

document public

*Synthesis of geological and geophysical
data at Soultz-sous-Forêts (France)*

avril 1997
R 39440



document public

Synthesis of geological and geophysical data at Soultz-sous-Forêts (France)

A. Genter, H. Trainea, D. Artignan

avril 1997
R 39440



Mots clés : Hot Dry Rock, Geothermal well, Geological profile, Petrographic log, Alteration, Granite, Geophysical logs, Statistical analyses, Soultz-sous-Forêts, France

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

GENTER A., TRAINEAU H., ARTIGNAN D. (1997) Synthesis of geological and geophysical data at Soultz-sous-Forêts (France). Rapport BRGM R 39440, p. 36, 10 figures, 11 tableaux, 4 annexes.

ABSTRACT

This report focused on the synthesis of both geological and geophysical data collected in three deep wells drilled in the framework of the European Hot Dry Rock (HDR) Soultz project (France). Geological (direct) and well-logging (indirect) measurements obtained in the granitic section of the HDR reservoir are presented, analysed, and interpreted in terms of petrographic zonation.

In Well EPS1 (1420-2230 m), petrography, hydrothermal alteration, fracture content, rock chemistry as well as X-ray diffraction patterns were collected on core samples. Then, the main lithological crystalline facies as well as petrographic variations and altered granite facies were defined and thus compared with the available geophysical data (sonic log, radioactive log, induction log). This core-well logging calibration was carried out for defining relevant lithofacies in Well EPS1 with a significant emphasize on the differentiation between fractured zones and massive granite by application of statistical analyses. The main goal was to be able to reconstruct synthetic geological profiles for future non-cored holes based on indirect measurements only.

In well GPK1 (1420-3600 m) and GPK2 (1420-3880 m), geological information is mainly based on chip samples description excepted in the lower part of GPK2 (2110-3880 m) where there is no cutting (total mud losses during drilling). From cutting examination, some petrographic lithofacies were defined based on our previous experience of EPS1 cores. Then, multivariable analyses were applied to the available well-logging dataset.

As in the three wells, different well-logging data are available (sonic log, electric log, nuclear log, drilling rate, caliper), it is rather difficult to propose a general procedure for indirect reconnaissance of granite through well-logging datasets. However, through such as statistical techniques, vertical zonation which correspond to fractured zone interval or massive granite zone could be reconstructed properly.

In Wells GPK1 and EPS1, the distinction between fractured zone and massive granitic facies is well defined and well supported by synthetic log reconstruction procedure. In the deeper part of Well GPK2, fractured zones occurred but massive granitic facies are not so well expressed (2950 -3500 m depth). As gamma ray spectral logs (K content, U content, Th content) were not collected, it becomes problematic to provide a good petrographic zonation of Well GPK2. For characterizing the deep geology of the Soultz site, some recommendations are proposed for optimizing the choice of the most relevant geophysical measurements to be run in future drilled wells.

CONTENT

1. Introduction	9
2. The Soultz site overview	11
2.1. Geological setting	11
2.2. Drilling	11
2.3. The Soultz granite massive	11
3. Calibration between EPS1 core and well logging	13
3.1. Geological data	13
3.1.1. Data on the granite and petrographic variations	13
3.1.2. Data on fracturation	15
3.1.3. Data on granite alteration	17
3.2. Geological Well-Logging interpretation	19
3.2.1. Well-logging data presentation	19
3.2.2. Evaluation of Well-logging responses in Well EPS1	20
3.2.3. Average physical properties by lithofacies	22
3.3. Statistical analysis of core-well-log	23
3.4. Geological reconnaissance through indirect well-logging data	23
4. Synthetic log reconstruction in Well GPK1	25
4.1. Geological data	25
4.2. Well-logging data	26
4.3. Geological well logging data interpretation	26
4.4. Statistical analysis of the well-logging data in Well GPK1	26
4.5. Synthetic well-logging reconstruction	27
5. Synthetic log reconstruction in Well GPK2	29
5.1. Geological data	29

5.2. Well-logging data	29
5.3. Geological well logging data interpretation	29
5.4. Statistical analysis of well logging data in Well GPK2	31
5.5. Synthetic well-logging reconstruction	31
Conclusions	33
References	35
Figures	37
Tables	57
Appendices	71

LIST OF FIGURES

- Figure 1 - Flow diagram for reconnaissance of deep geology through well-logging data
- Figure 2 - Location of the Soultz site in the Rhine graben
- Figure 3 - Borehole network at Soultz
- Figure 4 - Synthetic composite log of EPS1 between 1420-2230 m from core data examination
- Figure 5 - Major chemical element content versus depth for petrographic variations in Well EPS1
- Figure 6 - Example of fractured zone in Well EPS1
- Figure 7 - Major chemical element content versus depth for altered-fractured facies in Well EPS1
- Figure 8 - Distribution of minerals in fracture fillings in Well EPS1
- Figure 9 - Well logging profile in Well EPS1
- Figure 10 - Geological and well logging profiles in Well GPK1
- Figure 11 - Composite geological log in Well GPK2

LIST OF TABLES

Table 1 - Geological and analytical data collected in EPS1 core sections

Table 2 - Lithofacies named based from EPS1 core analyses

Table 3 - Chemical composition of the standard granite and facies petrographic variations
(a) and of the altered fractured granite (b)

Table 4 - Diffraction RX results from bulk rock sample and mineral infilling analyses for
(a) pervasive alteration facies, (b) vein alteration facies and (c) low vein alteration
facies.

Table 5 - Well-logging data recorded in Well EPS1

Table 6 -Average value of physical parameters in Wells EPS1 and GPK1

Table 7 - Petrographic types encountered in Well GPK1

Table 8 - Key for estimating the vein alteration grade in the altered granite facies
observed in cutting samples of the GPK1 borehole

Table 9 - Well-logging data recorded in Well GPK1

Table 10 - X-Ray Diffraction results from cutting samples collected in Well GPK1

Table 11 - List of the geophysical well logs and borehole imagery carried out in Well
GPK2

LIST OF APPENDICES

Appendix 1: Photographic plates of macroscopic petrographic facies observed in Well EPS1. Horizontal and vertical scales are similar.

Plate 1: Macroscopic photographs of standard granite facies observed in Well EPS1:
(1) Grey-colored standard Soultz granite at 1748,50 m showing the significant size of the K-feldspar megacrysts and the occurrence of a small-size xenolite, (2) standard granite facies at 2140 m, and (3) standard granite at 1767,5 m showing a low degree of pervasive alteration (greenish color of plagioclase) and an early vein filled with clay minerals.

Plate 2: Macroscopic photographs of petrographic variations observed in Well EPS1:
(1) K-feldspar rich-granite at 1737 m, (2) xenolite facies at 1955,5 m and (3) xenolite facies at 1814,5 m.

Plate 3: Unrolled photograph of fractured facies observed in Well EPS1:
Brecciated and microbrecciated facies and oriented cataclasite (called protomylonite) observed between 1644,20 and 1645,06 m. Porphyritic granite-rock texture is completely destroyed.

Plate 4: Macroscopic photographs of fractured and hydrothermally altered facies observed in Well EPS1:
(1) Thick sealed fracture filled with calcite, hematite, illite and pyrite bordering hydrothermally altered granite at 1903,70 m, (2) quartz vein deposition associated with sulphides at 2155,30 m, (3) hydrothermally altered facies at 2159,30 m. Plagioclase are transformed into tosudite associated with organic matter and primary quartz are dissolved; and (4) wall-rock altered facies intersected by a thick quartz vein at 2173,60 m. Porphyritic-rock texture is conserved and primary quartz is not altered. Plagioclase and biotite are fully transformed into green to yellow colored-clay minerals (illite). K-feldspar megacrysts become orange but they are not cataclased.

Appendix 2: Lithological reconstruction of Well EPS1 from well logging data from Artignan (1994).

Appendix 3: Lithological reconstruction of Well GPK1 from well logging data from Artignan (1996).

Appendix 4: Lithological reconstruction of Well GPK2 from well logging data from Artignan (1996).

1. Introduction

The Soultz granite massive, which dedicated to Hot Dry Rock experiments (France), was penetrated by three deep wells. Well EPS1 was fully cored to 2230 m depth and Wells GPK1 and GPK2 were drilled down to 3600 m and 3880 m respectively. Core analyses were carried out in Well EPS1 in terms of petrography, hydrothermal alteration and fracturing [Traineau *et al.*, 1991, Genter and Traineau, 1991, 1992, 1996]. For the geothermal non-cored wells (GPK1, GPK2), direct reconnaissance of deep geology was possible through cuttings examination only based from ESP1 core examination expertise. Various additional well-logging data which represent continuous physical recording were collected in the three wells. Core represents finest resolution analysis (millimeter scale) by comparing with cuttings analysis (meter scale) which represent a linear volume of several metres of crushed-rock whereas well-logging measurements correspond to an intermediate resolution (0,15 m). In order to be able to produce geological profiles from non-cored wells for the future drilling operation, we propose (1) to correlate direct data (core analysis) and indirect measurements (well-logging data) for defining relevant lithofacies and (2) then to apply these correlations to drilled wells for producing geological synthetic logs (Figure 1).

Well-logging responses were analysed and interpreted in terms of petrophysical properties [Genter *et al.*, 1989; Traineau *et al.*, 1991 et 1992; Genter and Traineau, 1993b]. Statistical Multivariables Analysis (Hierarchical Ascending Classification, HAC) and Principle Component Analysis (PCA) were applied for evaluating the informations related to the different well-logging datasets [Artignan, 1993, 1996 and 1997]. Transfer laws between petrophysical and geological data were proposed from EPS1 analysis and then included into a general procedure of indirect granite reconnaissance through drilled wells. Then, a database of relevant lithofacies was defined at the scale of Well EPS1. Thus, this procedure was applied to the data collected into non-cored Wells GPK1 and GPK2 for that synthetic geological profiles were reconstructed even in the deeper part of GPK2 (2110-3880 m) where well-logging data were available only (total losses during drilling).

2. The Soultz site overview

2.1. GEOLOGICAL SETTING

The European Hot Dry Rock (HDR) geothermal drill site is located in the upper Rhine graben (Figure 2) at Soultz-sous-Forêts in France [Kappelmeyer *et al.* 1991; Garnish *et al.*, 1994], close to the former Pechelbronn oil field [Schnaebele, 1948]. This structure belongs to the Western European Cenozoic rift system, extending NNE-SSW over a distance of 300 km and a width of 30-40 km. The Rhine Graben has been tectonically active since the Late Eocene [Ziegler, 1992] with a marked subsidence rate. This Early Carboniferous pluton belongs to the Saxothuringian structural unit of Hercynian age. The site is located on a marked thermal anomaly, resulting in a temperature of 140°C at 2 km depth [Schellschmidt and Schulz, 1991]. The target for development of an artificial heat exchanger is the Soultz granite massif, locally covered by 1400 m of Triassic and Tertiary sedimentary formations. It is not exposed. Its large extent is deduced from gravity data and its thickness estimated over than 10 km from the intensity of the magnetic anomaly. From its cooling (325 Ma) until sub-Recent times, this massif has undergone both Late Hercynian tectonic activity and the Rhine graben deformation during the Alpine orogen.

2.2. DRILLING

In 1987, a first borehole, GPK1 (Figure 3), was drilled to 2 km depth, intersecting the top of the granite basement at 1376 m depth. Spot coring provided only 50 m-long core sections. Borehole EPS1 was initially drilled to 830 m in the 1950s for oil and gas exploration. In 1990, the well was re-opened and the first hundred meters (830 to 930 m) were drilled without coring. Continuous coring began at 930 m, continuing to the bottom with core diameters of 78 mm (930-1996 m), and 57 mm (1997-2227 m), providing 810 m of granite core for structural analysis and petrographic examination [Genter and Trainneau, 1992]. The top of the granite basement was reached at 1417 m. In 1992, GPK1 well has been deepened down to 3.6 km in the granite in destructive mode, except a 3 m-long core section at 3515 m depth [Genter *et al.*, 1995; Genter and Trainneau, 1993a]. In 1994, a third borehole named GPK2 was drilled until 3880 m depth [Genter and Tenzer, 1995]. Cuttings are available between 1410 to 2110 m depth only. Deeper, circulation losses during drilling prevent cutting recovery and there was no coring operation.

2.3. THE SOULTZ GRANITE MASSIVE

The most detailed information about the Soultz granite is provided by the analysis of the 810 m-long core sections recovered in Well EPS11 (Figure 4) and resumed below. The granite intersected by the three boreholes (EPS1, GPK1, GPK2) appears to be fairly homogeneous. It is a porphyritic granite with K-feldspar megacrysts ("KFM", < 5 cm in

size), quartz, plagioclase, biotite, hornblende, and accessory titanite and magnetite [Genter and Traineau, 1992]. Variations in K-feldspar-megacryst content are seen as KFM-rich granite or KFM cumulate, which rarely exceeds 1 to 2 m in thickness. Complete gradation occurs between these zones and the normal granite. K-spar-depleted granite also occurs. In Well GPK1, based on spot coring and analysis cuttings, petrography of the intersected granite is similar. In addition, biotite-rich granite facies and leucogranitic units were also evidenced [Traineau *et al.*, 1991]. In Well GPK2, cutting examination between 1410 to 2110 m confirms the identity of the Soultz massive, i.e. a porphyritic granite. Deeper, there is no cutting to determine the petrography.

The texture of the Soultz granite appears to be macroscopically isotropic from the random distribution of K-feldspar megacrysts that can be several centimeters in size. However, locally observed discrete magmatic foliation of primary biotite and hornblende probably reflects deformation during cooling of the batholith. The existence of magmatic fabric within the Soultz granite is also supported by the preferential orientation of fine-grained xenoliths scattered throughout the cored section. Their size commonly is less than the core diameter of 10 cm. Most have a magmatic origin and probably represent small batches of dioritic magma that crumbled into the granite magma chamber. Their orientation probably was acquired during cooling of the batholith. Two main types of hydrothermal alteration were observed in the core: an early stage of pervasive alteration and subsequent stages of vein alteration related to fracturing. At Soultz, the only significant feature which disrupts the homogeneity of the Soultz granite are fractured and altered zones, related to successive tectonic stage which affected the massive.

3. Calibration between EPS1 core and well logging

Detailed comparison between geological data collected on core and geophysical data collected in-situ may allow to calibrate well-logging responses in terms of lithological facies. The main goal is to be able to reconstruct synthetic geological profiles for future non-cored holes based on well-logging informations only. A core-well logging calibration was carried out for defining relevant lithofacies in Well EPS1 with a significant emphasize on the differentiation between fractured zones and massive granite.

Geological profiles are based on lithological facies description which includes qualitative parameters, e.g. primary mineral content, and quantitative parameters, e.g. fracture density. First, geological and well-logging data are presented, second, well-logging responses are analysed and interpreted, and third a multi-variable statistical analysis and a hierarchical classification method are carried out in order to propose a procedure for indirect reconnaissance of granite through well-loggings data. Then, this similar procedure was applied to Wells GPK1 and GPK2, excepted that only cuttings are available (See chapters 4 and 5).

3.1. GEOLOGICAL DATA

Geological and analytical data collected on the 810-m long ESP1 core section (Table 1) correspond to lithological information (facies, hydrothermal alteration type), mineralogical content (primary minerals), fracturing intensity and various mineralogical or chemical rock characterization (X-Ray diffraction, thin sections, bulk chemical analysis). Geological data are both qualitative and quantitative (Table 1). They were used to define the main lithological facies (Table 2). We can mainly distinguish (1) the standard Soultz granite (non-fractured and low to unaltered porphyritic granite), (2) petrographic variations (minor heterogeneities developed within the Soultz pluton) and (3) fractured and altered granite facies related to fracturation and alteration processes.

3.1.1. Data on the granite and petrographic variations

The Soultz granite massif can be considered as a homogeneous pluton resulting of a single intrusive event in which minor petrographic heterogeneities occurred during batholith crystallization and cooling [Chevremont *et al.*, 1992]. The heterogeneities are characterized by textural and mineralogical modifications or chemical composition variations (Table 3).

The standard granite is fairly, homogeneous and composed of a porphyritic granite with abundant K-feldspar megacrysts (1 to 7 cm in size) in a coarse-grained matrix including: quartz, plagioclase, K-feldspar, biotite, hornblende and accessory minerals (titanite, Fe-Ti oxydes, apatite, zircon, allanite, sulfides). This mineralogical assemblage gives a whole grey-pink color to sound granite facies (Pl. 1). Average chemical composition of the porphyritic standard granite (Table 3a) suggests a granodiorite to monzogranite

composition [Chevremont et al., 1992; Stussi and Royer, 1994]. Range of content of the main elements is: SiO₂ (68%), TiO₂ (0,50%), Al₂O₃ (14,8%), Fe₂O_{3t} (3%), CaO (2,2%), Na₂O (4%), K₂O (4,5%), U (10 ppm), and Th (30-35 ppm).

Variations in KFM content are locally observed, as KFM-enriched and cumulative facies (Pl. 2) which rarely exceed one meters in thickness. KFM depleted facies are also present in some place. Complete gradation occurs between these facies and the standard porphyritic granite. They are mainly restricted in the upper part of the section (1420 to 1800 m) and represent about 30 m in length of the 810 m long cored section, in 38 recorded levels. In the cumulative facies, the relative percentage of coarse-grained matrix is fairly low. The major mineral component corresponds to KFM accumulation (Pl. 2). By comparison with the chemical composition of the standard granite facies, these KFM-rich facies are characterized by high content in K₂O (7-9%) and in Al₂O₃. (Table 4a). On the other hand, KFM depleted granites show lower K₂O content (3,5%).

Facies enriched in colored minerals (biotite, hornblende, titanite, Fe-Ti oxides) and depleted in KFM also occur but less commonly. 8 levels representing 6,5 m in length have been recorded along the 810 m long EPS1 cored section. One of these levels is spatially associated with KFM enriched granite, suggesting a possible relationship between both. Compared to the standard granite, they exhibit lower SiO₂ (66,4%) but slightly higher Fe₂O_{3t} (3,45%), TiO₂ (0,56%) and K₂O (5,2%) content (Table 3a). Thorium content is significantly higher (50 ppm) due to the abundance of these Th-bearing minerals.

More than 100 dark-colored, fine-grained xenoliths (Pl. 2) have been also observed along the 810m long cored section. Most of them are cm to dcm in size. Only some of them are enough large (up to 30 cm) to be fully intersected by the coring and plotted on the petrographic log (Figure 4). They exhibit an equigranular texture with plagioclase, K-feldspar, quartz, biotite, hornblende, magnetite, sphene, and sulfides. Contact with the granite host is often sharp. According to the modal classification of Streikeisen [1976], these xenoliths cover a wide range of composition from tonalite to quartz syenite. They are considered to be genetically linked to the granitic magma [Chevremont et al., 1992]. Compared to the standard granite, they have higher Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O_{3t}, MgO, CaO and P₂O₅ content but lower SiO₂ (57,3%), Th and U content (Table 3a). This can be explained by the depletion in K-felspar and biotite content and the relative abundance of plagioclase.

At the scale of Well EPS1, there is a slight vertical zonation in granite geochemistry, superimposed to the variability related to local occurrences of either KFM or colored minerals enriched facies mentionned above [Chevremont et al., 1992 ; Stussi and Royer, 1994]. On the concentration versus depth binary plots (Figure 5), contents in TiO₂, Fe₂O_{3t}, MgO, CaO and Na₂O slightly increase with depth, while SiO₂ content decreases. K₂O, U and Th seem to be slightly decreasing with depth, despite their high variability related to the local accumulation of KFM or/and colored minerals. Al₂O₃ content doesn't show any significant trend. This zonation could be related to magmatic process and corresponds to the increase of colored minerals abundance (biotite, hornblende, sphene, Fe-Ti oxides) and calcium content in plagioclase with depth within the granite batholith. Conversely, KFM content decreases with depth. As mentionned before, occurrence of

KFM enriched granite and KFM cumulates is restricted to the upper part of the section (1400-1800 m depth).

3.1.2. Data on fracturation

Examination of EPS1 cores showed that the fracture distribution with depth is not random through the granite section, but is well clustered [*Genter and Traineau*, 1992]. Rather narrow zones, where the fracture frequency usually is well above 10 fractures/m, alternate with broad intervals where fracture frequency drops below 2 fractures/m (Figure 4). The so-called massive, unaltered granite contains very few natural fractures, with thin to very thin fillings and without a noticeable wall rock alteration (Pl. 1). They are minor fractures which don't show evidence of movement. Precipitation of secondary chlorite, epidote and calcite are characteristic of such thin fractures. This suggests rather limited fluid circulation. Intervals over 10 m long can be devoid of fractures.

Zones highly fractured contain several tens or hundreds of natural fractures of various origins, and with different orientation (Pl. 3,4). Moreover, the largest fracture zones contain tectonized granite generated by brittle deformation, such as breccia and microbreccia, and oriented and isotropic cataclasite (Pl. 3). This suggests that these zones of intense fracturing acted as mechanically fragile couloirs for concentrated deformation of the granite during its brittle tectonic history. Based on these characteristics, we assume that the fractured and altered zones intersected by the EPS1 well are traces of faults with a significant lateral extension in the Soultz granite. They controlled fluid circulation into the basement in past times and developed multistage, extensive vein alteration. Some of these fractured and hydrothermally-altered zones are still permeable, as confirmed by fluid outflows during coring. The permeability could be provided both by the fracture network, and by secondary porosity of the granite resulting from the vein alteration.

Genter and Traineau [1992] proposed a general pattern for these fractured and hydrothermally-altered zones; from the center to the edge this is as follows (Figure 6): (1) an inner zone of intense fracturing, with the formation of breccia zones and, in places, protomylonitic textures. Biotite and plagioclase are readily altered, K-feldspar megacrysts are intensely fragmented, and the primary texture of the granite disappears. The fractures are often sealed by thick hydrothermal filling deposited during several stages, as vuggy quartz veins up to 25 cm thick; (2) an intermediate zone where fracturing is less intense, with minor and/or major fractures, leading to the formation of cataclastic granite. Alteration is strong everywhere and biotite and plagioclase have been usually removed; (3) an outer zone where fracture density is close to zero, but alteration is still intense. Biotite and plagioclase are readily altered and transformed into clay minerals. This zone represents the proximal wall rock effect of a major fracture zone, and the rock within it has been classified as hydrothermally-altered granite.

Fracture width

Almost all natural fractures observed in the EPS1 core sections are sealed by hydrothermal fillings and show no evidence of residual free aperture. Their width is meant to refer to the thickness of the hydrothermal deposits. Fracture width ranges from nearly zero to 25 cm. Fractures with widths less than 1 mm dominate and represent

about 80% of the total amount of fractures. Fillings are usually monogenic and monophase. Fractures ranging from 1-9 mm represent about 20 % of all fractures. They usually contain several neoformed mineral species deposited during multiple stages. The thickest fractures (>10 mm) represent only a few percent, and correspond to vein deposits. Cumulative amounts of fracture width per 1 m of depth are shown on Figure 4, indicating the close relationship between fracture density and fracture width. Thick hydrothermal fillings in fractures correlate with high fracture densities, whereas zones of low fracture density have no thick fillings. The maximum cumulative width per meter (345 mm) observed in EPS1 well is located at 2175 m depth, where natural inflow into the hole occurred during coring.

Sub-horizontal joints

Sub-horizontal joints correspond to sheet-joints, i.e. cracks opening in mode I displacement, developed in association with unloading and weathering [Engelder, 1987]. Sub-horizontal joints are natural fractures without any indicator of movement such as striation. They were filled latter with a cement derived from hydrothermal processes. Their average width is less than 0.5 mm. They are usually sealed by hematite. Quartz, accessory calcite and clay minerals are also present as fillings. These sub-horizontal joints seem to be related to surface weathering/oxidizing conditions when the granite was exposed during the Permian. They are mostly concentrated in the upper part of the granite and their density decreases regularly with depth (Figure 4).

