de relaxation sont donc clairement orientées. Leur organisation présente une forte analogie avec celle des fractures anciennes. Si ces fractures de relaxation provenaient seulement du relâchement des contraintes actuelles (par décompression de la carotte), leur géométrie serait probablement celle d'un système de fentes horizontales et de failles inverses plates. En effet, les mesures de contrainte *in situ* (Rummel et Baumgärtner, 1991) montrent qu'aux profondeurs étudiées, l'axe σ_1 est vertical (le passage à un axe σ_1 horizontal ne s'opère qu'à des profondeurs supérieures à 2 500 m selon ces auteurs). La direction de σ_1 est comprise entre $N120^{\circ}E$ et $N160^{\circ}E$ dans le puits EPS1 (Dezayes et al., 1995 ; Tenzer et al., 1992). Or, très peu de fractures plates ont été observées parmi les fractures de

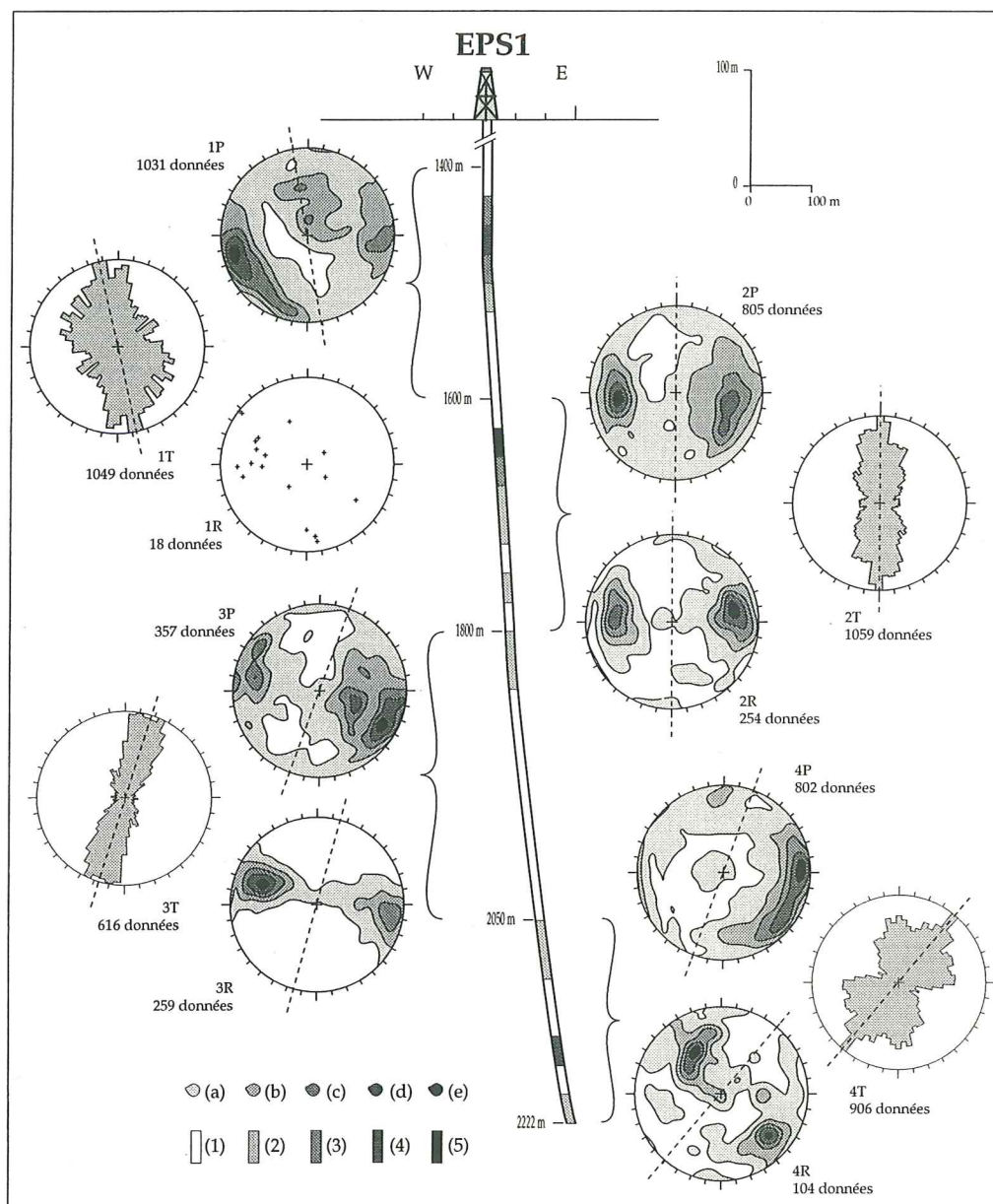
relaxation (fig. 2, R). Au contraire, les fractures de relaxation sont très inclinées et suggèrent plutôt une organisation en deux systèmes semblable à celle des failles normales conjuguées (fig. 2, R). Nous concluons que la seule relaxation des contraintes actuelles ne peut expliquer l'organisation orientée des fractures. De plus, dans le matériau à peu près isotrope, le choc thermique lié à l'extraction, qui en l'absence de contraintes produirait des fractures aléatoires diversement orientées, ne peut expliquer cette organisation géométrique.