Natural sealed fractures

This is the most common type of structure recorded on the EPS1 cores, forming 96% of the total number of natural fractures. They are concentrated within the main fractured and altered zones, where they are associated with tectonized facies like breccia, microbreccia, and isotropic and oriented cataclasite [Genter and Trainneau, 1996]. They can be viewed as individual fractures whose spatial concentration determines the geometry of fault zones within the granite batholith. According to their origin and width, they are classified into minor and major sealed fractures. *Minor fractures* are planar discontinuities, visible on the mesoscopic scale and displaying opening displacement (microcracks, tension fissures and micro-fractures), which show no evidence of shear movement. They could be identified as joints filled by hydrothermal products [Engelder, 1987]. Their width is less than 1 mm, and they are sealed by one or more hydrothermal minerals such as quartz, calcite, chlorite, sulphides, epidote and accessory hematite. Generally, they do not develop a wall-rock effect. *Major fractures* show evidence of movement such as striation marks on their fault plane. They are normal and reverse, and sinistral and dextral shear faults [Dezayes et al., 1995]. They occur within the same intervals of intense fracturing, even if they were formed during successive tectonic stages. Their combination forms the main fracture network in the Soultz granite. Their width is usually >1 mm, with an average value of 2.4 mm. They are commonly sealed by several hydrothermal products deposited during more than one hydrothermal event, and they can develop slight to prominent wall-rock alteration (argillization). Distribution of both minor and major sealed fractures with depth fits the previously described cluster mode (Figure 4). Major sealed fractures are restricted to high fracture-density zones, whereas minor sealed fractures are present both within main fracture zones and outside.

Fractures with void-bearing

Only 1% of the natural discontinuities observed on the EPS1 core sections can be classified as fractures showing an incomplete hydrothermal sealing. These are usually filled-fractures partly open with thick hydrothermal filling, showing a residual aperture in their central or lateral parts. The average thickness of hydrothermal deposits in open fractures is about 25 mm. Evidence of residual free aperture includes geode quartz crystallization perpendicular to the fault plane, and dissolution of the primary granite minerals biotite and plagioclase. In any case, the residual aperture is low and around few millimeters. The most noticeable fracture with void-bearing observed in the EPS1 well has a 2-5 mm residual free aperture and is associated with a 250 mm thick quartz vein in the highly fractured zone that produced hot water during coring at 2175 m depth. Late geode quartz-vein deposition seems to be closely related to present-day permeable fractures within the Soultz granite. The other common mineral fillings observed are calcite, clay minerals, barite, anhydrite and hematite. Their location is restricted within highly fractured zones, with a maximum density recorded in the interval 2160-2175 m within naturally permeable zone (Figure 4).

3.1.3. Data on granite alteration

As mentioned earlier, two types of hydrothermal alteration develop within the Soultz granite massive: pervasive alteration and vein alteration. Petrophysical effects of the first type are rather low but widely developed within the granite whereas the second type strongly modified the texture, the mechanical properties or the chemical composition of granite (Table 3a).

Pervasive alteration

Pervasive alteration affects the granite on a large scale without visible modification of rock texture [Genter, 1989]. Color variations in the granite, e.g. from grey to orange-green, show that low-grade selective transformation of primary constituents (biotite, hornblende, plagioclase) has occurred. Some minor fractures sealed with calcite, chlorite, sulphides and epidote are related to this early stage of alteration. This alteration is symptomatic of low permeability medium and chemical transformation take place inside ferro-magnesian minerals and plagioclase. The intensity of pervasive alteration varies from incipient to partial. Biotite minerals are replaced by at least two secondary phase assemblages in which chloritization processes are involved: (1) chlorite-calcite-opaque minerals assemblage (hematite, leucoxene) and chlorite-epidote assemblage. Primary plagioclases appear to be strongly transformed by selective hydrothermal alteration. In thin section, sericite and calcite are easily observed. the size of sericite or white mica are 10 to 20 µm. According to X-ray diffraction patterns, the small sericite particles are dioctahedral neoformations. Their chemical composition is close to illite. Pervasive alteration of plagioclase is also characterized by the occurrence of an interstratification of expandable and chlorite-like layers. It corresponds to corrensite mineral which is composed from a trioctahedral chlorite regularly interstratified with a trioctahedral smectite ordred type (Table 4a). Plagioclase contain also an expandable free phase unidentified by microscopical examination. X-ray pattern shows a magnesian smectite like saponite. Pervasive alteration does not occur in primary K-felspar and magmatic

quartz. Zones affected by pervasive alteration and massive unaltered granite are both considered as belonging to the same "standard granite facies" on the petrographic logs (Figures 4 and 5). The chemical composition of pervasive facies (Table 3b) is very close to the standard granite facies composition. There is a slight increase of CaO related to carbonate precipitation in microveinlets or in plagioclase and biotite.

Vein alteration

It is closely related to fracturing and developed within fractured zones. They are 1 to 20 m thick and represent about 10% of the cored interval in well EPS1. These zones are characterized by high fracture density which promoted fluid circulation. Water-rock interactions result in the leaching of primary minerals of the granite, and the precipitation of secondary minerals within the fractures (quartz, clays, carbonates, hematite, sulphides). Wall rock alteration is important in many places where biotite and plagioclase are usually transformed into illite and I/S mainly, and locally tosudite (Table 4b). At the same place, fracture density drops to less than 10 or 5 fractures per meter (Pl. 4). The same hydrothermal minerals deposited within fractures during vein alteration. In addition, quartz, chlorite, sulphides and sulphates are precipitated. Primary texture of the granite is destroyed in the most altered and fractured facies, and results in strong modification of the petrophysical characteristics of the granite (Pl 4).

Chemical compositions of vein alteration facies are listed in the Table 3b. By comparison with average granite composition, they showed a decrease in SiO₂ content related to dissolution process affecting primary silicate minerals (biotite, plagioclase). K-feldspar megacrysts are also altered, but to a lesser degree. Primary quartz usually remains stable, except in the permeable level located around 2175 m depth in Well EPS1 where it also suffered dissolution, probably in relation with the occurrence of organic matter [LeDesert *et al.*, 1996]. Geodic quartz deposition are very common in fracture filling. Late quartz vein up to 25 cm thick sealed the core of this naturally-permeable zone (Pl. 4). Vein alteration facies show a leaching in Na₂O (plagioclase dissolution), in U and Th content, and in MgO (biotite dissolution). CaO content is variable with some facies which correspond to an increase (carbonates precipitation in fissure) or to a decrease (plagioclase alteration). P₂O₅, MnO, and TiO₂ are rather stable elements. K₂O contents show a increase due to the occurrence of clay minerals (mainly illite) which correspond to the transformation of biotite and K-feldspar. Distal vein alteration facies show a chemical composition close to pervasive facies suggesting low mass transfer. A low decrease in MgO and K₂O suggests a low alteration of biotite. Cataclased facies are characterized by a high SiO₂ content related to quartz vein deposition in fractures. Plagioclase and biotite dissolution is evidenced by Fe₂O₃t, MgO, CaO and Na₂O decreasing (Table 3b and Figure 7). Some gradations occur in vein alteration intensity (Tables 3b, 4c) and it becomes problematic to differentiate on cores low vein alteration facies to high pervasive alteration facies.

Weathering alteration

The upper part of the batholith where hematization related to the Permian weathering developed in sub-horizontal joints and microcracks, shows a pronounced reddish color. Weathering alteration is especially strong at the very top of the massif, which suffered intense argillization (I/S or smectites) and hematization (Figure 7). The reddish color of granite is visible down to 1550 m depth in Well EPS1. The chemical composition of weathering facies (Table 3b) shows a slight decrease of CaO and Na₂O related to

plagioclase alteration and a decrease of $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ and MgO related to biotite transformation. The increase of K_2O content could be associated with a "potassification" process related to diagenetic transformation (illite).

Overall distribution of hydrothermal filling

Vertical zonation of hydrothermal filling within natural sealed fractures is shown on Figure 8. The nature of the fillings was first evaluated macroscopically on core sections, and then confirmed by XRD analysis (Table 4b). Their occurrence is related to the early pervasive alteration stage that affected the granite on a large scale, and later vein alteration controlled by the fracture network. **Quartz** was mainly observed in fractures located within the four main fracture zones with the highest fracture densities, i.e. at the top of the granite (1420-1520 m), and between 1620-1725 m, 2050-2080 m, and 2155-2180 m. **Hematite** is particularly abundant in sub-horizontal joints and microcracks in the upper part of the granite (1420-1530 m) and gives it a reddish color. This hematite-bearing zone coincides with a very low resistivity on the induction well-log response. Below 1530 m, hematite occurs within zones of intense fracturing until 1750 m. Deeper, it is very rare. The abundance of hematite near the top of the granite is related to oxidizing surface conditions during the Permian, when meteoric water could percolate through the sub-horizontal joint network developed by stress relaxation. **Carbonates** were deposited in fractures located within the main fracture and alteration zones, and also outside, in natural fractures encountered in the massive unaltered granite. The second main fracture zone (1620-1665 m) is surprisingly depleted in carbonates, while hematite is abundant. Dolomite is found occasionally in association with calcite or alone, as in the interval 2130-2160 m. **Clay minerals** regroup illite, dioctahedral mica and illite-smectite mixed layers ($R=3$ type). They are abundant in all zones of high fracture density, except at the top of the granite where they are less common. **Chlorite** was identified only in thin fractures located within massive, unaltered granite in the interval 1700-1850 m. It can be associated with epidote and pyrite. Such fractures are thought to be related to late magmatic cooling, or to early pervasive alteration stages. **Epidote** is also observed in thin natural fractures occurring in massive granite in the 1700-1800 m and 2075-2120 m intervals. It probably has the same origin as chlorite. **Sulphides** (pyrite and galena) are found locally in both high- and low-fracture-density zones. **Sulphates** (barite, anhydrite) occur sporadically within the main fracture zones.

3.2. GEOLOGICAL WELL-LOGGING INTERPRETATION

3.2.1. Well-logging data presentation

The well-logging datasets collected in Well EPS1 are presented in Table 5. The main logs acquired in this well are nuclear logs, sonic logs and electrical logs. As Well EPS1 is a cored slim-hole, it was not possible to measure the same physical parameters in the two different sections (1420-2000 m; 2000-2230 m). For instance, spectral radioactive logs are not available below 2000 m depth. Borehole televue (BHTV) data are also available and presented in *Tenzer et al. [1991]*.

3.2.2. Evaluation of Well-logging responses in Well EPS1

Radioactive logs

Vertical evolution of Gamma Ray (GR) data shows a fair decrease with depth (350 GAPI at the top for 300 GAPI at the bottom). This trend could be related to a depletion in radioactive elements with depth due to magmatic differentiation process (Figure 9). Thorium (Th) and Potassium content (K) behaviours show the same trend with depth than GR value, namely steady decline. Th and K values drop from 45 to 38 ppm and from 6 to 5,5% respectively. Uranium content (U) does not show any significant trend with depth. In Well EPS1, analysis of nuclear logs with depth shows that several main petrographic units could be identified:

From 1420 down to 1550 m (granite top or unit 1)

Gamma Ray values are lower in average (360 GAPI) with significant local enrichment (>400 GAPI). This low radioactive content is related to the paleo-weathering alteration developed at the top of the granite surface under oxidizing conditions (rubefaction). There is a good agreement between the reddish color of granite and the drop in radioactivity. In parallel to that, gamma ray (400 GAPI) and K (>8%) responses show high values due to magmatic process (K-felspar megacryst granite at 1440 m). Highly fractured zones could be characterized either by low values (250 GAPI) either by high values (400 GAPI). Uranium content is variable but rather low (3 ppm). The lowest values (<1,5 ppm) are measured in cataclasized facies, close to an altered zone rich in Uranium content (9 ppm). Th and K responses are more variable than U content.

From 1550 down to 1800 m (unit 2)

In standard granite facies, GR and U responses are steady around 330 GAPI and 5 ppm respectively. In hydrothermally altered and fractured zones, increase of radioactivity occurred (1635, 1675, 1770, 1810, 1875 m). Some altered zones show a leaching in radioactive elements (1580, 1597, 1640, 1647 m). High K contents (>9%) are correlated with altered zones bearing K-minerals (illite). At 1675 and 1770 m depth, high GR values are related to uraniferous minerals sealed fractures. Some of these GR enrichments are due to petrographic facies variations (FMK at 1739 m, biotite rich facies at 1780 m). Conversely, KF-depleted granite (1576 m) can induce radioactivity and uranium drops.

From 1800 down to 2230 m (unit 3)

Radioactive logs (GR, U, Th, K) declined steadily with depth excepted in fractured zones where they are variable. At 1851 m, a high radioactivity content does not correspond to any macroscopic petrographic variation. Gamma ray data fell to a minimum of 150 GAPI that correspond to thick-geodic quartz veins (2076, 2160, 2178 m). Some of them are spatially limited by hydrothermally altered zones with high GR content (2164, 2176 m). Locally, high pervasive alteration induced high GR value (2197 m) as well as a unfractured granite facies (2147 m). A xenolith induced low value (2027 m).

Density and neutron porosity logs

Analysis of density measurements with depth shows that unit 1 is rather light (2,60 g/cm³) by comparison with standard granite density [2,65 g/cm³, *Trainneau et al.*, 1991, *Rummel*, 1991]. This could be related to the superimposition of intense fracturing and weathering alteration. In highly altered-fractured zones, the bulk density decreases to 2,45 g/cm³ at 1515 m depth. Heavy minerals, disseminated as primary sulphides in massive granite facies (1813, 2101 m) or concentrated as secondary barite or galena in

fracture filling (1456, 1675, 1832, 2221 m) increase the rock density significantly. In massive unaltered granite, the bulk density is about 2,63 g/cm³ and 2,67 g/cm³ in unit 2 and unit 3 respectively. Petrographic variations such as FK-rich granite facies (1550, 1584, 1630, 1690, 1763 m) induce a drop in bulk density whereas xenolite cause a slight increase in density (2027 m).

Neutron porosity measurements are available in the deeper part of Well EPS1 only (Figure 9). For massive granite, average porosity values range between 2 and 3%. Fractured zones (1995, 2060-2075 m) are characterized by high porosity values (4 to 10%) which increase up to 20% in the permeable zone (2160 m). A significant part of these anomalies are due to the concentration of clay mineral occurrences which greatly influence neutron porosity measurement.

Sonic measurements

Compressive wave

The slim-hole tool used for recording acoustic parameters gave only slowness of P waves between 2000 and 2230 m. Average value in massive granite is about 55 µs/f. Altered-fractured facies show clear responses with a slowness of P Wave around 100 µs/f (2075, 2178 m). Petrographic variations are not well discriminated with such measurements.

Shear wave

Shear wave slowness was measured between 1430 and 2000 m from Variable Acoustic Log tool (VAL system). Average value is about 85 µs/f. In the upper part of the granite, the slowness of S wave is higher till 100 µs/f in fractured zones (1460 m). Deeper, acoustic responses of S wave slowness are clearly correlated with massive granite facies (85 µs/f) or fractured zones (110 µs/f). However, petrographic variations or magmatic heterogeneities are not discriminated with S wave slowness measurements.

Electrical logs

Spontaneous potential measurements (SP) show interactions between formation water, drilling fluid and some electrical particles bound to minerals (clay minerals). Within unit 1, SP values are maximal (>50 mV) at the top of the granite and decrease regularly to 1550 m depth (see appendix 2, fig. 6). This behaviour matched perfectly with the oxidation profile related to the general rubefaction observed on core in the upper part of the well. Positive anomalies are systematically correlated with fractured zone occurrences (1650, 1675, 1710, 1770, 1808, 1830, 1920, 2160 m). Within massive granite, SP is not stable and varies between -50 and -100 mV with a minimal value which corresponds to unaltered granite facies (1930-1970 m). In the deeper part, the differentiation fractured zone-massive granite (2060 m) is not so clear probably in relation to different logging conditions.

Induction measurements provide induced shallow-resistivity (IMPH, SN) and induced-far-resistivity (IDPH, ILD). IDPH data are saturated for values higher than 2000 ohm.m which correspond to resistivity range of massive granite. Saturation threshold is reached at 1540 m which is closer to the limit between oxidized granite and fresh granite. In such a resistive crystalline medium, petrographic variations are not differentiated from unaltered granite. Conversely, large individual fractures or altered zones (1650, 1675, 1710, 1770, 1810 m) are clearly detected due to a lower resistivity (<300 ohm.m). In the deeper section of Well EPS1, ILD conductive anomalies are well correlated with fractured zones (2060, 2160-2170 m).

IMPH data are quite sensitive to borehole conditions and they show a steady behaviour in Well EPS1 with an average value of 50 ohm.m. For altered zones, IMPH induction decreases (1640-50, 1675 m) as well as SN induction (2060, 2160-2170 m). In massive granite (1598-1638, 1740-58, 1947-67 m), some low resistivity values alternate rapidly with high resistivity values. This behaviour corresponds to induced fractures (conductive features) formed in massive granite (resistive medium). Acoustic televiewer data confirmed the occurrences of these induced fractures developed in massive granite.

3.2.3. Average physical properties by lithofacies

General background

In Well EPS1, the granite is rather homogeneous from textural and mineralogical compositions. Then, physical measurements such as well-logging give stable values and allow us to define average values representing the crystalline medium (Table 6). These data are in agreement with measurements carried out directly on cores, namely bulk density and sonic velocity [Rummel, 1991]. Nuclear logs show a slight decreasing with depth (Figure 9) that could be related to a vertical mineralogical zonation of the granite body.

Petrographic variations

Main petrographic variations are KFM facies, biotite-rich granite and xenolithes. Nuclear logs are well adapted for detecting KFM facies which are characterized by an increase in K content, a depletion in thorium content due to the depletion of biotite, and a slight density decrease. As vertical extension of KFM and xenolite facies are rather limited (few cm-thick), their detection is seriously handicapped due to the well logging spacing (15 cm). Sonic and electrical measurements are not powerful for discriminating petrographic variations. They have the same response than standard massive granite.

Fractured/altered zone detection

In fractured and hydrothermally altered granite, bulk density decreases in relation with fracturing intensity and dissolution process. Locally, secondary deposits in fracture fillings, such as barite or sulphides (heavy minerals) could induce significant increase of bulk density. Neutron porosity is also a good marker of fractured zones. This measurement mixes free water and bound water structurally related to clay minerals which are abundant in altered zones (Figure 9).

Nuclear logs are also sensitive to dissolution-precipitation processes related to fracturing. K content is generally higher in fractured zones due to the occurrences of K-bearing secondary minerals (illite) which transformed primary biotite and plagioclase. Uranium and thorium show variable behaviours (leaching, precipitation). Natural radioactivity (GR) is very low in secondary quartz veins. High neutron porosity and decrease in gamma ray are good indicators of productive zone (Figure 9). Sonic velocities are also powerful for detecting fractured zone. Both P and S wave slownesses are higher due to the lack of mechanical cohesion of the granite rock.

3.3. STATISTICAL ANALYSIS OF CORE-WELL-LOG

In order to investigate multiple correlations between the various variables, a Principle Component Analysis (PCA) was applied to the entire well-logging dataset (see appendix 2 for detailed analysis).

From 1420 to 1980 m, the main results of the statistical analysis are presented according the four main correlation axes. Axe 1 corresponds to a positive correlation between K content, fracture density, spontaneous potential (SP) and S wave slowness. Axe 1 also shows a negative correlation for bulk density, deep induction (IDPH) and core gamma density (DECA). Axe 2 shows a positive correlation for nuclear variables such as U, Th, K contents and natural radioactivity (GR). Axes 3 and 4 show an independent behaviour of Shear wave slowness and IMPH conductivity respectively.

From 2010 to 2220 m, the main results of the statistical analysis are presented according the four main correlation axes. Axe 1 shows a negative correlation between spontaneous potential, P wave slowness (DT), neutron porosity, and fracture density. Axes 2 and 3 show an independent behaviour of gamma ray content and short normal resistivity (SN) respectively. Axe 4 shows the correlation between core gamma-density (DECA), bulk density (RHOB) and deep induction measurements (ILD).

3.4. GEOLOGICAL RECONNAISSANCE THROUGH INDIRECT WELL-LOGGING DATA

Objective numerical multivariate clustering is an effective procedure to simultaneously comprehend a suite of well logs or core data, and partition them into geologically meaningful zones and for identifying zone-specific log facies [Gill *et al.*, 1993]. The aim of the MultiVariate Clustering method (MVC) is to define automatically a synthetic lithological code to each depth section according to its own multivariable content (see appendix 2 for detailed analysis). It means that continuous logs have to be segmented into discrete zones of similar properties. A vertical zonation of these codes allow to construct a geological profile based on well-logging data (indirect measurements). Discrimination of zones and petrographic facies from well-log and core data was established by a hierarchical clustering algorithm implemented in BRGM software package [GDM, Geological Data Management].

From 1420 to 1980 m depth, 10 groups have been defined as it is shown in the dendrogram structure (see appendix 2, fig. 1). Each of them corresponds to a characteristic facies with its own physical properties. These ten main synthetic facies can be grouped into four main facies families (F1 to F4).

Facies belonging to the F1 group GRA1, GRA2 and GDIF codes, are characterized by negative spontaneous potential, high resistivities values, high bulk density (RHOB, DECA), low neutron porosity (NPHI), low P wave slowness (DT) and very high Uranium content. They show low fracturing content, no vein alteration, and variable pervasive alteration. They correspond to the standard granite or petrographic variations (GRAN, MELA, XENO).

Facies belonging to the F2 family are altered facies (ALT1 to ALT4). The ALT1 code corresponds to cataclased granite (CATA, BREC, VEIN), the ALT2 to altered facies (HYDRO, CATA, BREC, MBREC, PMYL), the ALT3 to both massive or altered granite (GRAN, MFKR, CATA), and the ALT4 to altered granite (HYDRO). They show positive spontaneous potential, low resistivities values, low density, high neutron porosity, high P wave slowness and high K content. They show very high fracture density and high vein alteration degree. The F3 family (ENC1, ENC2) corresponds to an intermediate family between F1 and F2. It corresponds to facies in which low vein alteration degree and high pervasive alteration degree are associated. F3 family is characterized by a high fracture density (>6 fract/m). The ENC1 code corresponds to standard granite or altered granite (GRAN, CATA, HYDR). The ENC2 code corresponds to petrographic variations (GRAN, MFKR, CUMU, MELA) or altered granite (HYDR, CATA). The DIVE code is mainly an altered facies (HYDR, CATA, BREC) rich in radioactive elements (high U, Th, K and GR contents), high fracture density, and low resistivity.

Between 1420 and 1980 m, the vertical comparison between lithological codes and synthetic codes show three main geological units in Well EPS1 (see appendix 1, fig. 7). From 1420 to 1520 m, the facies corresponding to F1 and F2 families are dominating and standard granite facies is lacking. From 1520 to 1925 m, the facies GRA1 is dominating and alternates with fractured zones. Deeper, from 1925 to 1980 m, the massive granite facies GRA2 occurs.

From 2010 to 2230 m depth, 6 groups have been defined as it is shown in the dendrogram structure ((see appendix 2, fig. 5). These six main synthetic facies can be grouped into three main facies families (F1 to F3).

Facies belonging to the F1 group GRA1 and GRA2 codes, are characterized by negative spontaneous potential, high resistivities values (ILD), high density, low neutron porosity, and low P wave slowness. They show low fracturing content, no vein alteration, variable and pervasive alteration. They correspond to the standard granite or petrographic variations (GRAN, MELA, CUMU, XENO). Facies belonging to the F2 family are altered facies (ALT1, ALT2). The ALT1 code corresponds to massive granite rock (GRAN, MFKR, CUMU, MELA, XENO) or cataclased granite (HYDR, CATA, BREC, MBREC, PMYL). The ALT2 facies corresponds to altered facies only (HYDR, BREC, MBREC, PMYL, VEIN). They show positive spontaneous potential, average resistivities values (<2000 Ohm.m), low density (<2,60 g/cm³), moderate neutron porosity (5-8%), and moderate P wave slowness. They show high fracture density and moderate vein alteration degree. Facies belonging to the F3 family are altered facies (ALT3, ALT4). Their features are closed to F2 family but with higher physical constraints. They correspond to altered facies (HYDR, BREC). For example, resistivities are lower (<300 Ohm.m), as well as density values (<2,50 g/cm³). Neutron porosity varies between 11 and 13% whereas gamma ray content is variable (200 and 350 API).

In the deeper part of Well EPS1, comparison between lithological codes and synthetic codes shows that hierarchical analysis is well-adapted for detecting fractured zones. The best well-logging measurements for characterizing hydrothermally altered and fractured zones, are neutron porosity, electrical measurement and sonic slowness.

4. Synthetic log reconstruction in Well GPK1

4.1. GEOLOGICAL DATA

Geological data collected in the deeper of Well GPK1 (2000-3600 m) are based on cuttings examination carried out on-site [Genter and Traineau, 1993a]. This petrographic analysis performed from partial geological information (crush rock), assumed that the deepening of the GPK1 borehole should cross the same facies still observed on EPS1 cores.

The following petrographic types encountered in GPK1 between 2000 and 3600 m, listed below will be discussed (Table 7): (a) standard porphyritic granite (GRAN), (b) biotite-rich granite (MELA), (c) K-feldspar rich porphyritic granite (MFKR), (d) altered porphyritic granite related to fractured zones and divided into four alteration grades (low, moderate, high and very high).

The entire GPK1 section was drilled within the Soultz granite massive composed of a porphyritic granite (Figure 10). This granite is fairly petrographically homogeneous from the top to the bottom of the borehole, except in some zones of limited extension located between 2130-2280 m and 2990-3030 m depth where variations of the percentage of primary minerals (biotite, K-feldspar) are ascribed to minor magmatic heterogeneities. Basically, fractured and altered zones represent the only significant feature which disrupts the homogeneity of the granite massive.

The drilling rate values (m/h) are well correlated with the petrography of the granite. There is a clear relationship between high drill rate values and occurrence of altered zones. Values higher than 6 m/h are common for such zones, whereas the standard porphyritic granite shows a mean drill rate around 3 m/h only. However, in some cases, altered zones deduced from the examination of chip samples are not visible on the drill rate curve. Fractured and altered zones have an apparent thickness of 1 to 50 m on the petrographic log and represent a cumulative length of 450 m along the 1600 m drilled section. However, considering that they are steeply dipping (60-70°), their true thickness should be 2 or 3 times lower than observed. Their distribution over the interval 2000-3600 m is not uniform. From 2000 to 2100 m, these fractured zones are mainly deduced from the increase of drill rate values. There is no chip sample available for the first one (2010-2020 m) and the two others were difficult to characterise, owing to the discontinuous chip sampling. Between 2100 and 2500 m, no evidence of fracture zone is seen from the examination of the chip samples. Below, from 2500 to the bottom depth, fracture zones are very common and represent about a third of the total length of this interval.

Within the fractured zones, it is possible to determine a zonation of the alteration grade (Table 8) which points out their internal patterns as those observed on the EPS1 core sections (fractured and silicified inner part, argilised wall-rock outer part). Among all the

recorded fractured zones intersected by GPK1, the zone occurring between 3475 and 3515 m can be considered as one of the main fault zone considering the intensity of the alteration. The inferred fracturation is also suggested by the deposition of a secondary quartz vein with significant thickness (dm to m?).

4.2. WELL-LOGGING DATA

4.3. GEOLOGICAL WELL LOGGING DATA INTERPRETATION

Standard nuclear and acoustic measurements were carried out in the deeper section of Well GPK1 (2000-3600 m; Table 9, Figure 10). Neutron porosity values are in the same range than those measured in Well EPS1 and in the upper part of Well GPK1 [*Traineau et al.*, 1991]. They are lower than 2% in average in massive granite section and higher than 20% in altered zones. Gamma ray data are rather stable in granite and variable in fractured zones. Natural radioactivity (GR) decreases slightly with depth. Bulk density and photo-electric factor (PEF) are stable in massive granite, 2,63 g/cm³ and 3,13 respectively, and decrease in altered zones, 2,40 g/cm³ and 1,40 at 3490 m, respectively. Uranium and Thorium contents show a general decrease with depth which was still observed in Wells EPS1 and GPK1 (1400-2000 m). In altered zones, these two elements tend to be leached. Potassium content is stable with depth (4,85%). Systematic enrichments in altered zones are correlated with K-bearing clay mineral, namely illite (Table 10; Figure 10). Compressive and shear wave transit times show significant slowdown in fractured zones. Stoneley wave propagation is influenced by open fractures. In Well GPK1, several zones characterized by gas anomalies [*Aquilina et Brach*, 1995] are perfectly correlated with Stoneley wave anomalies (2500, 2810, 3380, 3490 m).

4.4. STATISTICAL ANALYSIS OF THE WELL-LOGGING DATA IN WELL GPK1

As in Well EPS1, a Principle Component Analysis (PCA) was applied to the GPK1 well-logging datasets in order to analyze the relationship among several numeric variables by performing various statistical correlations (see appendix 3 for detailed analysis). As Well GPK1 was drilled during two different periods (1987, 1992), the well-logging datasets collected are not equivalent. Then, they were divided into 2 main sets.

From 1430 to 1975 m depth, well-logging data are organized around five main axes. Axe 1 shows a positive correlation between K content, neutron porosity and P and S wave slownesses and a negative correlation between bulk density and acoustic impedance variable (AIMP). Axe 2 corresponds to a correlation among nuclear logs (U, K, Gamma Ray). Axe 3 is characterized by an independent behaviour of U content and a negative correlation between Th content and photoelectric factor variable (PEF). Axe 4 shows an opposite correlation between resistivity data (LLD, LLS) and spontaneous potential. Then, Axe 5 shows the independence of poisson ratio (PR). There is no structure for electrical resistivity (MSFL) and Stoneley wave slowness (DTST).

From 1430 to 3493 m depth, well-logging data are organized around four main axes. Axe 1 shows a positive correlation between bulk density and acoustic impedance variable and a negative correlation between K content, and P and S wave slownesses. Axe 2 corresponds to a positive correlation among nuclear logs (Th, K, Gamma Ray). Axe 3 is characterized by a negative correlation between U content and GR data. Then, Axe 4 corresponds to a positive correlation between bulk density and poisson ratio. Although some variables are lacking in the deeper part of Well GPK1, such as electrical logs or neutron porosity, this statistical analysis is more significant than in the upper part because the correlation method was applied over a larger depth interval.

Therefore, in Well GPK1, Axe 1 and Axe 4 show mainly the same behaviour because both they correlated neutron density with acoustic properties and K content. They are well-adapted for characterizing fractured zones and then for distinguishing from massive granite facies.

4.5. SYNTHETIC WELL-LOGGING RESCONSTRUCTION

The aim of the MultiVariate Clustering method (MVC) is to define automatically a synthetic lithological code to each depth section according to its own multivariable content (see appendix 3 for detailed analysis). A vertical zonation of these codes allow to construct a geological profile based on well-logging data (indirect measurements).

From 1420 to 1980 m depth, 11 groups have been defined and each of them corresponds to a characteristic facies with its own physical properties. These eleven main synthetic facies can be grouped into three main facies families (F1 to F3).

Facies belonging to the F1 family representing five main groups (1, 4, 7, 9, 11), are characterized by stable neutron density ($2,6 \text{ g/cm}^3$), high acoustic impedance and high photoelectric factor. They show no vein alteration and variable pervasive alteration. They correspond to the standard or altered granite, leucogranite and petrographic variations (GRAN, MELA, HLOW, HMOD, HHIG, MFKR, LEG2). The group 11 shows a high U content and a low Th content.

Facies belonging to the F2 family representing two main groups (3, 6), corresponds to high U content and high acoustic impedance. This family is an intermediate between the two other families. They corresponds to altered or massive granite facies (GRAN, PROP, HEMA, HMOD, HHIG, HEXT).

Facies belonging to the F3 family representing four main groups (2, 5, 8, 10), show low density value ($<2,6 \text{ g/cm}^3$), high slownesses (P, S). They corresponds to altered and fractured granite facies (HMOD, HHIG, HLOW, HEXT) or massive granite (GRAN).

In the deeper part of Well GPK1, comparison between lithological codes and synthetic codes shows that hierarchical analysis is well-adapted for detecting fractured zones. The best well-logging measurements for characterizing hydrothermally altered and fractured zones, are neutron porosity, electrical measurement and sonic slowness.

5. Synthetic log reconstruction in Well GPK2

5.1. GEOLOGICAL DATA

The entire upper GPK2 section was drilled within the Soultz granite massive composed of a porphyritic granite (Figure 11). This granite is fairly petrographically homogeneous from the top of the basement to the major fault located at 2110 m, except in some zones of limited extension between 1757 and 2100 m where variations of the percentage of primary minerals (biotite) are ascribed to magmatic heterogeneities. No cuttings were collected below 2110 m due to the occurrence of a main fault which caused total losses during drilling. Therefore, the log description is based on cuttings analysis collected in the upper part of the well (1410-2110 m). From the top of the granite to 2110 m, fractured zones alternate with standard granite section. The upper fractured zone is extended from 1430 to 1540 m. Three other fractured and altered zones are located deeper (1610-1720, 1780-1930, 1970-2110 m).

Some facies variations occur such as K-feldspar rich granite (1552-1566 m) and biotite rich granite (for example: 1950-1967 m). The general reddish colour of the cutting samples is extended from 1420 down to 1540 m. The first unoxidizing granite facies, showing fresh biotite and so inducing a dark colour sample, occurs at 1542 m. However, it seems that due to the vertical persistence of the reddish colour of the cutting sample, the fresh granite facies are really penetrated from 1700 m. Standard granite sections are disrupted by steeply hydrothermally altered and fractured zones. Altered granite is typically biotite free and reddish to orange coloured. At 2110 m, a sharp increasing of Rop values fits rather well with total mud losses.

A cumulative length of 80 metres of biotite rich granite has been observed in GPK2 from drill cuttings analysis. These biotite rich granite sections were observed between 1757 and 2100 m it could suggested that the granite composition is slightly different than in EPS1 in the same range of depth interval.

5.2. WELL-LOGGING DATA

Conventional well logs (sonic, Gamma Ray, 6-arms caliper) and borehole imagery (UBI, Ultrasonic Borehole Imager) were performed in Well GPK2 (Table 11).

5.3. GEOLOGICAL WELL LOGGING DATA INTERPRETATION

Various standard open-hole well logs (caliper, sonic, and gamma ray logs) were performed in the well in order to determine the main distribution of the petrographic facies in terms of facies variations, standard granite and hydrothermally altered and fractured zones (Figure 11). The drilling rate, namely Rop (rate of penetration), expressed in meter per hour, was collected by Datalog from 1410 to 3883 m. This

drillhole parameter provided a good indicator for standard granite location (low Rop value) or fractured and altered granite occurrence (high Rop value).

Gamma ray (GR) data permit to distinguish three main part within the GPK2 well: (1) from the top of the granite (1420 m) down to 1900 m, in which GR values are very high and strongly variable, (2) from 1900 m down to 2960m, in which Gamma ray logs show a slight decreasing trend versus depth as it was still mentioned in the other Soultz wells [Traineau *et al.*, 1991, Genter and Traineau, 1993b], (3) from 2960 m down to the bottom hole logged section (3820 m), in which Gamma ray logs slightly increase but are very variable. Generally, radioactivity is rather stable for unaltered granite and varies strongly for fractured and altered zones.

The caliper data indicate two kind of different behaviours: (1) some values which are close to nominal borehole diameter inducing by standard unaltered granite or magmatic heterogeneities, (2) some values which are greatest than borehole size and which could be related to the occurrence of cavities induced by hydrothermally altered and fractured granite. Between 1420 m and 1950 m, mean caliper data are very high and numerous caves occur. Between 1950 to 2900 m, caliper data are very stable except locally within altered and fractured zones. The lower part of the well shows noisy data even in unaltered facies. A lot of cavities also occur in the deeper part which are related to fractured zone occurrences.

The sonic tools acquire and analyse compressional waves, shear waves and Stoneley waves. The two first one are sensitive to strong modifications of the mechanical properties. The slowness of both P and S waves are rather stable for standard granite respectively 55 and 90 $\mu\text{s}/\text{f}$. But they show a sharp increasing for fractured and altered zones over 70 and 120 $\mu\text{s}/\text{f}$ for P and S waves respectively. From both, GPK2 can be separated into four main distinctive sections: (1) 1420 - 1950 m, which are characterized by rather high P and S slowness suggesting that the granite is rather altered and fractured, (2) from 1950 to 2960 m, low and stable values for both related to a massive crystalline medium, and (3) from 2960 to 3520 m, very strong anomalies clearly related to fractured zones are present, and (4) from 3520 m to 3820 m, P and S slowness are noisy but very low suggesting than we penetrated a massive poorly fractured geological unit. The noise could be related to the borehole roughness which is very high in this section as it was observed from caliper data.

Open fractures can be identified with Stoneley waveform measurements. In GPK2, it appears that Stoneley data seems greatly influences by borehole geometry because they show an opposite behaviour to caliper data. The major anomalies visible from Stoneley slowness are located in the deeper part of the well (2980, 3100, 3400, 3500m).

Due to total mud losses during drilling, the comparison between chip sample and well logs is only effective in the upper part of GPK2. Due to its structural location at the top of the granite, the section located between 1420 and 1540 m is very different from the lower part and then it seems difficult to applied cuttings-logs correlation deeper. Therefore, this upper section constitutes a crystalline unit which is highly influenced by the superimposition of hydrothermal paleocirculations in fracture network (clay minerals) and paleo-weathering (red colour related to haematite). This zone is characterized by high Gamma ray, high Rop, a lot of caves and high S slowness.

From 1540 down to 1900 m depth, GPK2 has penetrated an alternating of fractured zone and massive granite. Basically, similar responses are observed as well as in the previous section (high natural radioactivity, caves, high S slowness values). From 1900 to 2110 m, a lot of sections showing a biotite rich content occur which probably induced high Gamma ray content. These sections are cross-cut by major fractured zones as it was evidenced on Rop values and total losses (2110 m). From 2110 down to 2960 m, radioactivity slightly decreases, and Rop data, calipers and sonic waves velocities are rather low and stable. In this section, GPK2 has encountered a massive crystalline unit poorly fractured with some minor facies variations (2410m, high Gamma ray content). From 2960 down to 3510 m, both vertical magnetic field component and Gamma ray measurements are variable. A lot of major fractured zones are visible on caliper data and P and S sonic slownesses (2980, 3100, 3180, 3250, 3350, 3400, 3510 m). From 3510 down to 3800 m, both radioactivity and magnetic field are variable whereas caliper, Rop, P and S sonic velocities are stable. It suggests that some facies variations occur which are probably poorly fractured. From 3820 down to 3880 m, no geophysical data are available.

5.4. STATISTICAL ANALYSIS OF WELL LOGGING DATA

As in Wells EPS1 and GPK1, a Principle Component Analysis (PCA) was applied to the GPK2 well-logging datasets in order to analyze the relationship among several numeric variables by performing various statistical correlations (see appendix 4 for detailed analysis).

From 1420 to 3800 m depth, well-logging data (10 variables) are organized around five main axes. Axe 1 shows a positive correlation between P and S wave slownesses (DTCO, DTSH) and the rate of penetration (Rop). Axe 2 is characterized by an independent behaviour of the natural radioactivity (Gamma Ray). Axe 3 is characterized by a positive correlation between VP/VS ratio and the Poisson ratio. This correlation is obvious because these data are not independent. Axe 4 shows an independent behaviour of the magnetic data. Then, Axe 5 shows an opposite correlation between the Stoneley wave slowness (DTST) and the caliper data. This classical behaviour confirms that tube waves (DT Stoneley) are very sensitive to borehole geometry.

Therefore, in Well GPK2, Axe 1 which characterized the rock cohesion (acoustic properties) seems to be the most relevant factor for discriminating fractured zones and massive granite facies.

5.5. SYNTHETIC WELL-LOGGING RECONSTRUCTION

The aim of the MultiVariate Clustering method (MVC) is to define automatically a synthetic lithological code to each depth section according to its own multivariable content (see appendix 4 for detailed analysis). A vertical zonation of these codes allow to construct a geological profile based on well-logging data (indirect measurements). Petrographic description are available between the top of the granite and 2110 m depth. Below this depth, due to the occurrence of a major permeable fault, cutting samples were not recovered (total mud losses).

From 1420 to 2110 m depth, 10 groups have been defined and each of them corresponds to a characteristic facies with its own physical properties. These ten main synthetic facies can be grouped into two main facies families (F1, F2).

Facies belonging to the F1 family representing five main groups (1, 5, 2, 6, 10), are characterized by stable drilling rate values (4,3 to 5,6 m/h), stable acoustic properties (DTCO, DTSH), and stable caliper data. Natural radioactivity is variable. These groups correspond to standard or altered granite facies (GRAN, HLOW, HMOD, HHIG), and petrographic variations (MELA, FKMR). Group 10 does not occur between 1420 and 2110 m depth.

Facies belonging to the F2 family representing five main groups (3, 7, 9, 4, 8), show high slownesses (P, S) and high drilling rate values (Rop). Gamma ray is variable. They corresponds to altered and fractured granite facies (HMOD, HHIG, HLOW, HEXT). In the deeper part of Well GPK2, the group 10 which occurs widely, could correspond to a massive rock (low Rop, lowest DT CO).

In Well GPK2, comparison between lithological codes and synthetic codes shows that hierarchical analysis is well-adapted for detecting fractured zones. The best well-logging measurements for characterizing hydrothermally altered and fractured zones, are sonic measurements (DTCO, DTSH) and drilling rate (Rop).

Conclusions

Geological and geophysical data collected in the three deep wells of the European Hot Dry Rock project, located at Soultz-sous-Forêts (France), were analysed and compared. Geological information is mainly based on core evaluation (petrography, alteration, fracturing) and chip sample examination (mineralogical content). Geophysical logs mainly correspond to radioactive logs, sonic logs, electrical logs and caliper logs. In order to analyse the relationship among several numerical variables, a statistical correlation method was applied to the core and geophysical datasets. As all geophysical measurements were not obtained continuously in the three wells, the calculated correlations are valid for a given well only.

In Well EPS1, there is a positive correlation between core fracture density, Potassium (K) content and shear wave slowness and a negative correlation between bulk neutron density and induction measurements. It means that K content measurement and bulk neutron density data could be quite sufficient to well characterize some fractured zones.

In the upper part of Well GPK1 (1420-1975 m), there is a positive correlation between K content and neutron porosity. Deeper, there is a negative correlation between K content and sonic slownesses (P, S). It means that K content measurement could be quite sufficient to well characterise some fractured zones.

In Well GPK2, there is a positive correlation between the rate of penetration and sonic slownesses (P, S). As there is no K content measurement in this well, it means that the rate of penetration is a relevant drilling parameter for characterizing hydrothermally altered and fractured zones. However, the deep geology of GPK2 stays confusing and therefore we propose to obtain gamma ray spectral measurements for future drilled borehole.

References

- Aquilina L., Brach M. (1995) - Characterization of Soultz hydrochemical system: WELCOM (Well Chemical On-line Monitoring) applied to deepening of GPK1-1 borehole. *Geothermal Science and Technology*, Vol. 4(4), p. 239-251.
- Artignan D., (1994) - Sondage géothermique EPS1 de Soultz-sous-Forêts. Reconstitution d'un log lithologique à partir des données de diagraphies, Note Technique DEP/DEX/T2M 93/035.
- Artignan D., (1996) - Sondage géothermique GPK1 de Soultz-sous-Forêts. Elaboration d'un log lithologique à partir des données de diagraphies, Note Technique SMN/DEX/T2M 96/014.
- Artignan D., (1996) - Sondage géothermique GPK2 de Soultz-sous-Forêts. Elaboration d'un log lithologique à partir des données de diagraphies, Note Technique SMN/DEX/T2M 96/057.
- Chevremont P., Thieblemont D., Laforet C., Genter A., Trainneau H. (1992) - Etude pétrologique du massif granitique recoupé par le forage EPS-1 (Soultz-sous-Forêts). Rapport BRGM RCS92T15 SGN/IRG, 67 p.
- Dezayes C., Villemin T., Genter A., Trainneau H., Angelier J. (1995) - Analysis of fractures in boreholes of the Hot Dry Rock project at Soultz-sous-Forêts (Rhinograd, France). *Scientific Drilling*, pp. 31-41.
- Garnish J., Baria R., Baumgartner J., Gérard A. (1994) - The European Hot Dry Rock programme 1994-1995, *Trans. Geotherm. Res. Counc.*, 18, pp. 431-438.
- Genter A. (1989) - Géothermie Roches Chaudes Sèches : le granite de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin, France). Fracturation naturelle, altération hydrothermale et interaction eau - roche. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, France, 201 p.
- Genter A., Cautru J.-P., Montaggioni P., Trainneau H. (1989) - Geological interpretation of well logging data from the granitic section of the Soultz-sous-Forêts GPK1 well; SPWLA, 12 th International Well Logging Symposium, SAID, paper EE, 25-27 oct.89, Paris, 12 p.
- Genter A., Tenzer H. (1995) - Geological monitoring of HDR GPK-2 borehole, 1420-3880 m, (Soultz-sous-Forêts, France). BRGM Open File Report, R 38629, 46 p.
- Genter A., Trainneau H. (1991) - Geological survey of the HDR borehole EPS1, Soultz-sous-Forêts, France, *BRGM report 32433*, 25 p.

- Genter A., Trainea H. (1992) - Borehole EPS1, Alsace, France : preliminary geological results from granite core analyses for Hot Dry Rock research. *Scientific Drilling* 3, pp 205-214.
- Genter A., Trainea H. (1993a) - Deepening of GPK1 borehole 2000-3600 m (Soultz-sous-Forêts). Geological monitoring. *BRGM report R 36611*, 25 p.
- Genter A., Trainea H. (1993b) - Géothermie profonde dans le granite de Soultz-sous-Forêts (Alsace, France). Apports des diagraphies et des imageries de paroi. *Revue Géologues*, n°100-101, Octobre 1993, pp. 67-73.
- Genter A., Trainea H., Dezayes C., Elsass P., Ledesert B., Meunier A., Villemin T. (1995) - Fracture analysis and reservoir characterization of the granitic basement in the HDR Soultz project (France). *Geotherm. Sci. Tech. Vol. 4 (3)*, pp. 189-214.
- Genter A., Trainea H., (1996) - Analysis of macroscopic fractures in granite in the HDR geothermal EPS-1 well, Soultz-sous-Forêts (France), *J. Volcano. Geotherm. Res.* 72, pp. 121-141.
- Gill D., Shomrony A., Fligelman H. (1993) - Numerical zonation of log suites and logfacies recognition by multivariate clustering. *AAPG Bull.*, Vol. 77, N°10, pp. 1781-1791.
- Kappelmeyer O., Gérard A., Schloemer W., Ferrandes R., Rummel F., Benderitter Y. (1991) - European HDR project at Soultz-sous-Forêts - general presentation, *Geotherm. Sci. Tech. 2 (4)*, pp 263-289.
- Ledesert B., Joffre J., Ambles A., Sardini P., Genter A., Meunier A. (1996) - Organic compounds: natural tracers of fluids circulations between sediments and the granitic basement at Soultz-sous-Forêts (France), *J. Volcano. Geotherm. Res.* 70 (3-4), pp. 235-253.
- Stussi J.M., Royer J.J. (1994) - Pétrologie des monzogranites du site géothermique de Soultz-sous-Forêts. Rapport CRPG, Projet PIRSEM 1993-1994, 118p.
- Rummel F. (1991) - Physical properties of the rock in the granitic section of borehole GPK1, Soultz-sous-Forêts, *Geotherm. Sci. Tech.*, 3, 199-216.
- Trainea H., Genter A., Cautru J.-P., Fabriol H., Chevremont P. (1991) - Petrography of the granite massif from drill cutting analysis and well log interpretation in the HDR borehole GPK1 (Soultz, Alsace, France) *Geotherm. Sci. Tech.*, 3 (1-4), pp 1-29.
- Trainea H., Budeus P., Genter A., Tenzer H. (1992) - Core data and well-logging responses in a deep granite body destined for HDR experiments (Soultz, France). *6th International Symposium on observation of the continental crust through drilling*, Paris, 7-10 April, Abstract, p. 243.