Ces arguments conduisent à admettre que ces fractures syn- ou post-carottage, clairement orientées, se développent suivant des orientations préexistantes. Il existe donc, dans la roche, une anisotropie qui oriente les nouveaux plans de rupture apparaissant sous l'effet du relâchement des contraintes et du choc thermique. Cette anisotropie ne peut être d'origine magmatique, car la fabrique minérale du granite est très faible (Genter et Traineau, 1992 ; Schulmann et al., 1993). Il s'agit d'une fracturation latente, liée au séjour de la roche sous contrainte à l'intérieur du batholite. Plus précisément, nous envisageons la présence d'une série de microfractures et de zones de faiblesse, à l'échelle de l'assemblage des grains cristallins. L'orientation de ces zones de faiblesse a été contrôlée par le champ de contrainte ambiant, au moment de leur formation. Nous arrivons à la conclusion que de telles fractures, pourtant apparues très récemment, résultent de paléocontraintes. Leur organisation nous renseigne donc directement sur l'orientation des paléocontraintes à l'origine de l'endommagement.

III. INFLUENCE DE L'HISTOIRE TECTONIQUE

Dezayes et al. (1993 et 1995) ont reconstitué les paléo-tenseurs de contrainte, à l'origine des populations de failles striées, observées sur les carottes du puits EPS1. Un régime de tension E-W (axe σ_3 horizontal E-W) a ainsi été mis en évidence. Il peut être décomposé en (a) un épisode compressif décrochant avec un axe σ_1 , horizontal dirigé N-S et (b) un épisode de distension pure

Fig. 2 Analyse des orientations de fractures visibles sur quatre parties du forage EPS1. (T) totalité des plans observés sur les carottes (diamètre proportionnel au maximum de fréquence, intervalle angulaire de 5°). Diagrammes en courbes d'iso-densité (projection de Schmidt, hémisphère inférieur) : (P) fractures pré-existantes ; (R) fractures de relaxation (les plages d'iso-densité sont à (a) 10 %, (b) 30 %, (c) 50 %, (d) 70 % et (e) 90 % du maximum de fréquence). Nuances de gris sur le puits : différences de densité de fracturation (incluant les fractures préexistantes et de relaxation) (1) moins de 4 fractures/m, (2) de 4 à 8 fractures/m, (3) de 8 à 12 fractures/m, (4) de 12 à 16 fractures/m, (5) plus de 16 fractures/m (données : Genter et Traineau, 1991).



avec un axe σ_1 vertical. Ce régime de tension E-W reflète les conditions de l'ouverture du fossé rhénan à partir de la fin de l'Éocène. Deux régimes de contrainte compressifs décrochants lui ont succédé au Cénozoïque supérieur, avec un axe de paléo-contrainte σ_1 subhorizontal de direction N70°E (c) au Miocène, puis N120°E (d) à partir du Miocène supérieur dans le puits EPS1.