Figures

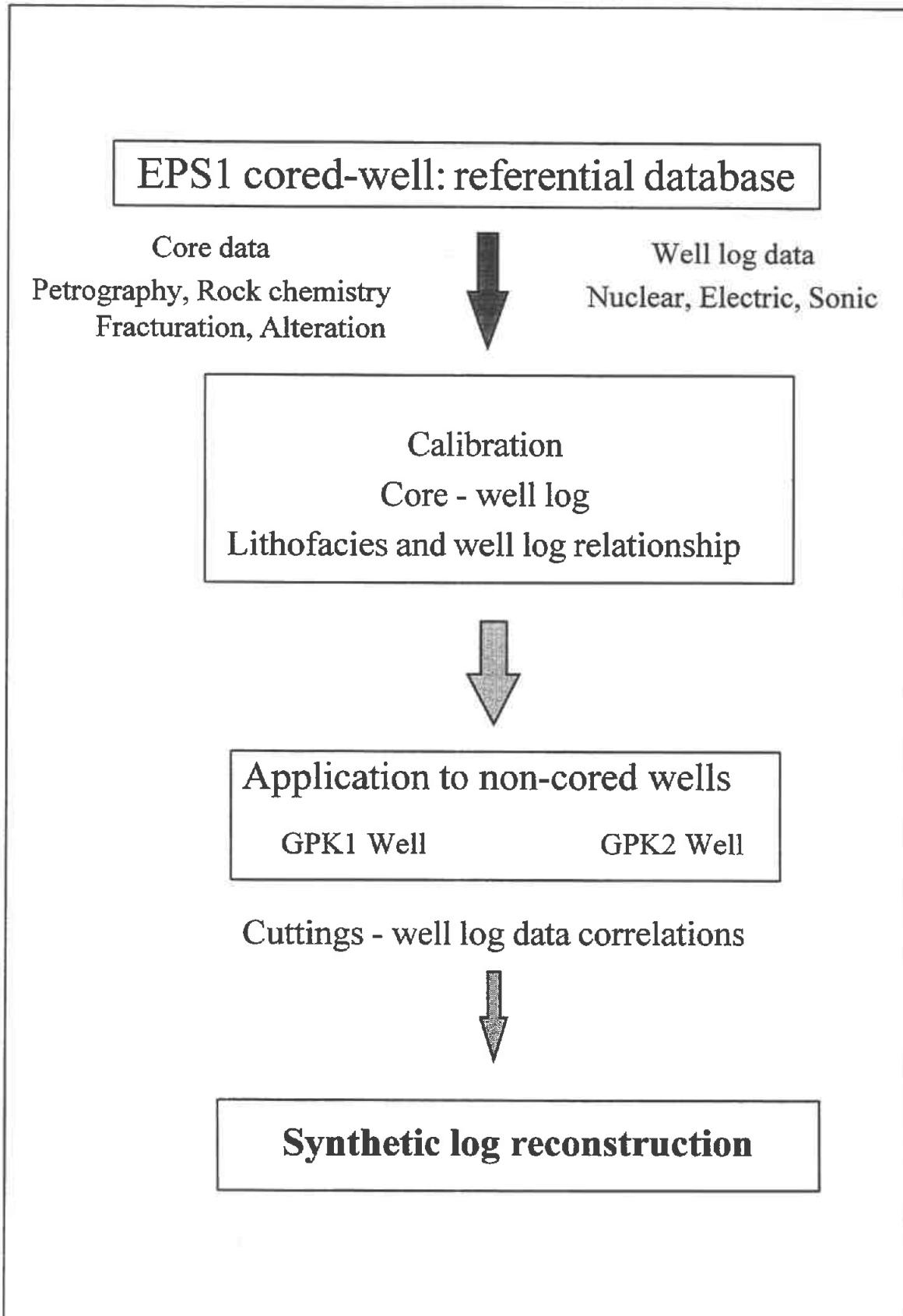


Fig. 1 - Flow diagram for reconnaissance of deep geology through well-logging data

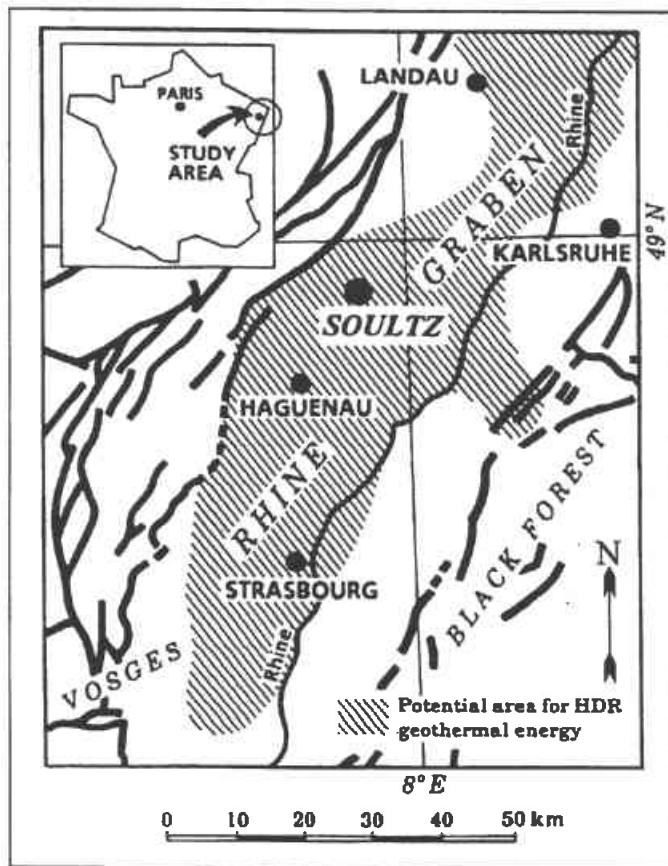


Fig. 2 - Location of the Soultz site in the Rhine graben

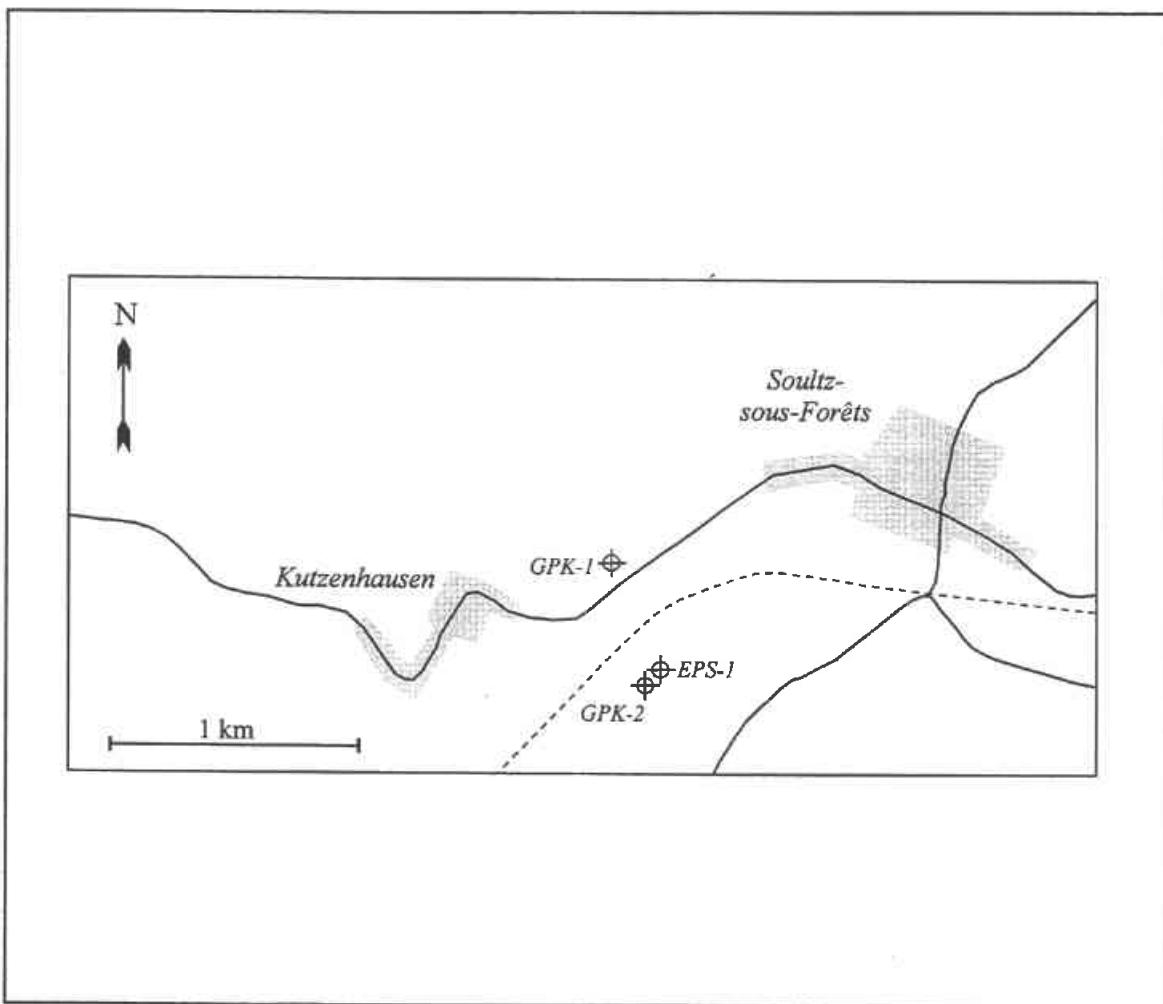


Fig. 3 - Borehole network at Soultz

Synthesis of geological and geophysical data at Soultz-sous-Forêts (France)

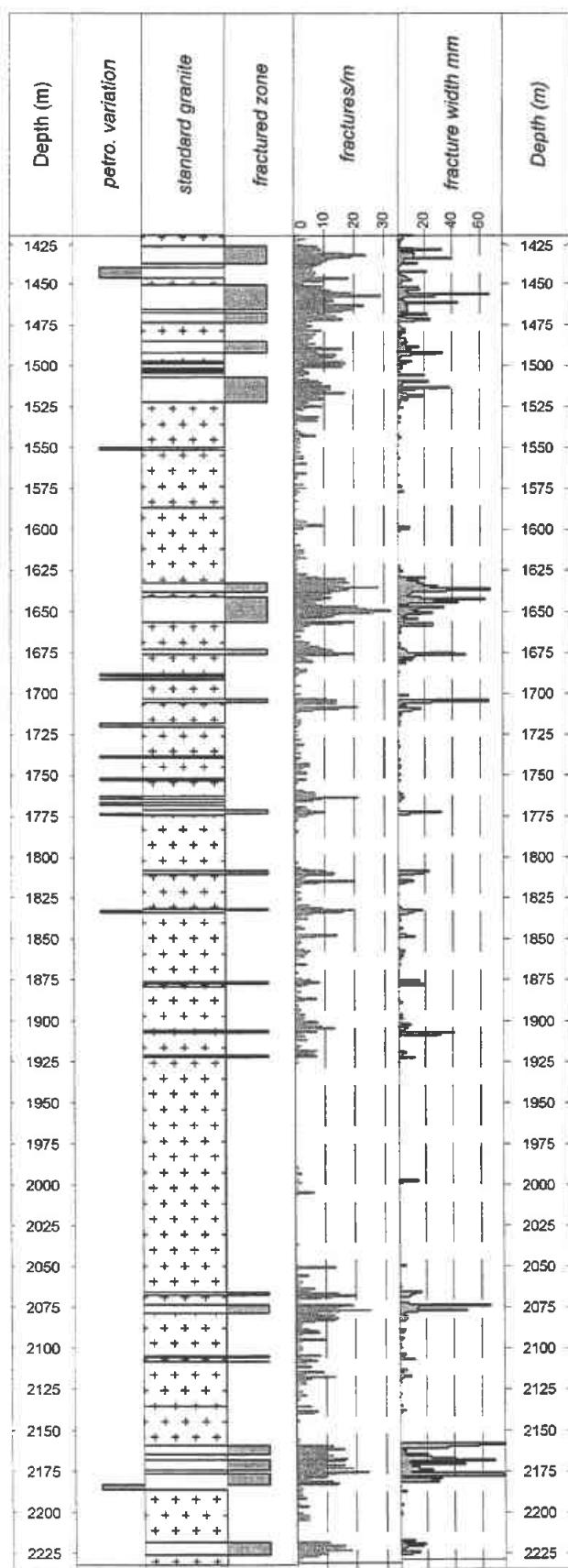


Fig. 4 - Synthetic composite log of EPS1 between 1420-2230 m from core data examination

*Figures 5 (a, b, c, d) - Major chemical element content versus depth
for petrographic variations in Well EPS1*

- a - SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3
- b - Fe_2O_3 total, MgO , CaO
- c - K_2O , U, Th
- d - Na_2O , U/Th, Th/U

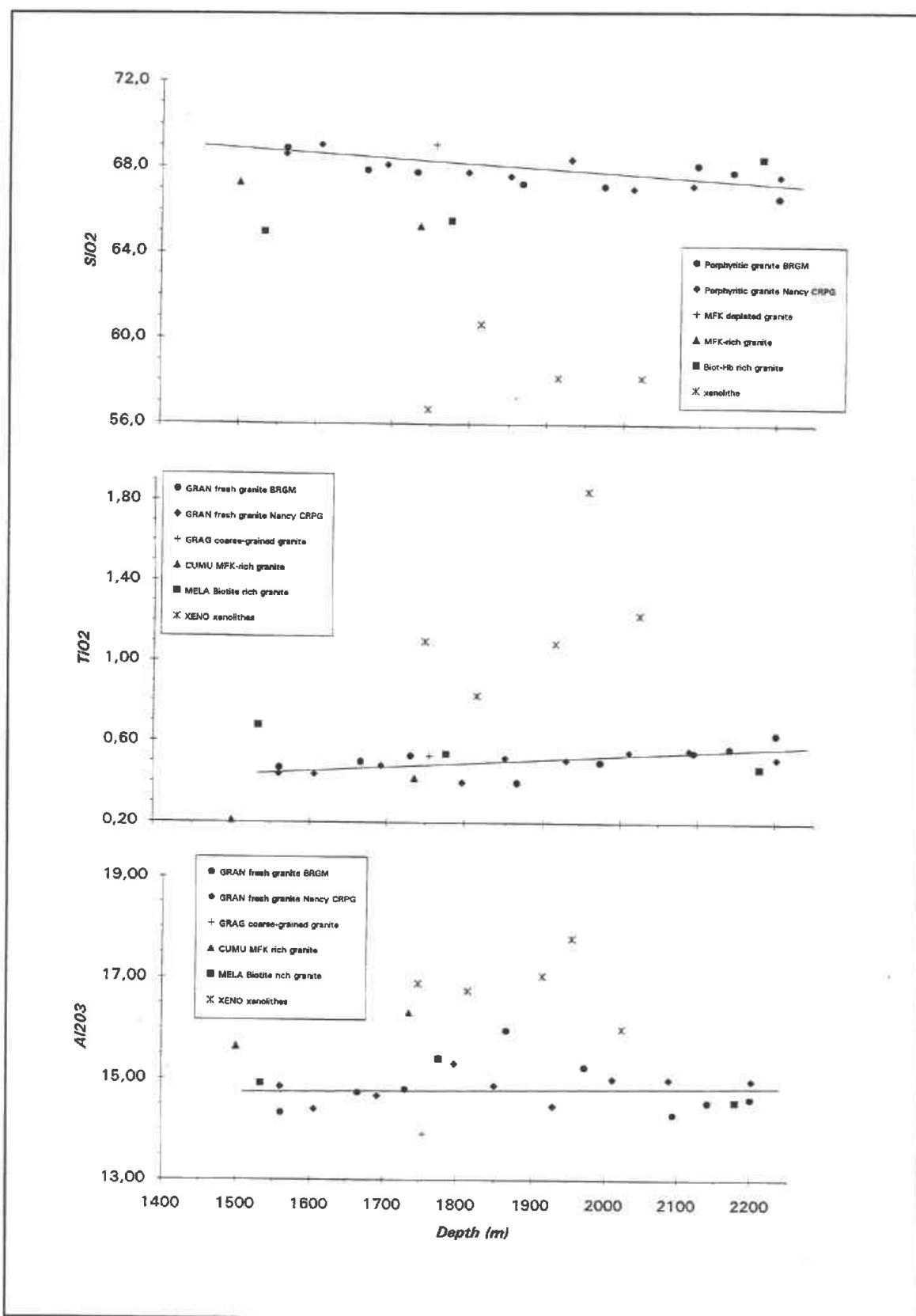


Fig. 5a

Synthesis of geological and geophysical data at Soultz-sous-Forêts (France)

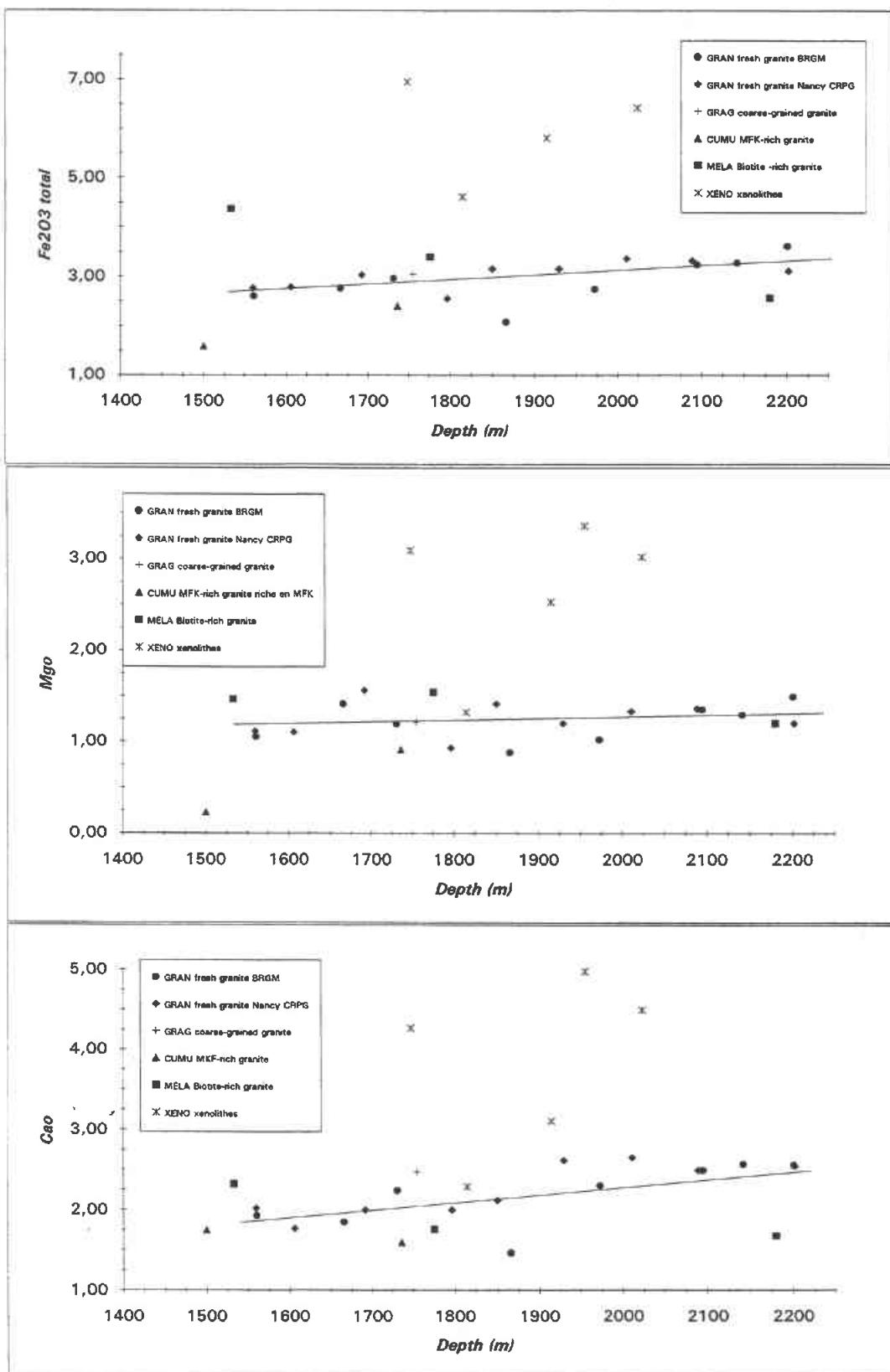


Fig. 5b

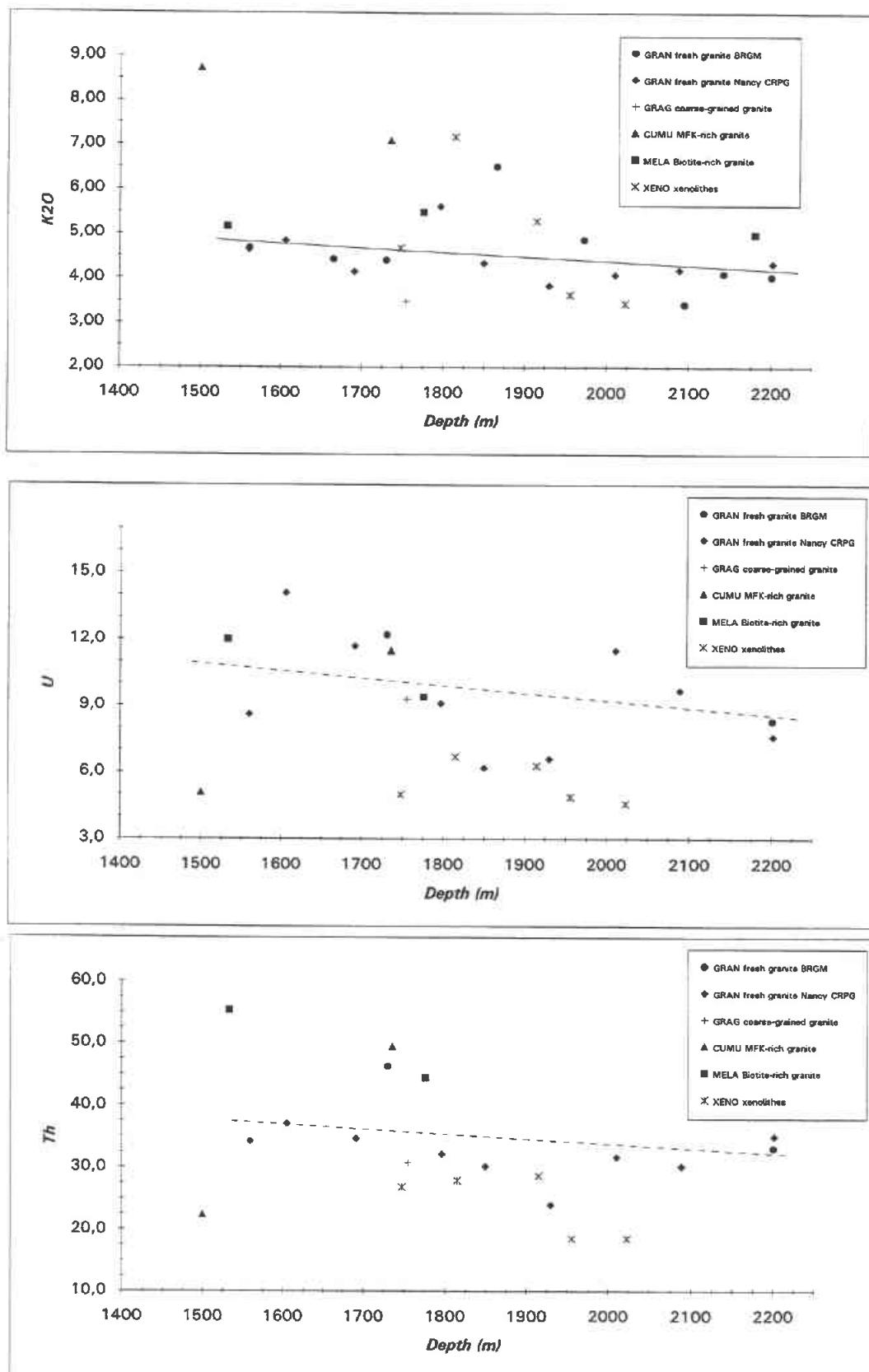


Fig. 5c

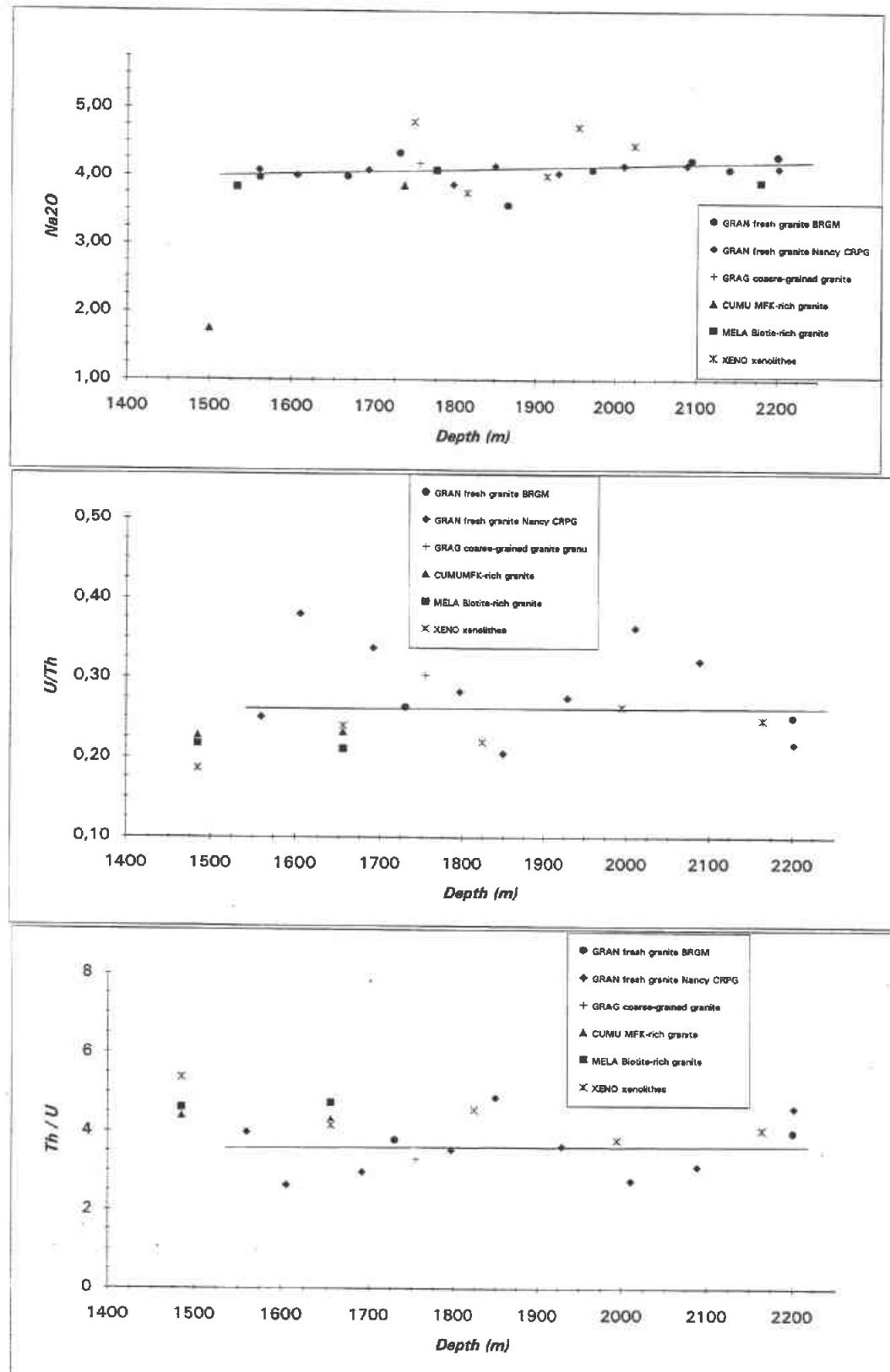


Fig. 5d

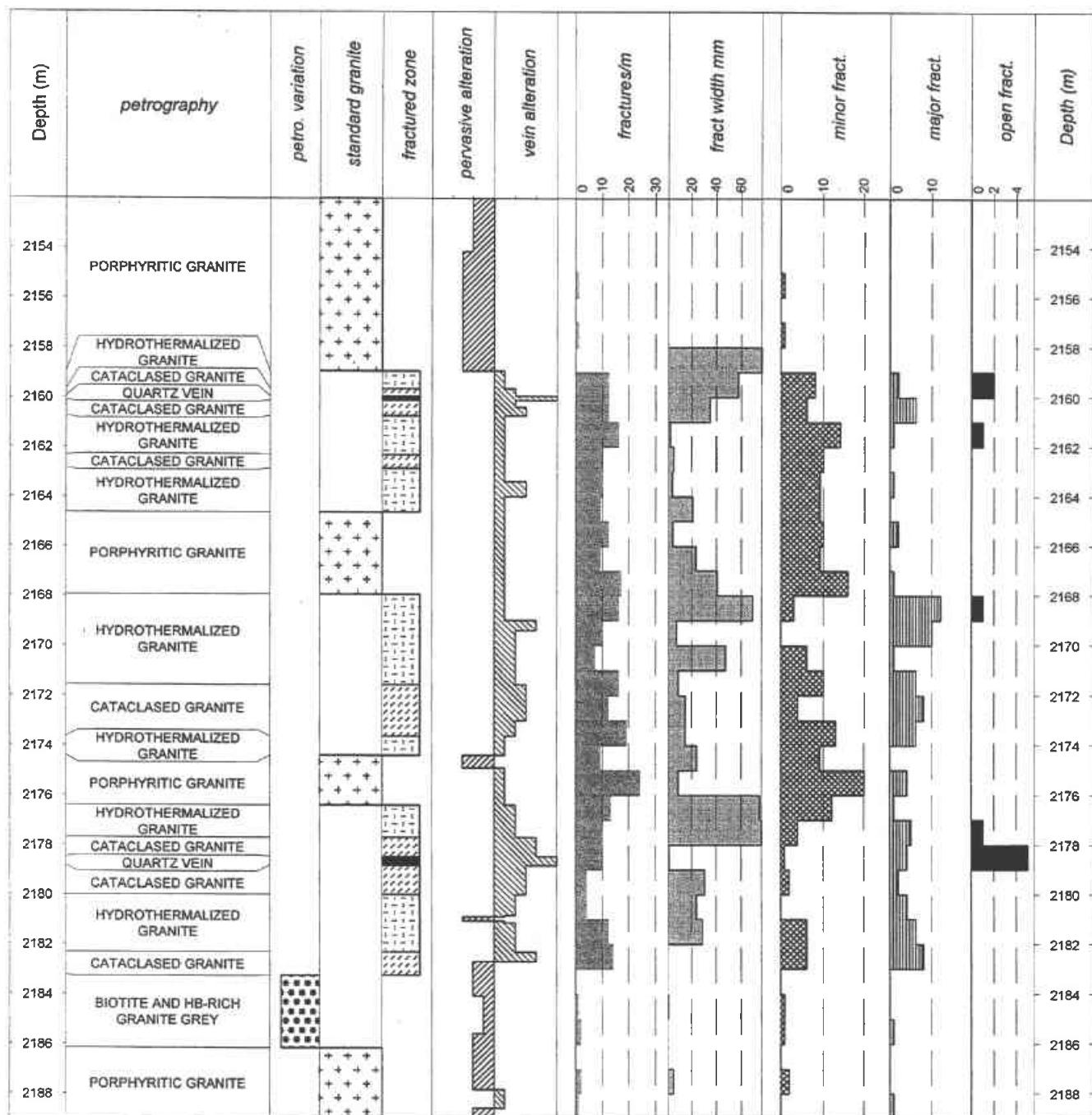


Fig. 6 - Example of fractured zone in Well EPS1

*Fig. 7 (a,b,c,d) - Major chemical element content versus depth
for altered-fractured facies in Well EPS1*

- a - SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3
- b - Fe_2O_3 total, MgO , CaO
- c - K_2O , U, Th
- d - Na_2O , U/Th, Th/U