Les régimes (a), (c) et (d) sont responsables du jeu décrochant de nombreuses

fractures héritées et de la création de décrochements conjugués, alors que le régime (b) correspond aux failles normales. Les fractures néoformées des épisodes décrochants (a), (c) et (d) sont subverticales, donc la probabilité d'échantillonnage par un forage subvertical est faible : elles sont effectivement peu représentées dans les carottes (fig. 2, P). Les failles normales créées par l'épisode (b) ont une inclinaison voisine de 60°, favorisant leur échantillonnage en forage subvertical.

Entre 1 600 et 1 800 m, les fractures préexistantes s'organisent à la manière d'un système de failles normales conjuguées, de direction N-S (**fig. 2, 2P**) ; nous les associons au régime distensif E-W (*b*) à l'origine de failles normales. Plus bas, la direction moyenne de ces fractures devient N20°E (**fig. 2, 3P et 4P**), mais le tenseur des paléocontraintes calculé d'après les jeux de failles de la distension (*b*) varie peu (Dezayes *et al.*, 1995). Les fractures préexistantes et les fractures de relaxation tournent conjointement et de façon continue entre le sommet et la base du puits (**fig. 2**). Ces variations directionnelles pourraient être attribuées à la proximité d'une faille majeure, comme cela a déjà été observé sur d'autres sites (Barton et Zocack, 1994) ; le point important est qu'elles affectent à la fois les fractures anciennes et les fractures de relaxation (Dezayes *et al.*, 1995 ; Genter *et al.*, 1995). Une zone de faille *a*, par ailleurs, été recoupée par deux des forages.

La disposition des fractures de relaxation, semblable à celle des failles normales (**fig. 2, P**), suggère un endommagement résultant de l'épisode de distension (*b*), à l'origine de la structuration du graben du Rhin.

CONCLUSION

La fracturation récente des carottes de granite du puits EPS1, provoquée par la relaxation lors de l'extraction, correspond en fait à une fracturation latente qui trouve son origine dans l'épisode de distension oligocène, responsable de la formation du graben du Rhin. Les autres épisodes compressifs décrochants ne peuvent pas être mis en évidence par la seule analyse des fractures de relaxation, en raison de l'absence de fracture de relaxation subverticale. Or, les décroche-

ments sub-verticaux sont très représentés en surface, dans les terrains de la couverture sédimentaire mésozoïque (Villemin, 1986). Leur rareté sur les carottes s'explique en partie par un sous-échantillonnage : le forage est vertical et recoupe rarement des fractures verticales, même nombreuses.

Trois autres explications de l'absence de fractures de relaxation verticales peuvent être invoquées. Premièrement, l'énergie nécessaire à l'apparition d'un plan parallèle à l'axe de la carotte est élevée, car la surface de rupture créée est plus importante que pour une rupture oblique : la fracturation latente verticale, si elle existe, s'exprime donc mal lors de l'extraction. Deuxièmement, les régimes compressifs décrochants, moins intenses que le régime extensif, ont pu être moins favorables au développement d'une fracturation latente. Troisièmement, lors des compressions tardives, l'état de fracturation de la roche était tel que le jeu des failles préexistantes suffisait à relâcher l'énergie, inhibant le développement de nouvelles fractures et préservant les blocs de granite non fracturés.

Cet exemple montre que l'interprétation de telles fractures, apparaissant actuellement lors de l'extraction de carottes de forage, ne peut être dissociée de la connaissance non seulement de l'état de contrainte actuel, mais aussi des paléocontraintes responsables de l'évolution du massif rocheux (*cf.* partie III). Réciproquement, de telles observations peuvent fournir, sur cette évolution tectonique, de précieuses informations. Enfin, la fracturation latente que nous avons observée sur les carottes ne doit pas être confondue avec la fracturation induite (Dezayes *et al.*, 1995 ; Tenzer *et al.*, 1991 ; Tenzer *et al.*, 1992) observée sur les parois de forages et résultant d'un effet direct des contraintes actuelles.