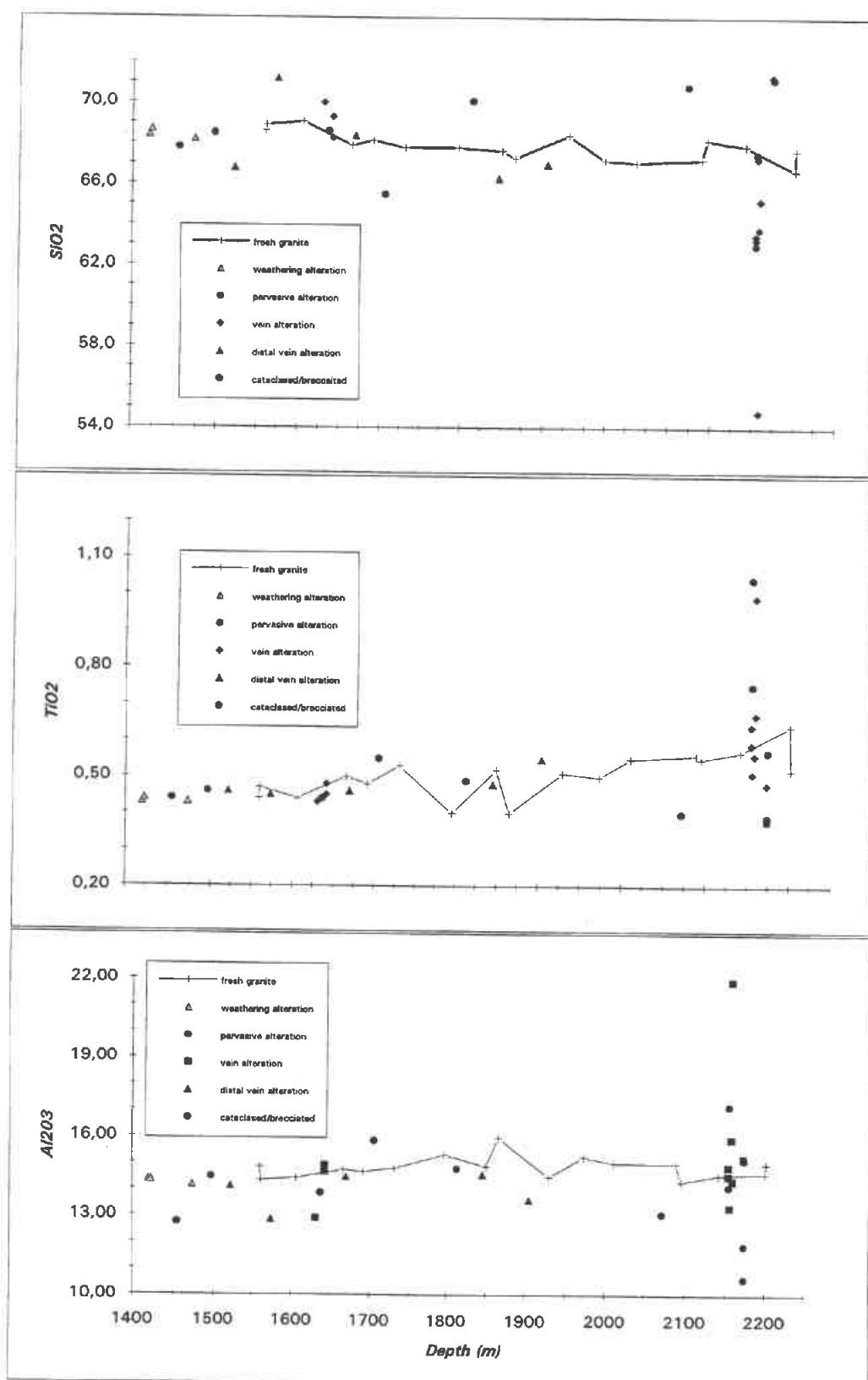


Fig. 7a

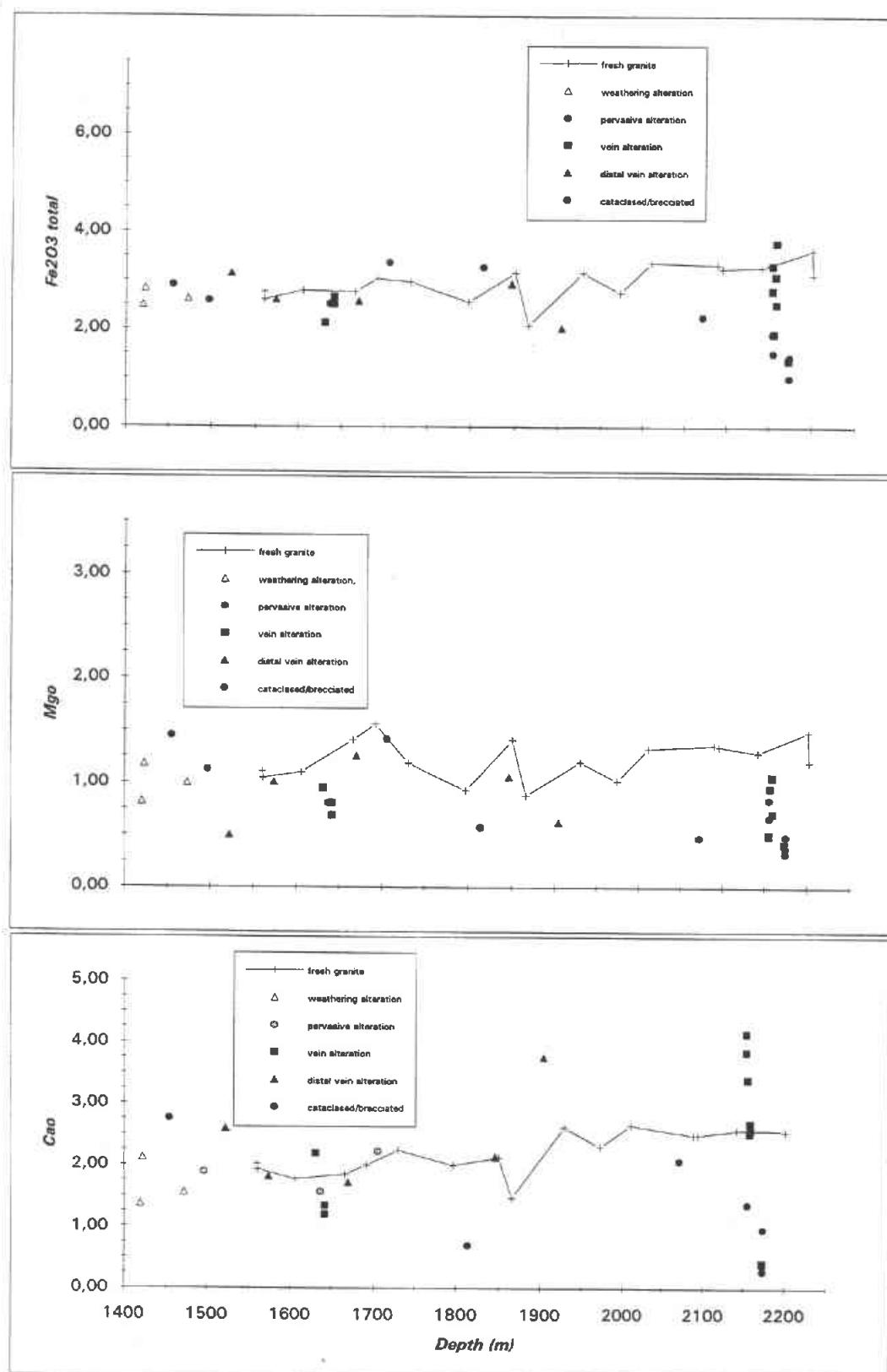


Fig. 7b

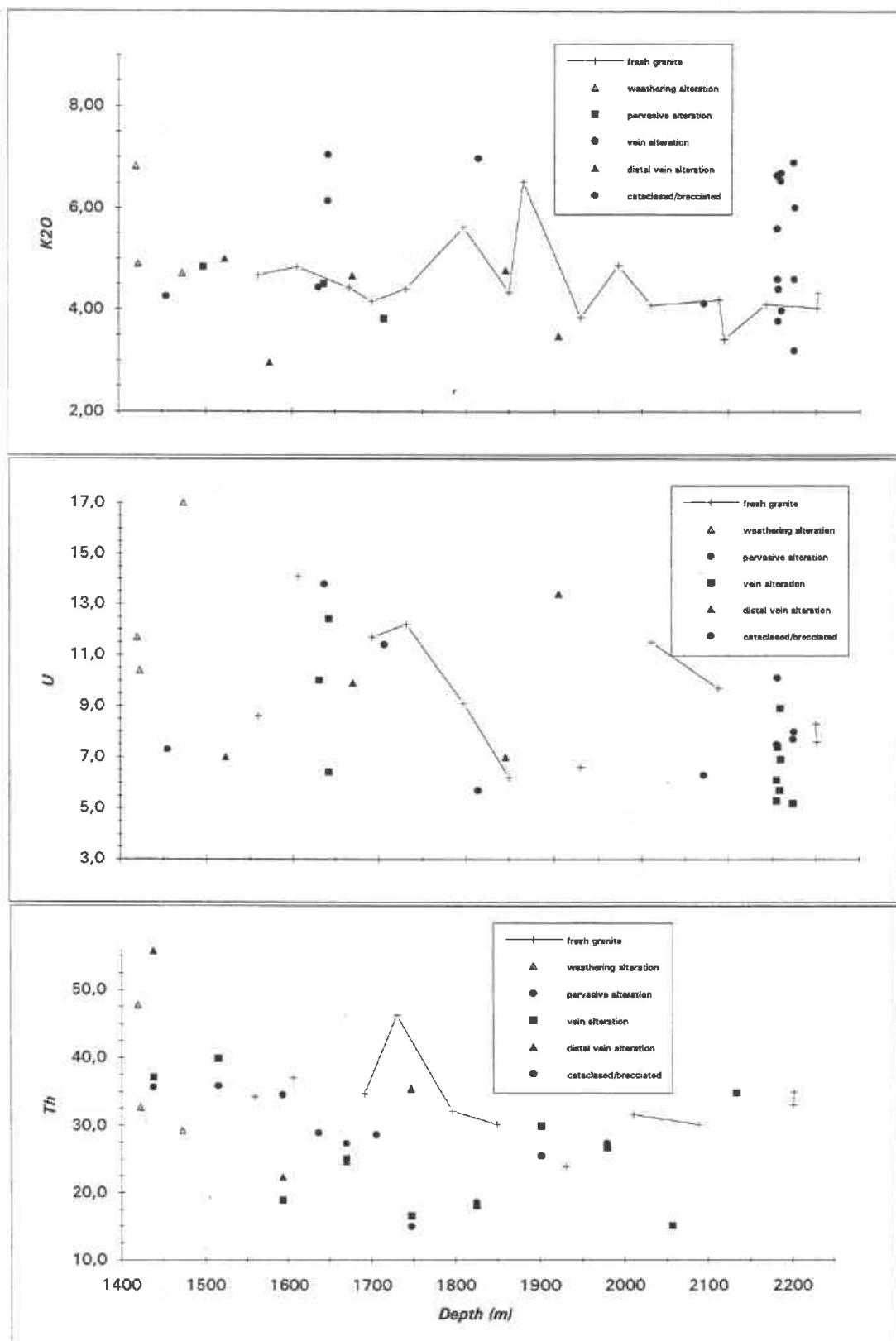


Fig. 7c

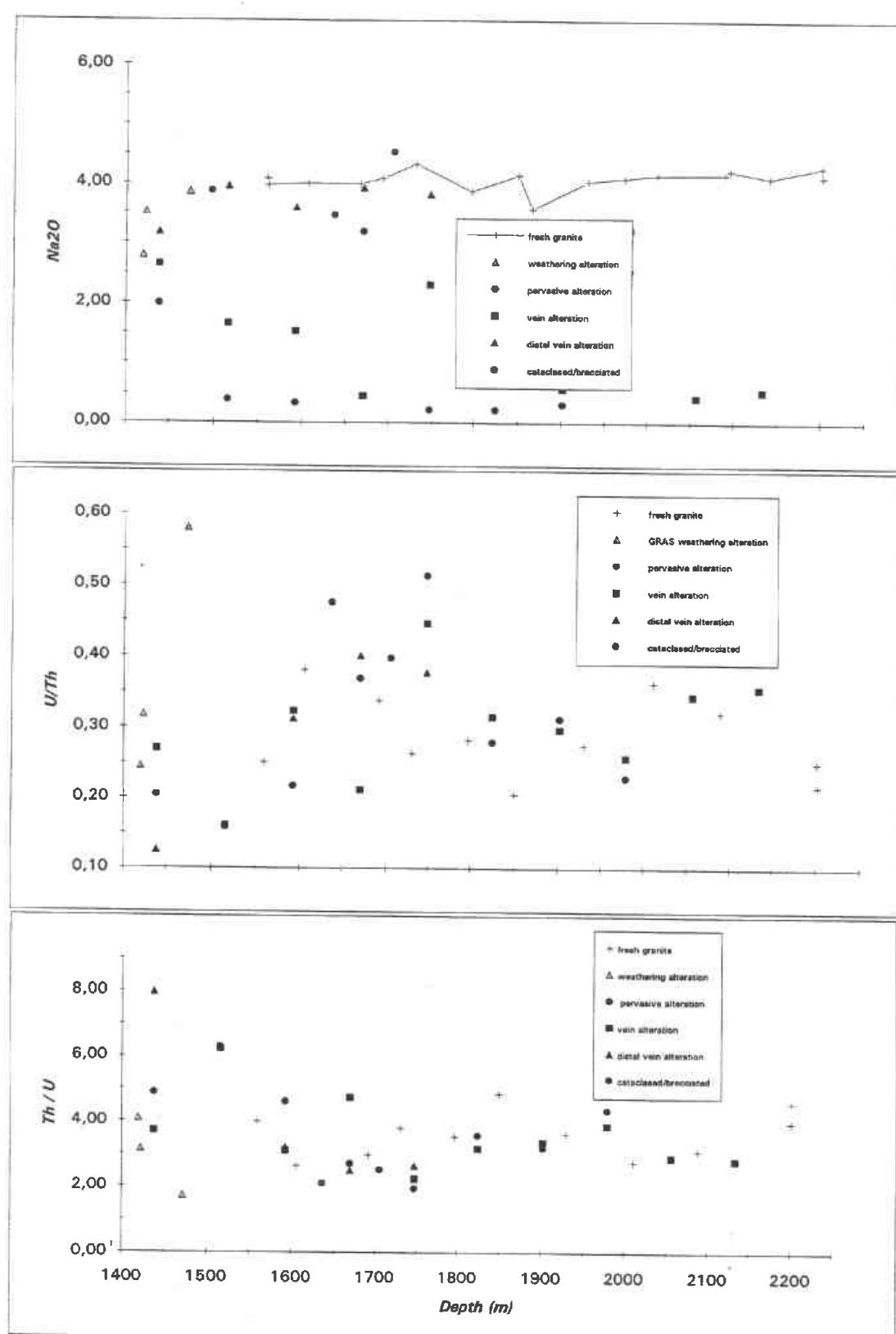


Fig. 7d

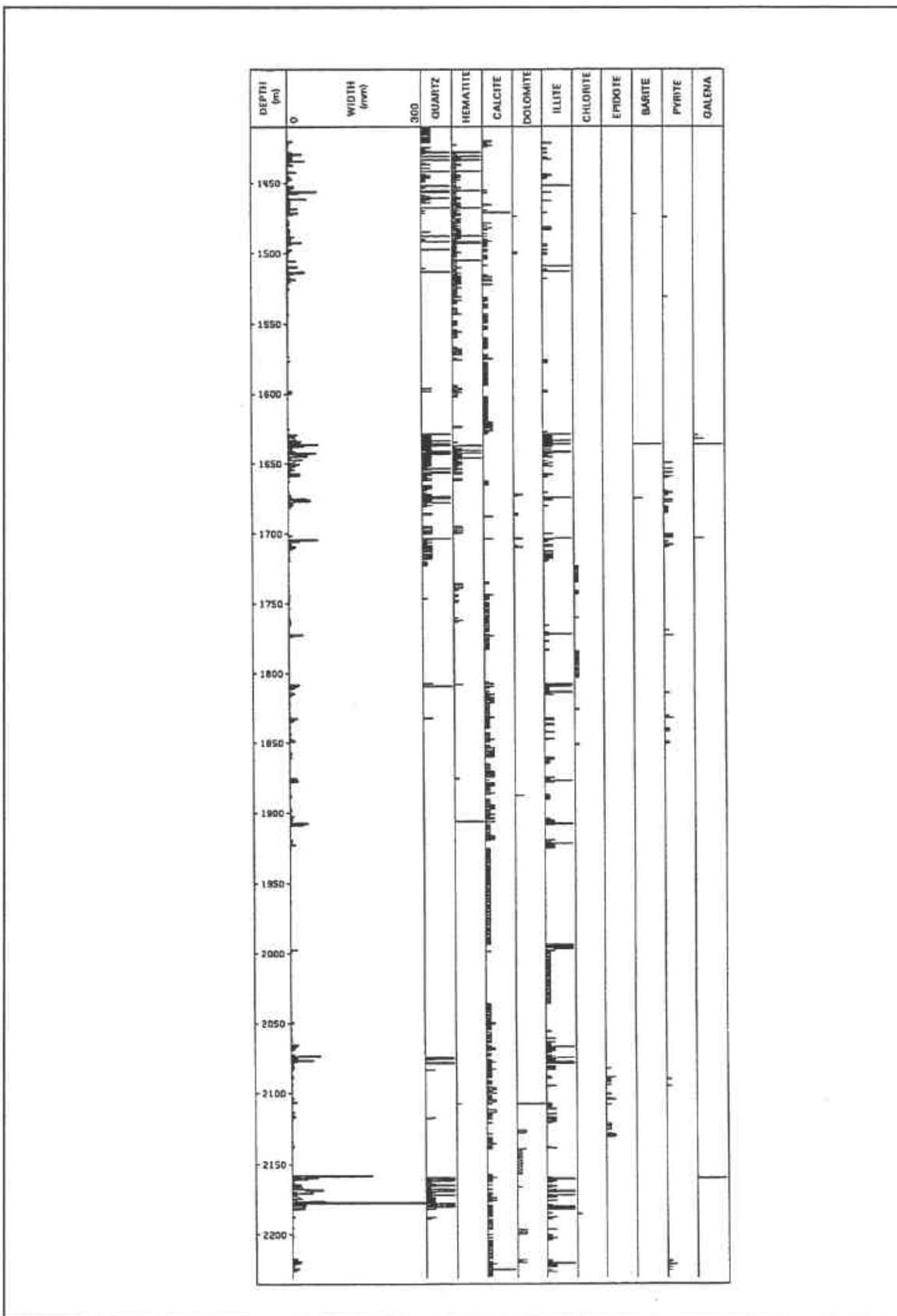


Fig. 8 - Distribution of minerals in fracture fillings in Well EPS1

Synthesis of geological and geophysical data at Soultz-sous-Forêts (France)

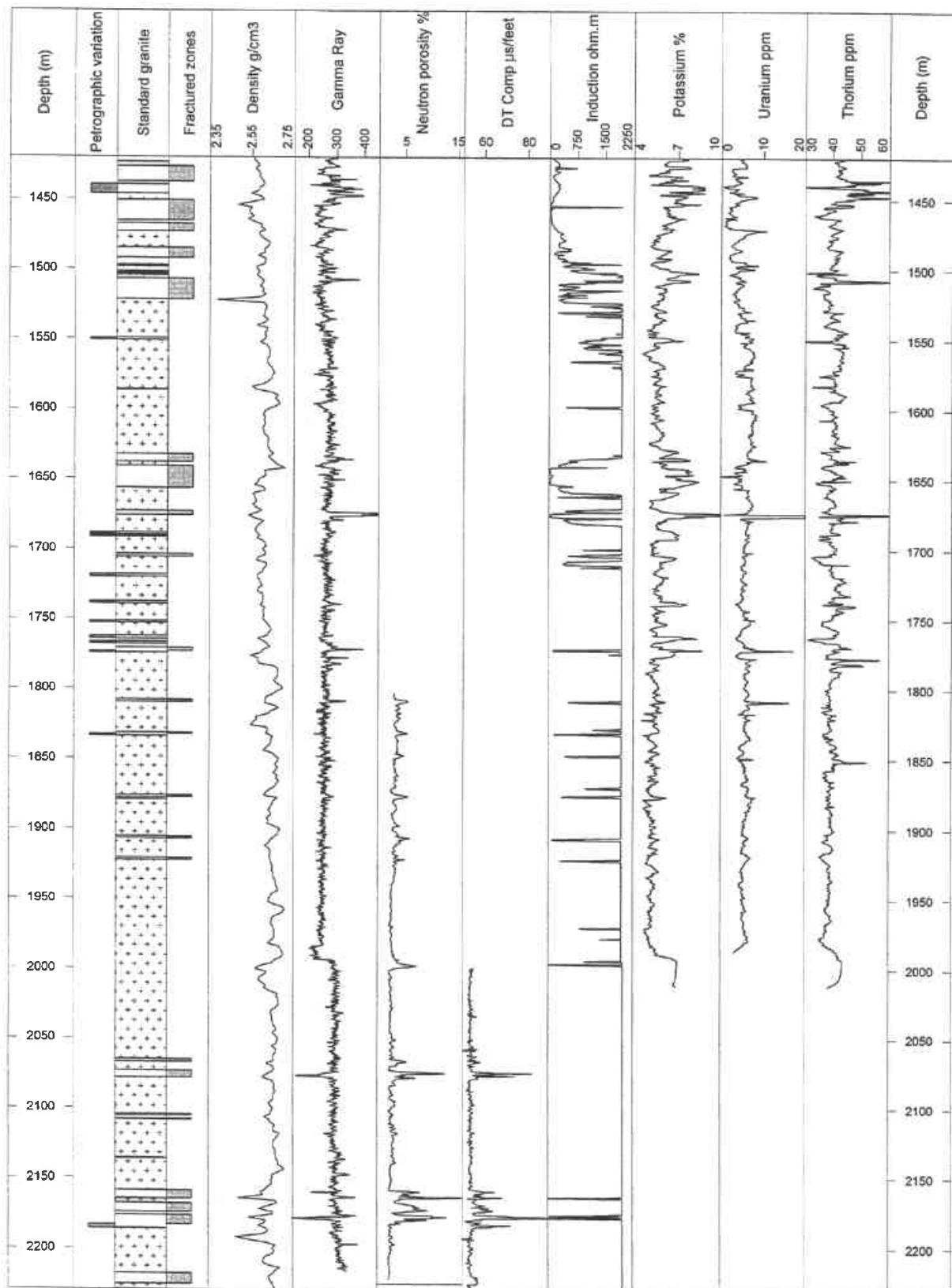


Fig. 9 - Well logging profile in Well EPS1

Synthesis of geological and geophysical data at Soultz-sous-Forêts (France)

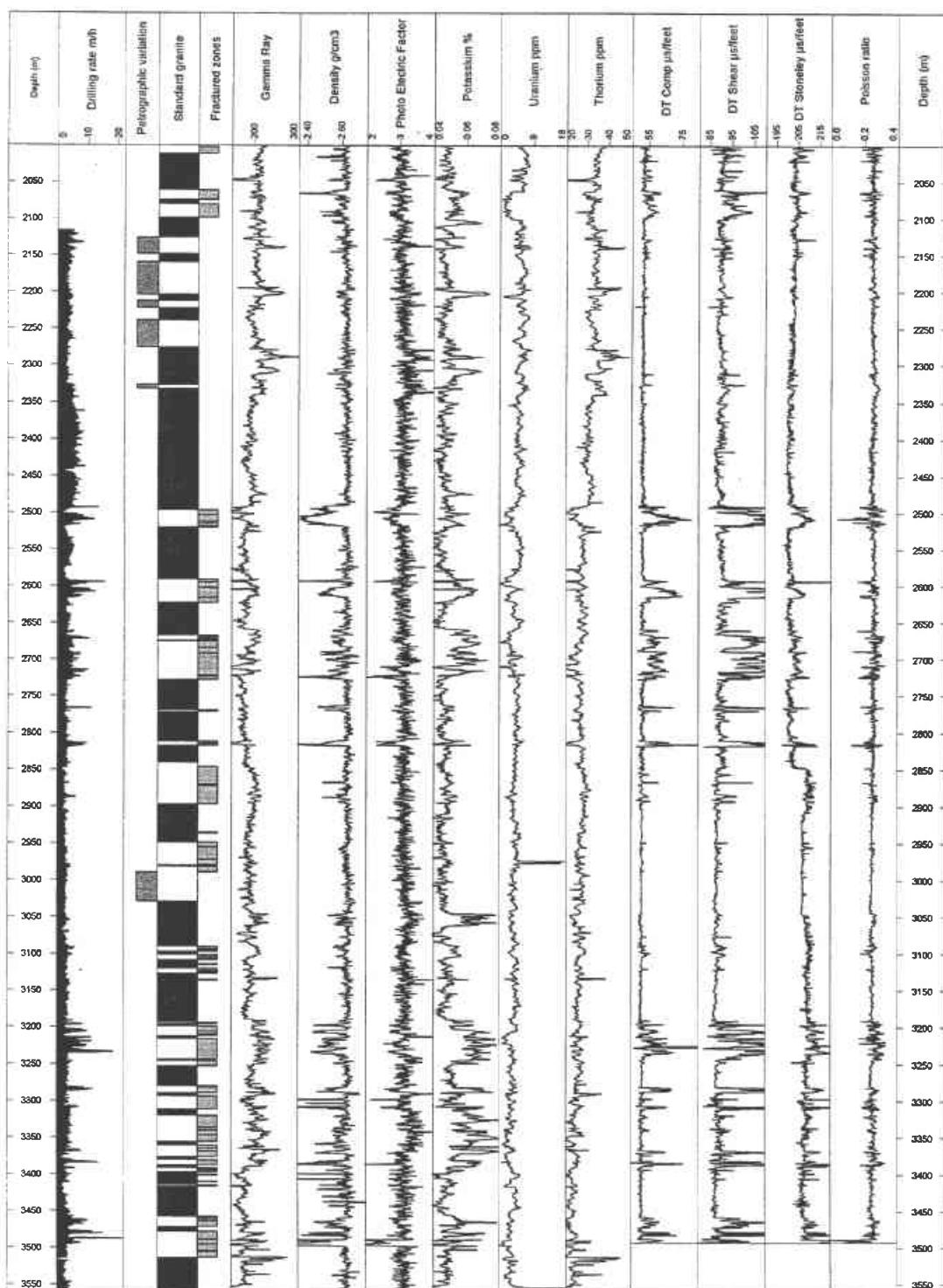


Fig. 10 - Geological and well logging profiles in Well GPK1

Synthesis of geological and geophysical data at Soultz-sous-Forêts (France)

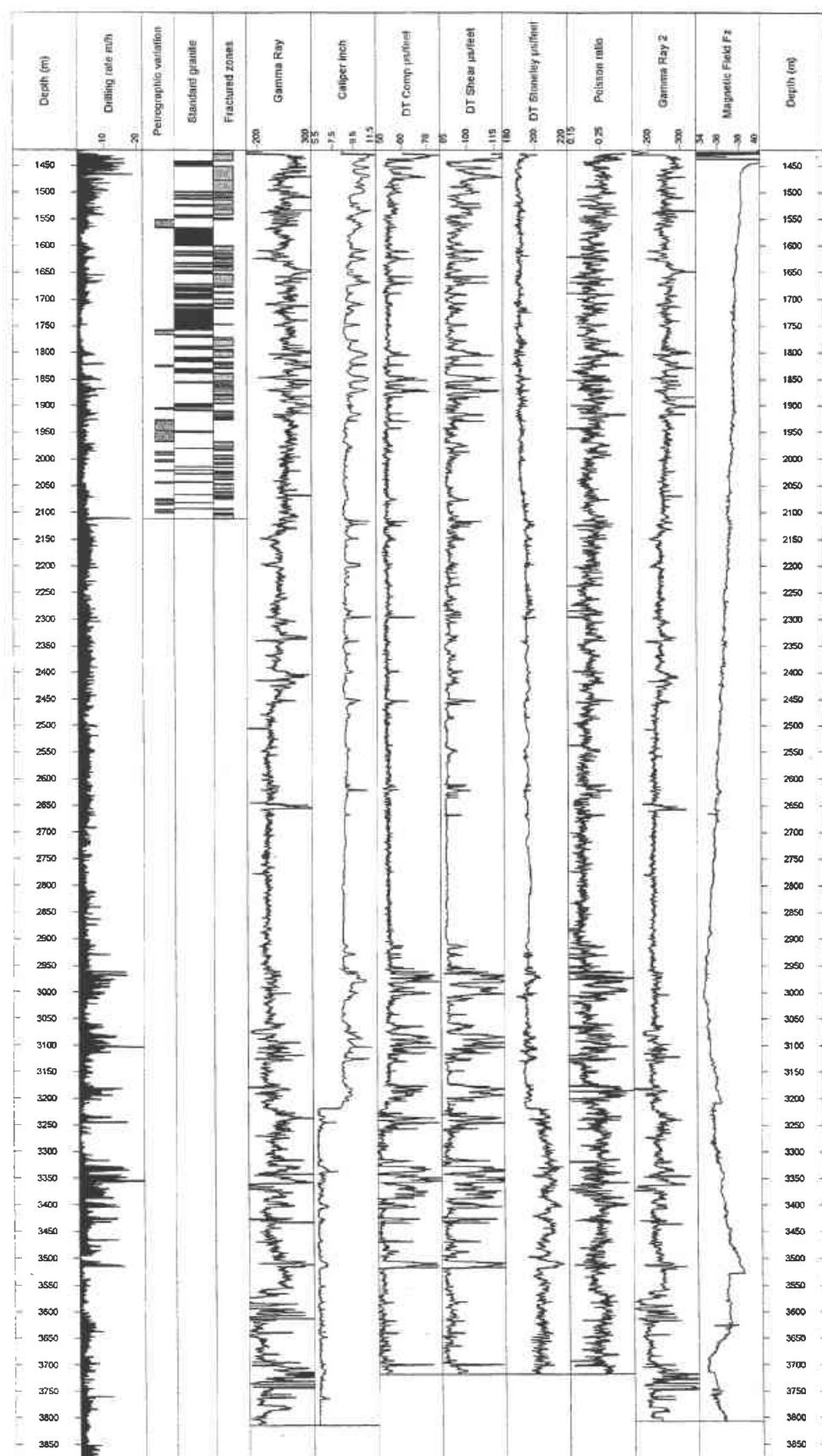


Fig. 11 - Composite geological log in Well GPK2

Tables

Type	Field	Data	
	<i>Lithology</i>	LITH PERV VEIN	Interpreted lithologic facies Degree of Pervasive alteration Degree of Vein alteration
Qualitative	<i>Mineralogy</i>	BIO PLA MFK FILL	Primary Biotite alteration type Primary Plagioclase alteration type Primary Biotite alteration type Nature of fracture fillings
	<i>Mineralogy</i>	CUMU	(Cumulative) thickness of fracture fillings per meter
		BRIT	(Cumulative) density of all natural brittle fractures per meter
Quantitative	<i>Fracturation</i>	JOIN BLOC MOVE BRII ARTI	(Cumulative) density of natural relaxation joints per meter (Cumulative) density of minor fractures per meter (Cumulative) density of major fractures per meter (Cumulative) density of void-bearing fractures per meter (Cumulative) density of artificial fractures per meter
Lab analysis			Thin section Whole rock chemistry on selected samples X-Ray Diffractometry on hydrothermal products Photographs of representative facies

Table 1 - Geological and analytical data collected in EPS1 core sections

Code	Petrographic description
GRAN	Standard porphyritic granite
MFKR	K-feldspar-rich porphyritic granite
CUMU	K-feldspar megacryst cumulate
MELA	Biotite-rich granite
XENO	Xenolite
HYDR	Hydrothermally altered granite
CATA	Cataclasized porphyritic granite
BREC	Brecciated granite
MBRE	Micobrecciated zone
PMYL	Protomylonitic zone
MYLO	Mylonitic zone or oriented cataclasite
VEIN	Geodic quartz vein

Table 2 - Lithofacies named based from EPS1 core analyses

GRANITE TYPE	Lab	sample	depth	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3t	MnO	MaO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	PF	U	Th
Porphyritic (standard)	Nancy-3	K96	1560	68,6	0,44	14,85	2,77	0,06	1,11	2,02	4,08	4,65	0,17	0,90	8,6	34,3
Porphyritic (standard)	Lot1-4	K 96-2510	1561	68,9	0,47	14,34	2,61	0,08	1,05	1,93	3,97	4,68	0,16	0,79		
Porphyritic (standard)	Nancy-4	K102	1606	69,1	0,44	14,41	2,79	0,06	1,10	1,77	4,00	4,84	0,17	0,96	14,1	37,1
Porphyritic (standard)	Lot1-5	K115-2879	1666	67,9	0,50	14,74	2,77	0,09	1,41	1,85	3,99	4,43	0,17	1,11		
Porphyritic (standard)	Nancy-6	K119	1692	68,2	0,48	14,67	3,04	0,05	1,56	2,00	4,08	4,15	0,20	1,30	11,7	34,7
Porphyritic (standard)	Lot1-6	K128-3076	1731	67,8	0,53	14,80	2,97	0,09	1,19	2,24	4,33	4,40	0,16	0,93	12,2	46,3
Porphyritic (standard)	Nancy-8	K136	1797	67,8	0,40	15,31	2,56	0,05	0,93	2,00	3,87	5,62	0,17	0,85	9,1	32,2
Porphyritic (standard)	Nancy-9	K143	1850	67,7	0,52	14,88	3,16	0,07	1,41	2,12	4,14	4,34	0,22	1,09	6,2	30,2
Porphyritic (standard)	Lot2-13	K145-3506	1866	67,3	0,40	15,97	2,08	0,07	0,88	1,47	3,57	6,52	0,14	0,81		
Porphyritic (standard)	Nancy-10	K155	1930	68,4	0,51	14,48	3,16	0,06	1,20	2,62	4,04	3,84	0,22	1,05	6,6	24,0
Porphyritic (standard)	Lot1-8	K160-3861	1973	67,2	0,50	15,24	2,75	0,08	1,02	2,30	4,09	4,87	0,16	0,72		
Porphyritic (standard)	Nancy-11	K169	2011	67,1	0,55	15,01	3,37	0,07	1,33	2,65	4,15	4,08	0,24	1,14	11,5	31,7
Porphyritic (standard)	Nancy-13	K181	2089	67,3	0,56	15,00	3,33	0,07	1,36	2,49	4,16	4,19	0,24	1,01	9,7	30,2
Porphyritic (standard)	Lot1-9	K182-44444	2095	68,2	0,55	14,31	3,25	0,09	1,35	2,49	4,23	3,42	0,18	0,96		
Porphyritic (standard)	Lot1-10	K191-4646	2142	67,9	0,57	14,55	3,28	0,09	1,29	2,57	4,10	4,10	0,18	0,93		
Porphyritic (standard)	Lot1-11	K203-4925	2201	66,7	0,64	14,62	3,62	0,10	1,49	2,56	4,29	4,03	0,19	0,86	8,3	33,1
Porphyritic (standard)	Lot1-12	K203	2202	67,7	0,52	14,98	3,12	0,06	1,20	2,54	4,12	4,33	0,22	0,82	7,6	35,0
Porphyritic (standard)	Nancy-14	K203	Mean	67,9	0,50	14,83	2,98	0,07	1,23	2,21	4,07	4,50	0,19	0,95	9,6	33,5
		Stand dev	0,7	0,06	0,41	0,37	0,02	0,20	0,35	0,17	0,71	0,03	0,15	0,15	2,5	5,5
KFM-depleted	Lot1-16	K131-3147	1755	69,1	0,53	13,92	3,06	0,09	1,21	2,47	4,18	3,49	0,18	0,91	9,3	30,7
KFM cumulative	Lot1-12	K 86-2290	1500	67,3	0,21	15,64	1,59	0,05	0,23	1,75	1,75	8,74	0,06	2,10	5,1	22,4
KFM-rich	Lot1-14	K128-3086	1736	65,3	0,42	16,32	2,41	0,08	0,91	1,60	3,86	7,10	0,12	0,82	11,5	49,5
		Mean	66,3	0,32	15,98	2,00	0,07	0,57	1,68	2,81	7,92	0,09	1,46	8,3	36,0	
		Stand dev	1,4	0,15	0,48	0,58	0,02	0,48	0,11	1,49	1,16	0,04	0,91	4,5	19,2	
Biot-Hb enriched	Nancy-2	K91	1533	65,0	0,68	14,92	4,37	0,10	1,46	2,32	3,84	5,16	0,20	1,53	12,0	55,3
Biot-Hb enriched	Nancy-7	K134	1776	65,6	0,54	15,41	3,40	0,08	1,54	1,76	4,08	5,49	0,19	1,60	9,4	44,5
Biot-Hb enriched	Lot1-17	K197-4B24	2180	68,5	0,47	14,56	2,57	0,08	1,20	1,68	3,91	4,99	0,18	0,93		
		Mean	66,4	0,56	14,96	3,45	0,09	1,40	1,92	3,94	5,21	0,19	1,35	10,7	49,9	
		Stand dev	1,9	0,11	0,43	0,90	0,01	0,18	0,35	0,12	0,25	0,01	0,37	1,8	7,6	
xenolite	lot1-16	K130-3123	1748	56,7	1,10	16,90	6,96	0,22	3,09	4,27	4,79	4,68	0,44	1,21	5,0	26,9
xenolite	lot2-14	K-138/3341	1815	60,7	0,83	16,76	4,62	0,12	1,32	2,29	3,75	7,18	0,30	1,41	6,7	27,9
xenolite	lot2-15	K-161/3672	1915	58,2	1,09	17,05	5,81	0,15	2,53	3,11	4,00	5,29	0,60	1,44	6,3	28,7
xenolite	lot2-16	K-158/3812	1955	52,5	1,85	17,80	8,35	0,20	3,36	4,98	4,72	3,63	0,62	1,22	4,9	18,6
xenolite	lot2-17	K-172/4112	2024	58,2	1,23	16,00	6,43	0,19	3,02	4,50	4,45	3,44	0,35	1,23	4,6	18,6
		Mean	57,3	1,22	16,90	6,43	0,18	2,66	3,83	4,34	4,84	4,46	1,30	5,5	24,1	
		Stand dev	3,0	0,38	0,64	1,38	0,04	0,81	1,10	0,45	1,51	0,14	0,11	0,9	5,1	

Table 3a - Chemical composition of the standard granite and facies petrographic variations

Synthesis of geological and geophysical data at Soultz-sous-Forêts (France)

GRANITE TYPE	lab	sample	dept.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	eT03	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P2O ₅	PF	U	'Th		
weathering alteration	Lot1-1	K 74-2016	1420	68.4	0.43	14.37	2.49	0.07	0.82	1.37	2.79	0.83	0.16	1.24	11.7	47.8	
weathering alteration	Nancy-1	K75	14223	68.7	0.44	14.36	2.83	0.06	1.18	2.12	3.52	4.91	0.17	1.44	10.4	32.7	
				Mean =	68.5	0.44	14.37	2.66	0.07	1.00	1.75	3.16	5.87	0.17	1.34	11.1	40.3
				Stand dev =	0.2	0.01	0.24	0.01	0.26	0.53	0.52	1.36	0.01	0.14	0.9	10.7	
hematised facies	Lot1-2	K 81-2198	1473	68.2	0.43	14.15	2.62	0.08	1.00	1.56	3.86	4.72	0.17	2.35	17.0	29.3	
permeative alteration	Lot1-3	K 85-2281	1497	68.5	0.46	14.46	2.59	0.08	1.13	1.89	3.87	4.84	0.15	1.24			
permeative alteration	Lot1-19	K 109-2782	1637	68.8	0.44	13.86	2.52	0.10	0.81	1.57	3.47	4.51	0.13	3.06	13.8	29.0	
permeative alteration	Lot1-13	K 122-2999	1706	65.5	0.55	15.85	3.37	0.09	1.42	2.22	4.53	3.82	0.14	2.70	11.4	28.7	
				Mean =	67.5	0.48	14.72	2.83	0.09	1.12	1.89	3.96	4.39	0.14	2.33	12.6	28.9
				Stand dev =	1.8	0.06	1.02	0.47	0.01	0.31	0.33	0.54	0.52	0.01	0.96	1.7	0.2
vein alteration	Lot1-26	K 108-2759	1631	70.0	0.43	12.89	2.13	0.11	0.95	2.19	2.64	4.44	0.17	3.98	10.0	37.1	
vein alteration	Lot1-21	K 109-2798	1642	69.3	0.45	14.90	2.51	0.08	0.69	1.34	1.65	6.15	0.17	3.24	6.4	39.9	
vein alteration	lot2-1	K 19314692	2156	63.3	0.64	14.87	2.90	0.10	0.51	4.15	1.52	5.60	0.24	5.46	6.1	18.9	
vein alteration	lot2-2	K 19314692	2156	63.5	0.59	14.53	3.31	0.12	0.50	3.85	0.45	6.65	0.23	5.66	5.3	25.1	
vein alteration	lot2-5	K 19314698	2156	67.3	0.51	13.33	1.91	0.17	0.95	3.40	2.30	4.40	0.18	4.80	7.4	16.6	
vein alteration	lot2-6	K 1944705	2158	63.8	0.56	15.93	3.09	0.08	1.06	2.52	1.50	6.55	0.21	4.05	5.7	18.1	
vein alteration	lot2-7	K 1944709	2159	54.8	0.99	21.92	2.51	0.16	1.05	2.68	0.57	6.70	0.38	7.49	8.9	30.0	
vein alteration	lot2-8	K 1944712	2160	65.2	0.67	14.35	3.78	0.09	0.71	2.57	3.22	3.98	0.23	4.48	8.9	26.8	
vein alteration	lot2-9	K 1954776	2173	71.3	0.48	15.21	1.37	-0.02	0.42	0.41	0.42	6.90	0.19	2.50	5.2	15.1	
vein alteration	Nancy-5	K109	1642	68.3	0.48	14.67	2.67	0.04	0.81	1.20	0.53	7.05	0.22	3.76	12.4	34.9	
				Mean =	65.7	0.58	15.26	2.61	0.09	0.77	2.43	1.48	5.84	0.22	4.54	7.4	26.3
				Stand dev =	4.8	0.16	2.50	0.70	0.06	0.24	1.19	1.00	1.16	0.06	1.41	2.3	9.0
distal vein alteration	Lot1-18	K 89-2373	1522	66.8	0.46	14.11	3.15	0.06	0.50	2.59	3.18	5.00	0.15	3.19	7.0	55.8	
distal vein alteration	Lot1-25	K 97-2551	1574	71.2	0.45	12.86	2.61	0.08	1.01	1.82	3.95	2.96	0.17	1.87			
distal vein alteration	Lot1-22	K 142-3442	1846	66.3	0.48	14.56	2.94	0.07	1.06	2.14	3.59	4.78	0.16	2.91	7.0	22.4	
distal vein alteration	Lot1-20	K 117-2800	1670	68.4	0.46	14.47	2.58	0.09	1.26	1.72	3.92	4.67	0.15	1.80	9.9	24.7	
distal vein alteration	Lot1-23	K 150-3646	1905	67.0	0.55	13.61	2.03	0.10	0.63	3.78	3.82	3.48	0.19	4.45	13.4	35.5	
				Mean =	67.9	0.48	13.92	2.66	0.08	0.89	2.41	3.69	4.18	0.16	2.84	9.3	34.6
				Stand dev =	2.0	0.04	0.70	0.43	0.02	0.32	0.83	0.32	0.90	0.02	1.09	3.0	15.2
detached	Lot1-24	K 79-2128	1455	67.8	0.44	12.73	2.91	0.15	1.45	2.76	1.99	4.26	0.15	5.20	7.3	35.7	
detached	Lot1-27	19-GPK1.1	1814	70.1	0.49	14.78	3.28	0.06	0.58	0.70	0.39	6.98	0.23	2.50	5.7	35.9	
detached	lot2-3	K 19314694	2155	63.0	1.04	14.11	1.90	0.16	0.84	5.93	0.33	4.60	0.25	7.16	7.5	34.6	
detached	lot2-4	K 19314696	2156	67.5	0.75	17.18	1.52	0.03	0.67	1.36	3.19	3.78	0.26	2.96	10.1	27.4	
detached	lot2-10	K 1954779	2174	78.3	0.38	11.87	1.01	-0.02	0.33	0.28	0.22	4.60	0.15	1.88	7.7	15.0	
detached	lot2-11	K 1954779	2174	81.0	0.39	10.63	1.01	-0.02	0.38	0.37	0.22	3.20	0.17	2.00	5.2	18.0	
detached	lot2-12	K 1954783	2175	71.2	0.57	15.14	1.44	0.04	0.49	0.96	0.31	6.02	0.21	2.95	8.0	25.8	
micro-biocrustated	Nancy-12	K178	20722	70.8	0.40	13.08	2.25	0.08	0.48	2.07	2.54	4.12	0.19	3.66	6.3	27.5	
				Mean =	71.2	0.66	13.69	1.92	0.06	0.66	1.80	1.15	4.70	0.20	3.64	7.2	27.6
				Stand dev =	5.9	0.23	2.06	0.84	0.07	0.36	1.87	1.22	1.23	0.04	1.80	1.5	7.8

Table 3b - Chemical composition of the altered fractured granite

Pervasive alteration facies		Core	Corrected depth	Sample Type	Primary biotite	I/S > 90	I/S 70-90	Smectite	C/S Coresite	C/S Tschudite	Chlorite 14	Chlorite 7	Quartz	Calcite	Dolom/Ank	Hematite	Pyrite	Petrographic type	Vein alteration degree	Pervasive alteration degree	Comments
Sequence	Sample ID																				
15	K86	1502.06	rock	XXX				X												4	Pervasive
21	K96	1563.34	rock	XX																1	Pervasive
23	K97	1576.02	rock	XXX																3	Pervasive
32	K115	1667.30	rock	XX				X												3	Pervasive
43	K128	1733.88	rock	XX				X												3	Pervasive
44	K129	1738.27	rock	XX				(X)												3	Pervasive
45	K130	1750.49	rock	XX				(X)												3	Pervasive
46	K131	1756.73	rock	XX				X												3	Pervasive
58	K147	1881.81	rock	XX				X												3	Pervasive
61	K160	1976.26	rock	XXX				X												2	Pervasive
66	K182	2089.68	rock	XX				(X)												2	Pervasive
69	K191	2146.47	rock	XX				X												2	Pervasive
74	K197	2185.64	rock	XX				XX												2	Pervasive
76	K203	2206.38	rock	XX				(X)												2	Pervasive
20	K94	1545.88	fracture	XX				X												2	Pervasive
22	K97	1576.02	fracture	XX				X												3	Pervasive
24	K106	1623.67	fracture	XXX				XXX												3	Pervasive
42	K128	1731.52	fracture	X				XXX												3	Pervasive
62	K141	1837.98	fracture	XX				(X)												3	Pervasive
75	K197	2185.71	fracture	X				XX												2	Pervasive
Wastefilling facies																					
1	K72	1417.12	rock	X				XX												surface	
2	K74	1420.02	rock	XX				X												surface	
3	K74	1422.13	fracture	XX																4	surface

Table 4a - Diffraction RX results from bulk rock sample and mineral infilling analyse for pervasive alteration facies.

Vein alteration facies	Core	Corrected depth	Sample type	Primary biotite	Illite	I/S > 90	I/S 70-90	Smectites	C/S Corrensite	C/S Tschudite	Chlorite 14	Chlorite 7	Quartz	Calcite	Dolom/Aank	Hematite	Pyrite	Petrographic type	Vein alteration degree	Permissive alteration degree	comminutes	Vein		
5	K79	1465.81	rock	XXX	XX	X																		
7	K79	1458.60	rock	XXX	XXX																			
13	K85	1497.18	rock	XXX	XX																			
16	K86	1507.32	rock	XXX	XX																			
17	K88	1519.97	rock	XXX	XX																			
27	K108	1653.22	rock	XXXX	XXX																			
30	K109	1642.68	rock	XXXX	XXX																			
31	K109	1644.92	rock	XXXX	XXX																			
34	K117	1674.23	rock	XXX	XXX																			
36	K117	1675.48	rock	XXX	XXX																			
41	K123	1742.83	rock	XXX	XXX																			
70	K194	2162.89	rock	X																				
71	K194	2162.89	rock	XXX	XXX																			
72	K194	2163.90	rock	X																				
4	K75	1428.58	fracture	XXX	XXX																			
6	K79	1455.61	fracture	XXX	XXX																			
10	K83	1488.31	fracture	XXX	XXX																			
18	K88	1521.22	fracture	XXX	XXX																			
29	K109	1642.09	fracture	XXX	XXX																			
35	K117	1674.23	fracture	XXX	XXX																			
38	K121	1703.94	fracture	XXX	XXX																			
39	K121	1704.67	fracture	XXX	XXX																			
48	K133	1771.79	fracture	XX	(X)																			
49	K137	1808.23	fracture	XXX	XXX																			
73	K196	2182.76	fracture	XXX	XXX																			

Table 4b - Diffraction RX results from bulk rock sample and mineral infilling analyse for vein alteration facies.

Core	Cored depth	Primary biotite	I/S > 90	I/S 70-90	Smectite	C/S Coquenistie	C/S Tousdile	Chlorite 14	Quartz	Calcite	Dolom/Antk	Hematite	Pyrite	Petrographic type	Vein alteration degree	Evasive alteration facies	Comments	
																	distal vein	distal vein
8 K81	1474.99	rock	XX	X				X	X						GRAN	1	distal vein	
14 K85	1499.63	rock	XX	X											GRAN	4	distal vein	
19 K89	1524.89	rock	XX	(X)											GRAN	5	distal vein	
26 K108	1629.66	rock	XXX	(X)											CUMU	1	distal vein	
28 K109	1639.03	rock	XXX												GRAN	5	distal vein	
33 K117	1672.33	rock	XX					X							GRAN	3	distal vein	
40 K122	1707.76	rock	XX	(X)				X							GRAN	5	distal vein	
51 K140	1831.88	rock	XXX					XX							GRAN	5	distal vein	
54 K142	1848.32	rock	XX					X							GRAN	1	low vein	
55 K145	1875.18	rock	XX					X							GRAN	1	distal vein	
60 K150	1908.63	rock	XXX					X							GRAN	1	distal vein	
62 K163	1998.91	rock	XX					X							GRAN	1	distal vein	
63 K164	1998.32	rock	XXX					X							GRAN	2	low vein	
64 K163	1997.01	rock	XXX					(X)							GRAN	2	low vein	
9 K82	1482.14	fracture	XXX					X							GRAN	5	distal vein	
12 K84	1495.27	fracture	XX	X				X							GRAN	3	distal vein	
25 K108	1629.66	fracture	XXX					X							CUMU	1	3	distal vein
37 K117	1678.76	fracture	XXX					X							(X)	GRAN	3	distal vein
47 K132	1762.63	fracture	XX					X							GRAN	1	3	distal vein
50 K138	1813.90	fracture	XXX					X							GRAN	4	distal vein	
63 K142	1847.48	fracture	XXX					X							X	GRAN	1	distal vein
56 K145	1875.45	fracture	XXX					X							GRAN	1	distal vein	
57 K146	1876.20	fracture	XXX					X							GRAN	1	distal vein	
69 K150	1908.63	fracture	XXX					X							GRAN	1	distal vein	
65 K163	1997.01	fracture	XX					X							GRAN	2	distal vein	
67 K182	2104.30	fracture	XX					X							X	GRAN	2	distal vein
68 K186	2119.68	fracture	XXX					XX							GRAN	3	distal vein	

Table 4c - Diffraction RX results from bulk rock sample and mineral infilling analyse for distal vein alteration facies.

Type	Tool	Depth range	Data
NGT	Natural Gamma ray Spectrometry	1420-2230	GR Gamma ray (Gapi)
	"	1420-2000	URAN Uranium (ppm)
	"	"	THOR Thorium (ppm)
Radioactive *	FGC Formation Gamma Log Compensated	"	POTA Potassium (%)
FDC	Formation Density Log Compensated	1420-2000	RHOB Densite (g/cm ³)
CNL	Compensated Neutron Log	2000-2230	"
		1800-2230	NPHI Neutron Porosity (%)
BHC*	Borehole Compensated (sonic)	2000-2230	DT Transit Time (μs/ft)
VAL	Variable Acoustic Log (Terra Sonic)	1420-2000	SHEA Shear wave velocity (μs/ft)
Sonic	"	"	PVAL Calculated Porosity (%) (d=2.68g/cm ³)
	"	"	SMOD Shear Wave Modulus (GN/m ²)
	"	"	VERS Vertical Summation Low frequency (Hz)
DIT-E	Dual Induction Log (DIL)	1420-2000	SP Spontaneous Potential (mV)
	"	"	SN Short Normal (Ohm.m)
	"	"	LD Deep Induction Std Processed Resistivity (Ohm.m)
Induction *	"	"	LM Medium Induction Std Processed Resistivity (Ohm.m)
	"	"	DPH Induction Deep Phaser Resistivity (Ohm.m)
	"	"	IMPH Induction Medium Phaser resistivity (Ohm.m)
	"	"	CIDP Induction Deep Phaser Conductivity (m.Mho)
	"	"	CIMP Induction Medium Phaser Conductivity (m.Mho)
ISF	Induction electric Survey (IES)	2000-2230	SN Short Normal (Ohm.m)
	"	"	ILD Deep Induction Std Processed Resistivity (Ohm.m)
Hole Diameter*	Caliper	1420-2230	CALI Hole diameter (in)
Imager	BHTV Borehole Televiwer (DMT) Borehole Televiwer (BLM)	1420-2230 2000-2230	AMPLI Signal amplitude (DB) TT Transit Time (μs/ft)

(* Schlumberger tool)

Table 5 - Well-logging data recorded in Well EPS1

Well	EPS1	GPK1	EPS1	GPK1
Facies	Standard Granite	Standard Granite	Hydrothermally altered granite	Hydrothermally altered granite
Bulk Density (g/cm3)	2,63	2,63	2,59	2,56
Neutron Porosity (%)	2,79	-	7,09	-
Gamma-Ray (GAPI)	303	239	306	263
Potassium content (%)	5,6	4,85	7,2	6,23
Uranium content (ppm)	5,8	5,5	6,7	4,7
Thorium content (ppm)	40,2	30	42,3	28,2
P wave slowness (μs/feet)	54,1	51,8	60,3	59,7

Table 6 - Average value of physical parameters in Wells EPS1 and GPK1

Code	Petrographic description
GRAN	Standard porphyritic granite
MELA	Biotite-rich granite
HEMA	Hematised biotite porphyritic granite
MFKR	K-feldspar-rich porphyritic granite
PROP	Propylitised biotite porphyritic granite
LEG1	Leucogranite type 1
LEG2	Leucogranite type 2
HLOW	Altered granite (low-grade)
HMOD	Altered granite (moderate-grade)
HHIG	Altered granite (high-grade)
HEXT	Altered granite (very high-grade)

Table 7 - Petrographic types encountered in Well GPK1

Altered porphyritic granite (low grade, HLOW) Biotite in process of illitisation Plagioclase non modified
Altered granite (moderate grade, HMOD) Biotite transformed into illite Plagioclase non modified
Altered granite (high grade, HHIG) Biotite transformed into illite Plagioclase in process of illitisation
Altered granite (very high grade, HEXT) Biotite transformed into illite Plagioclase transformed into illite Occurrence of geodic quartz vein

Table 8 - Key for estimating the vein alteration grade in the altered granite facies observed in cutting samples of the GPK1 borehole

Type	Tool	Parameters	Depth (m)
Electric	Dual laterolog Tool	SP, LLD, LLS, MSFL, CALI, GR	1420 to 2000 m
Nuclear	Litho-Density Tool and Natural Gamma-Ray Spectroscopy Tool	PEF, RHOB, DRHO, NPHI, CALI, SGR, CGR, URAN, THOR, POTA	1420 to 2000 m 2000 and 3600 m
Sonic	Digital Sonic Array Tool	DTCO, DTSH, DTST, PR,	1420 to 2000 m
	Dipole Sonic Shear Imager Tool	DT4P, DT4S, DTST, PR	2000 and 3600 m
Caliper	Stratigraphic height resolution dipmeter tool	C1, C2, P1AZ, HAZI, DEVI, RB	1420 to 2000 m

Table 9 - Well-logging data recorded in Well GPK1

Synthesis of geological and geophysical data at Soultz-sous-Forêts (France)

Litho code	Illite	Chlorite	Vermiculite	R = 0	Miscel.	Corrensite	Tosudite	Depth (m)	Biotite	Illite	Chlorite	Carbonates	Comment
GRAN	80%	low	likely	trace	-	-	-	2065	XXX	Plag	X	X	-
HMOD	80%	low	likely	44% Sm	-	-	-	2075	XX	Plag	XX	-	mixing
HMOD	80%	low	likely	40% Sm	-	-	-	2096	X	Plag, biot	XX	X	mixing
MELA	75%	low	likely	infra trace	low	-	-	2200	XX	Plag	X	-	-
GRAN	85%	low	likely	trace	-	trace	-	2287	XX	Plag	XX	-	-
MFKR	85%	low	low	-	infra trace	-	-	2338	X	Plag, biot	X	X	mixing
GRAN	80%	low	likely	52% Sm	-	infra trace	-	2400	XX	Plag	XX	-	-
HHIG	25%	trace	-	-	-	70%	-	2520	-	Plag, biot	X	-	-
GRAN	80%	low	Verm	48% Sm	-	infra trace	-	2570	XX	Plag	XX	-	-
HHIG	90%	trace	likely	infra trace	-	-	-	2607	< X	Plag, biot	< X	X	-
HHIG	100%	infra trace	-	-	-	-	-	2615	< X	Plag, biot	< X	-	-
HMOD	95%	infra trace	-	infra trace	-	-	-	2719	< X	Plag, biot	< X	X	-
HMOD	95%	trace	trace	infra trace	-	-	-	2826	< X	Plag, biot	< X	-	-
HLOW	85%	low	likely	-	infra trace	-	-	2870	X	Plag, biot	X	-	mixing
HLOW	75%	low	-	-	-	-	-	2960	XX	Plag	XX	-	mixing
GRAN	85%	low	low	-	trace	-	-	3050	XX	Plag	XX	-	-
HHIG	95%	trace	-	trace	-	-	-	3237	< X	Plag, biot	< X	X	-
HMOD	75%	low	trace	infra trace	-	-	-	3296	< X	Plag, biot	< X	-	-
GRAN	60%	low	-	50% Sm	R = 1 likely	-	-	3306	X	Plag, biot	X	X	mixing
HMOD	60%	low	-	47% Sm	-	-	-	3328	XX	Plag	XX	-	-
HMOD	55%	low	-	low	R = 1 likely	-	-	3356	X	Plag	X	-	-
HHIG	45%	8%	-	63% Sm	R = 1 trace	trace	-	3385	< X	Plag, biot	< X	-	-
HHIG	22%	2%	-	72% Sm	-	-	-	3473	-	Plag, biot	X	-	-
HEXT	90%	trace	-	trace	R = 1 trace	-	-	3492	< X	Plag, biot	< X	-	-
HLOW	90%	low	-	infra trace	R = 1 infra trace	-	-	3501	< X	Plag, biot	< X	X	Quartz
GRAN	85%	low	-	infra trace	R = 1 infra trace	-	-	3584	< X	Plag	< X	-	mixing
						-	-	3590	X	Plag	X	-	-

Table 10 - X-Ray Diffraction results from cutting samples collected in Well GPK1

Type	Tool	Parameters	Depth (m)
Sonic	Multipole Acoustic MAC Western Atlas	DT P, S, Stoneley	2135 - 3800
	Digital Acoustic DAC Western Atlas	Wave forms, Poisson Ratio	1420 - 2135
Caliper	Diplog - 6 arms Western Atlas	C1, C2, C3 (3 diameters) R1, R2, R3, R4, R5, R6 (6 independent radii) 6 pads - resistivity	1420 - 3800
UBI	Ultrasonic Borehole Imager Schlumberger	Oriented Borehole Imagery Magnetic field	1420 - 3800

Table 11 - List of the geophysical well logs and borehole imagery carried out in Well GPK2

Appendices

Appendix 1

Photographic plates of macroscopic petrographic facies observed in Well EPS1 (Horizontal and vertical scales are similar).

Plate 1: Macroscopic photographs of standard granite facies observed in Well EPS1:

- (1) Grey-colored standard Soultz granite at 1748,50 m showing the significant size of the K-feldspar megacrysts and the occurrence of a small-size xenolite,
- (2) standard granite facies at 2140 m, and (3) standard granite at 1767,5 m showing a low degree of pervasive alteration (greenish color of plagioclase) and an early vein filled with clay minerals.