Remerciements. Les auteurs remercient la Société Socomine et A. Gérard pour l'accueil sur le site et la mise à disposition des carottes du forage EPS1 et le BRGM pour son soutien financier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Atlas géothermique de l'Europe*, 1980. CCE EUR 6578 EN, R. Haenel.
- BARTON, C.A. et ZOBACK, M.D., 1994. Stress perturbations associated with active faults penetrated by boreholes: Possible evidence for near-complete stress drop and a new technique for magnitude measurement, *J. Geoph. Res.*, 99, B5, p. 9373-9390.
- DANESHY, A.A., 1973. A study of inclined hydraulic fractures, *Soc. Pet. Eng. J.*, 13, p. 61-68.
- DEZAYES, C., VILLEMIN, T., GENTER, A., TRAINÉAU, H. et ANGELIER, J., 1993. Paleostress analysis from fault and fracture geometry in the Hot Dry Rock boreholes at Soultz-sous-Forêts (Rhinegraben), *Terra Nova*, 5, p. 217.
- DEZAYES, C., VILLEMIN, T., GENTER, A., TRAINÉAU, H. et ANGELIER, J., 1995. Analysis of fractures in boreholes of Hot Dry Rock project at Soultz-sous-Forêts (Rhine graben France), *J. Sc. Drilling*, 5, p. 31-41.
- GARNISH, J., BARIA, R., BAUMGÄRTNER, J. et GÉRARD, A., 1994. The European Hot Dry Rock programme 1994-1995. Annual Meeting of Geothermal Resources Council, Salt Lake City, 2-5 October, 1994, *Geothermal Resources Council Trans.*, 18, 8 p.
- GENTER, A., 1990. Géothermie roches chaudes sèches : Le granite de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin, France). Fracturation naturelle, altérations hydrothermales et interaction eau-roche, *Thèse*, Université d'Orléans, Doc. BRGM, 185, 201 p.
- GENTER, A. et TRAINÉAU, H., 1991. Geological survey of the HDR borehole EPS1, Soultz-sous-Forêts, Alsace, France, Rapport BRGM-IMRG, R32433.
- GENTER, A. et TRAINÉAU, H., 1992. Borehole EPS1, Alsace, France: preliminary geological results from granite core analyses for Hot Dry Rock research, *Scientific Drilling*, 3, p. 205-214.
- GENTER, A., TRAINÉAU, H., DEZAYES, C., ELSASS, P., LEDESERT, B., MEUNIER, A. et VILLEMIN, T., 1995. Fracture analysis and reservoir characterization of the granitic basement in HDR Soultz project (France), *Geotherm. Sci. & Tech.*, 4, 3, p. 189-214.
- KAPPELMEYER, O., GERARD, A., SCHLOEMER, W., FERRANDES, R., RUMMEL, F. et BENDERITTER, Y., 1991. European HDR Project at Soultz-sous-Forêts, general presentation, *Geotherm. Sci. & Tech.*, 2, 4, p. 263-289.
- LORENZ, J.C.S., FINLEY, J. et WARPINSKI, N.R., 1990. Significance of coring-induced fractures in Mesaverde core, Northwestern Colorado, *AAPG Bull.*, 74, 7, p. 1017-1029.
- RUMMEL, F. et BAUMGÄRTNER, J., 1991. Hydraulic fracturation measurements in the GPK1 borehole, Soultz-sous-Forêts, *Geotherm. Sci. & Tech.*, 3(1-4), p. 119-148.
- SCHULMANN, K., MELKA, R. et VENERA, Z., 1993. Study of the magmatic preferred orientation in the borehole EPS1, Soultz-sous-Forêts, France, Rapport du Département de Pétrologie, Charles University Prague, 38 p.
- TENZER, H., MASTIN, L. et HEINEMANN, B., 1991. Determination of planar discontinuities and borehole geometry in the crystalline rock of borehole GPK1 at Soultz-sous-Forêts, *Geotherm. Sci. & Tech.*, 3, 1-4, p. 31-67.
- TENZER, H., BUDEUS, P. et SCHELLSCHMIDT, R., 1992. Fracture analyses in Hot Dry Rock drillholes at Soultz and Urach by borehole televiewer measurements, *Geothermal Resources Council Trans.*, 19, p. 317-321.
- VILLEMIN, T., 1986. La chronologie des événements tectoniques dans le Nord-Ouest de la France et le Sud-Est de l'Allemagne du Permien à l'Actuel, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 303, série II, p. 1685-1690.