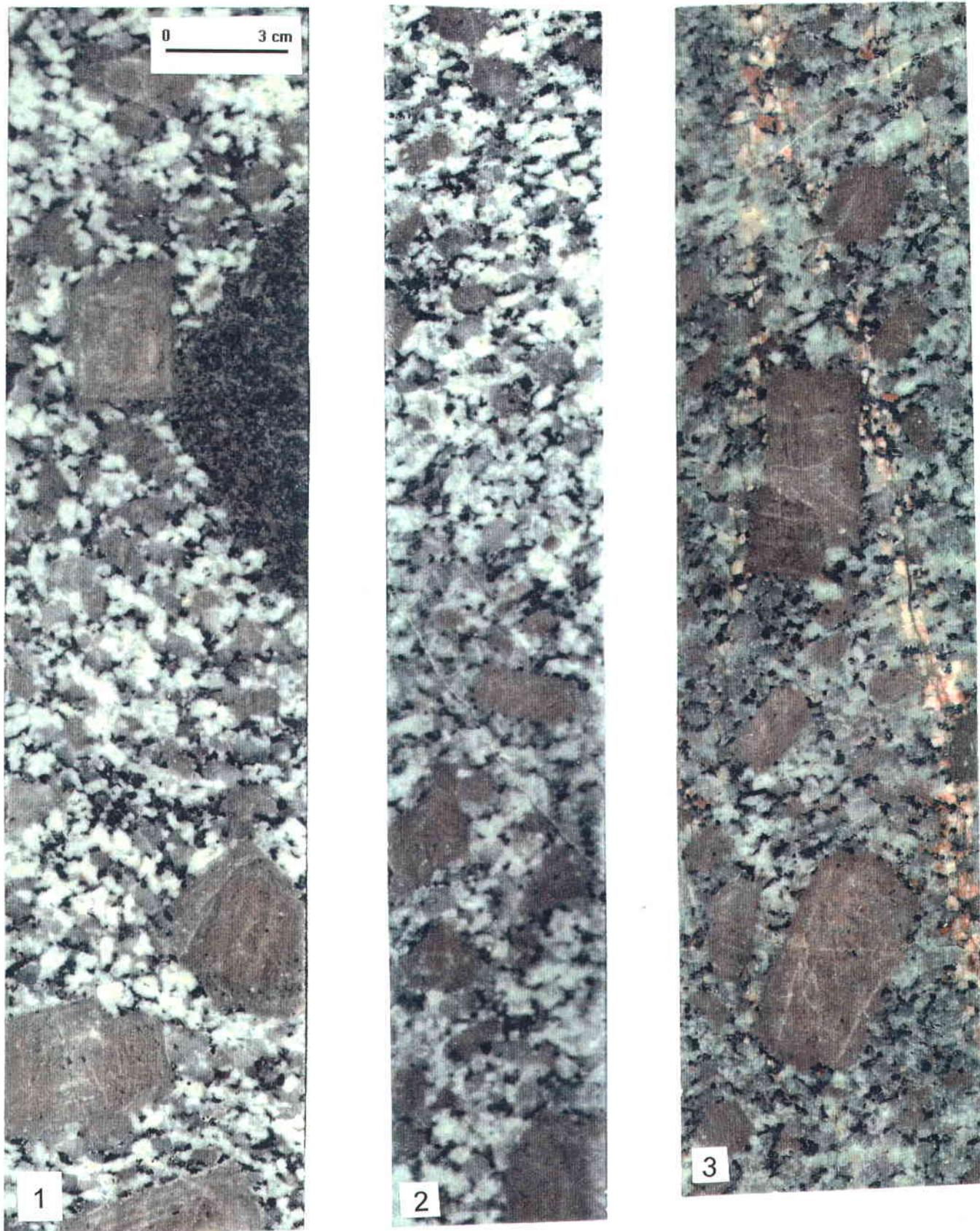


Plate 1

Appendix 1 (continuation)

Photographic plates of macroscopic petrographic facies observed in Well EPS1 (Horizontal and vertical scales are similar).

Plate 2: Macroscopic photographs of petrographic variations observed in Well EPS1:

- (1) K-feldspar rich-granite at 1737 m,
- (2) xenolite facies at 1955,5 m and
- (3) xenolite facies at 1814,5 m.

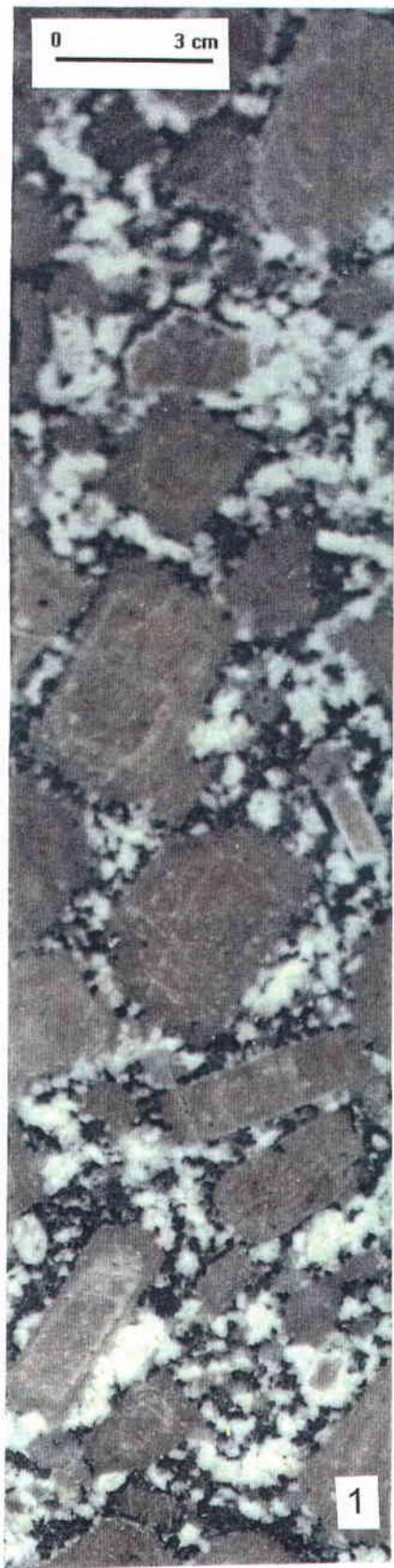


Plate 2

Appendix 1 (continuation)

Photographic plates of macroscopic petrographic facies observed in Well EPS1 (Horizontal and vertical scales are similar).

Plate 3: Unrolled photograph of fractured facies observed in Well EPS1:
Brecciated and microbrecciated facies and oriented cataclasite (called protomylonite) observed between 1644,20 and 1645,06 m. Porphyritic granite-rock texture is completely destroyed.

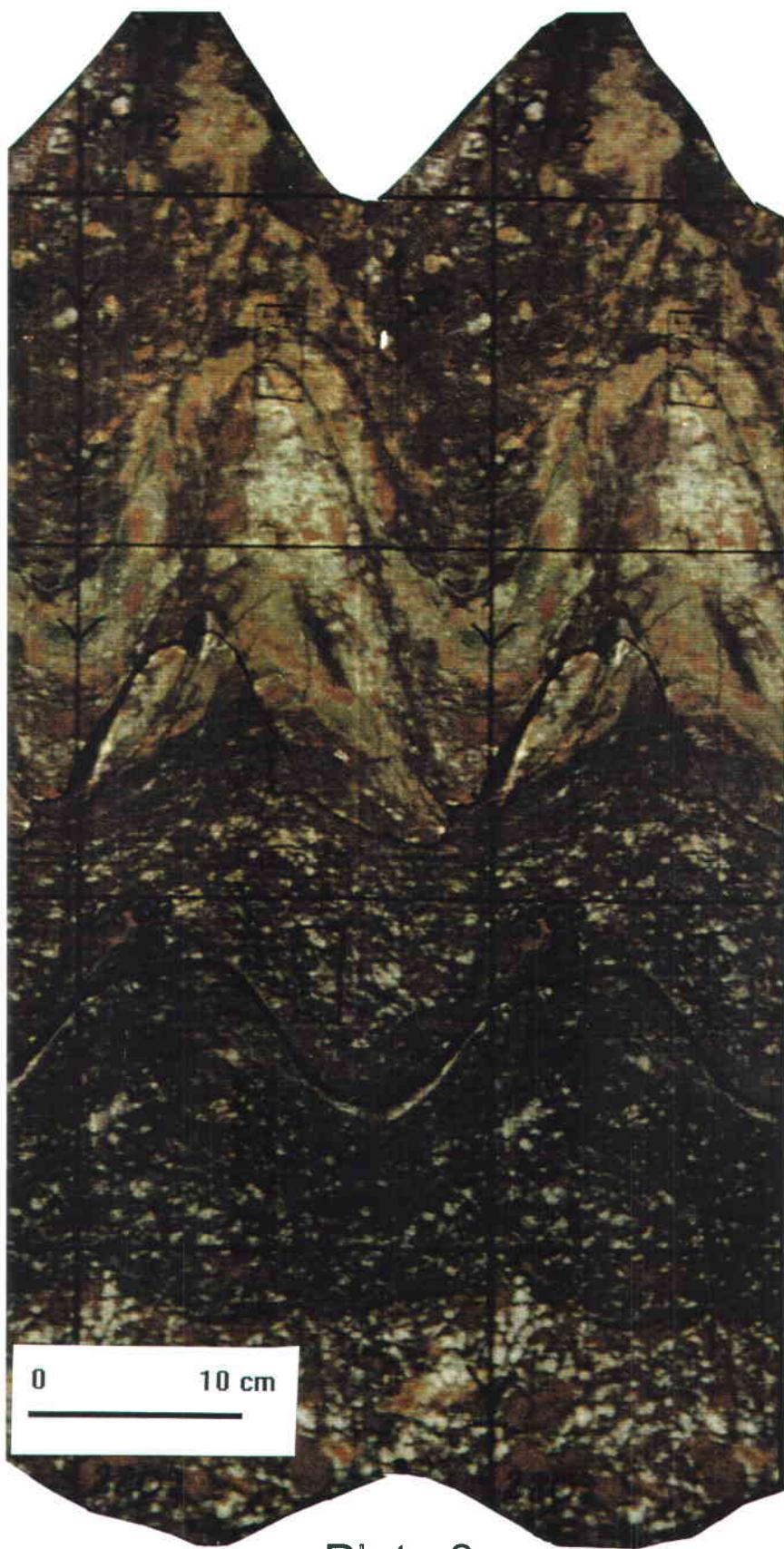


Plate 3

Appendix 1 (continuation)

Photographic plates of macroscopic petrographic facies observed in Well EPS1 (Horizontal and vertical scales are similar).

Plate 4: Macroscopic photographs of fractured and hydrothermally altered facies observed in Well EPS1:

- (1) Thick sealed fracture filled with calcite, hematite, illite and pyrite bordering hydrothermally altered granite at 1903,70 m,
- (2) quartz vein deposition associated with sulphides at 2155,30 m,
- (3) hydrothermally altered facies at 2159,30 m. Plagioclase are transformed into tosudite associated with organic matter and primary quartz are dissolved; and
- (4) wall-rock altered facies intersected by a thick quartz vein at 2173,60 m. Porphyritic-rock texture is conserved and primary quartz is not altered. Plagioclase and biotite are fully transformed into green to yellow colored-clay minerals (illite). K-feldspar megacrysts became orange but they are not cataclased.

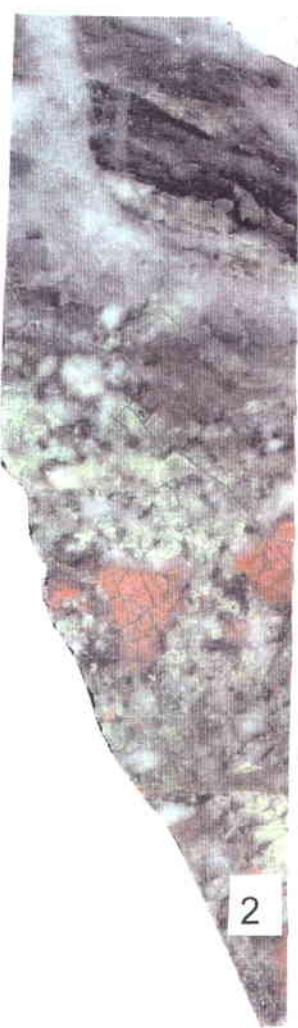


Plate 4

Appendix 2

Appendix 2: Lithological reconstruction of Well EPS1 from well logging data from Artignan (1994).



**SONDAGE GEOTHERMIQUE
EPS1 de SOULTZ SOUS FORET**

**Reconstitution du log lithologique
à partir des données de diagraphies.**

**note DEP/DEX/T2M /93-035
D. ARTIGNAN
Janvier 94**

Ce travail a été réalisé à la demande et sur financement de
l'INSTITUT MIXTE de RECHERCHES GEOTHERMIQUES.

Il avait pour objectifs à partir des mesures de diagraphies géophysiques réalisées sur le sondage carotté profond EPS1 de SOULTZ SOUS FORETS de :

1. proposer une méthodologie de reconstitution du log lithologique, en particulier de détecter les zones fracturées à partir des seules données de diagraphies et ce par la mise en œuvre d'une approche statistique multivariée.
2. sélectionner les types de mesures utiles à la caractérisation des faciès lithologiques et en particulier des faciès des zones fracturées.

Cette note technique présente les résultats et les conclusions de ce travail.

Les méthodes de diagraphie pour des raisons techniques ont varié dans le temps et les variables mesurées ne sont donc pas les mêmes tout au long des 2200m de ce sondage. L'étude proposée a en conséquence été morcelée en tenant compte de ces changements de variables.

I) Première partie du sondage : de la côte 1420 m à la côte 1980 m

1.1. LES DONNEES

Elles sont contenues dans un fichier GDM dont le nom est TOTSUP.BSD.
En voici son contenu:

- ⇒ 11299 enregistrements qui correspondent à des passes de 5cm chacune d'épaisseur repérés dans le fichier par la variable fin de passe : PROF
- ⇒ 58 variables décrites Tab 1-2-3 parmi lesquelles on distingue:
 - ♦ les variables de diagraphies nucléaires : GRAY-URAN-POTA-THOR
 - ♦ les variables de gamma densité : RHOB-DECA
 - ♦ les variables de diagraphies électriques : SP-ILD-ILM-IDPH-IMPH-CIDP-CIMP
 - ♦ les variables de diagraphies soniques : SHEA-PVAL-MODS-VERS
 - ♦ les variables correspondant à des densités estimées de paramètres structuraux : BRIT-JOIN-TENS-FRAC-FAUL-BRI1-MOVE-BLOC-ARTI
 - ♦ les variables correspondant à des degrés estimés de type d'altération : PERV-VEIN-CATA-FMFK
 - ♦ les variables binaires de caractérisation minéralogiques : BIO1 à BIO7, PLA1 à PL12 et MFK1 à MFK9

⇒ la rubrique LITH contenant les 12 codes géologiques décrivant la nature lithologique de chacune des passes. Ces codes et les symboles associés sont listés Tab 4

Dans les tableaux 5 à 13 sont rassemblées les moyennes arithmétiques des variables de diagraphies pour chacun des 12 groupes lithologiques définis par l'observation géologique des carottes de sondages et le nombre d'observations effectuées pour chacun des minéraux considérés pour ces mêmes groupes.

1.2 RESULTATS

Précisons que compte tenu des objectifs de l'étude seules les variables de diagraphies ont été pris en compte dans les calculs statistiques effectués ci dessous. Les autres variables sont prises en compte après calcul pour aider à la caractérisation et à la compréhension des résultats obtenus.

Deux approches ont été réalisées: une étude des corrélations entre variables par ACP et la recherche d'une classification des passes, de la définition de faciès par mise en oeuvre d'une Classification Ascendante hiérarchique (CAH).

1.2.1 Résultats de l'étude des corrélations multivariables (ACP).

Pour étudier les corrélations entre variables il a été mis en oeuvre une Analyse Factorielle en Composantes Principales. Sur le Tab. 14 sont présentés ses résultats en deux sous tableaux : dans la partie supérieure ceux pour les variables de diagraphies seules prises en compte dans le calcul et dans la partie inférieure ceux pour les variables estimées non prises en compte dans le calcul mais seulement projetées.

De cette analyse on peut retenir que l'information obtenue s'organise autour de quatre axes majeurs qui montrent les associations globales des variables suivantes:

- # axe 1 >0 : corrélation des variables SP-POTA-SHEA auxquelles viennent se corréler les variables de données structurales (BRIT-JOIN-TENS-FRAC-FAUL-MOVE-BLOC-VEIN).
- # axe 1 <0 : corrélation des variables RHOB-IDPH-DECA
- # axe 2 >0 : corrélation des variables nucléaires : GRAY-URAN-POTA-THOR
- # axe 3 >0 : corrélation des variables VERS-SHEA
- # axe 4 >0 : montre l'indépendance de la variable IMPH

1.2.2 Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).

L'objectif de ce paragraphe est d'affecter de façon automatique par le programme GDM de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) un code à chaque passe en fonction de

l'information multivariée qu'elle contient et donc en fine de définir des groupes d'échantillons similaires qui correspondent à des faciès lithologiques particuliers.

La cartographie du code de chaque passe le long du sondage permet donc la construction d'un log de sondage.

Cette CAH faite en valeur naturelle a été mise en oeuvre sur les seules variables de diagraphies.

La classification des passes de sondages en 10 groupes a été retenue ; les relations de ces groupes sont visualisées sur le dendrogramme Fig.1. Chacun de ces groupes correspond donc à un faciès aux caractéristiques de diagraphies particulières et différentes d'un groupe à l'autre. Ces caractéristiques sont exprimées dans les Tab 15 à 23 qui rassemblent les moyennes des mesures ou bien le nombre d'observations minéralogiques pour chacun de ces groupes et chacune des 58 variables mesurées .

La lecture de ces paramètres montrent qu'il existe quatre grandes familles de faciès

A) les faciès GRA1-GRA2-GDIF qui se caractérisent par des SP < 0 ,des résistivités fortes (ILD-ILM-IDPH-IMPH), des conductivités faibles (CIDP-CIMP), les densités les plus fortes (RHOB-DECA) et la variable URAN la plus élevée.

B) les faciès ALT1-ALT2-ALT3-ALT4 qui se caractérisent par des SP>0, des résistivités faibles et des conductivités fortes, des densités faibles, des variables soniques fortes, la variable nucléaire POTA élevée.

C) les faciès ENC1-ENC2 ont des caractéristiques intermédiaires entre les deux premières.

D) le faciès DIVE qui a une signature similaire à la signature décrite en B) mais avec en plus de fortes valeurs pour l'ensemble des variables nucléaires.

En examinant les tableaux des variables estimées par l'observation on peut ajouter que ces quatre grandes familles se caractérisent aussi par :

- la famille A) : de faibles valeurs pour les variables structurales et pour les variables d'altération à l'exception de l'altération pervasive qui est élevée (PERV).Les variables minéralogiques se caractérisent par l'abondance des biotites de types BIO1 à BIO3, par l'abondance des plagioclases de types PLA1 à PLA4 et par l'abondance des feldspaths potassiques de type MFK1 à MFK4.

- la famille B) à des caractéristiques opposées avec des données d'altération fortes, une altération pervasive faible, des biotites de types BIO4 à BIO7, des plagioclases de types PLA8 à PL12 et des feldspaths potassiques de types MFK5 à MFK9.

- la famille C) a des caractéristiques ici encore intermédiaires (de mélange ou d'altération peu poussée) entre celles des familles A) et B).

- la famille D) constitue un pole extrême de la famille B)

On retiendra de ces quelques commentaires que la classification effectuée à partir des variables de diagraphies définit des groupes dont les caractéristiques structurales et minéralogiques sont bien distinctes et semblent bien mettre en évidence les grands lithofaciès définis par l'étude géologique des carottes de sondages.

1.3 SYNTHESE DES RESULTATS

Cette synthèse est faite à partir de deux documents :

⇒ Le Tab. 24 représente le croisement des codes lithologiques et des codes issus de la CAH. Chaque case représente le nombre de passes qui ont à la fois les codes indiqués en entête des lignes et colonnes : il y a par exemple 5529 passes codés simultanément GRAN en lithologie et GRA1 par la CAH.

Ce tableau permet d'interpréter les codes de la CAH en termes lithologiques :

- les groupes GRA1, GRA2 sont des faciès de granite GRAN
- le groupe ALT1 correspond principalement aux granites altérés CATA et au faciès VEIN
- le groupe ALT2 correspond principalement aux granites altérés HYDRO et au faciès VEIN
- le groupe ALT3 représente un mélange de granite sains et altérés : GRAN, MFKR et CATA
- le groupe ALT4 correspond lui aussi aux granites altérés HYDRO
- les groupes ENC1 et ENC2 sont des faciès de granite GRAN et de granites hydrothermalisés ou cataclasés HYDRO et CATA
- le groupe DIVE correspond à des granites altérés HYDR et CATA
- le groupe GDIF correspond à des faciès de granite GRAN

⇒ Pour visualiser ces résultats et les mettre en parallèle sur un même log de sondage Fig 2 il a été dessiné sur la première colonne la lithologie résultat de l'observation géologique des carottes, sur la deuxième colonne la visualisation des groupes de chaque passe définis par la CAH et visualisés par des figurés différents, quatre colonnes illustrant les résultats de l'ACP par le dessin linéaire des facteurs scores de chacune des quatre associations de variables mises en évidence.

En conclusion on retiendra de ces deux documents Tab 24 et Fig 2 trois grandes unités :
* de 1420 à 1520 un ensemble de faciès altérés où les faciès GRA1 ET GRA2 sont absents. Les faciès ALT et ENC en constituent l'essentiel.

* de 1520 à 1925 un ensemble de faciès granitique de type GRA1 avec des zones altérées

* de 1925 à 1980 le faciès granitique GRA2

Au sein de ces grandes unités on distingue les zones altérées recherchées cartographiées en jaune que sont les faciès ALT1 et ALT2 ; ces faciès apparaissent géométriquement encadrées par les faciès ALT3, ALT4, ENC1 et ENC2.

4. CONCLUSION

L'analyse factorielle caractérise les corrélations locales entre variables de la diagraphe ; son interprétation n'est pas évidente. Elle apporte sans doute aux géophysiciens une information complémentaire à l'information acquise par CAH, ce pourquoi nous proposons de la conserver sur le dessin du log Fig 2.

Par contre la Classification Ascendante Hiérarchique mise en oeuvre sur les données de diagraphe a conduit à la reconstitution d'un log "lithologique" en distinguant les principaux faciès granitiques et les zones d'altération.

II) Cas particulier de la variable NPHI (porosité neutron) de la côte 1804 m à 1980 m.

Dans la base de la première partie du sondage étudiée en I) entre les cotes 1804 et 1980 la porosité neutron notée NPHI a été mesurée en plus de toutes les autres variables. Nous présentons dans ce paragraphe les corrélations de cette variable avec les autres.

2.1 Corrélations binaires.

	GR AY	UR AN	PO TA	TH OR	RH OB	SP	ID PH	IM PH	DE CA	SH EA	VE RS
N	0.	0.	0.	0.	-	0.	-	-	-	0.	-
P	47	39	40	05	0.	68	0.	0.	0.	23	0.
HI					10		52	12	16		22

Ce tableau des coefficients de corrélations montre que la variable NPHI est corrélée de façon significative à la seule variable SP (potentiel spontané). On peut aussi noter que NPHI varie en opposition avec la variable IDPH.

Le diagramme binaire NPHI-SP dessiné Fig 3 illustre la corrélation positive d'ensemble de ces deux variables.

2.2 Moyennes de NPHI dans les différents groupes .

Les moyennes arithmétiques de NPHI ont été calculées pour chacun des groupes lithologiques et pour chacun des groupes définis par la CAH.

a) groupes lithologiques définis par l'observation des carottes Tab 25 :

Notons que dans la partie du sondage considérée aucune observation des faciès MELA, MBRE, PMYL, MYLO, et VEIN n'a été effectuée.

Pour les autres faciès on remarque que la porosité est la plus élevée dans les faciès HYDR, CATA et BREC ce qui est logique.

On en retient donc que la variable NPHI marque bien les faciès fracturés.

b) groupes définis par la CAH en I) Tab 26 :

Notons que dans la partie du sondage considérée aucune définition des groupes ALT1, ALT2 et ALT3 n'a été effectuée.

En ce qui concerne les autres groupes la porosité la plus forte est observée dans DIVE, ENC1 et ENC2, associée aux valeurs les plus élevées de SP. Ces groupes ont été interprétés comme étant du granite faciès GRAN faiblement altéré.

Les moyennes du groupe ALT4 avec seulement 6 observations sont peu significatives : elles sembleraient caractériser ce groupe (interprété comme correspondant à une forte altération) par une faible porosité et une SP très négative... ce qui est difficilement interprétable et non conforme au reste du sondage.

2.3 Conclusion

Pour illustrer l'information acquise nous avons dessiné sur un même log Fig 4: la lithologie, les groupes de la CAH et les fluctuations des variables NPHI et SP.

Cette figure montre bien d'une part la forte corrélation qui existe entre NPHI et SP, d'autre part que ces deux variables sont d'excellents marqueurs des zones altérées recherchées.

III) Deuxième partie du sondage : de la côte 2010m à la côte 2220m

3.1 LES DONNEES

Elles sont contenues dans un fichier dont le nom est INF.BSD

En voici son contenu

⇒ 4243 enregistrements qui correspondent à des passes de 5cm chacune d'épaisseur repérés dans le fichier par la variable fin de passe : PROF

⇒ 49 variables parmi lesquelles on distingue (cf Tab 1 à 3) :

une variable de diagraphie nucléaire : GRAY

- les variables de gamma densité : RHOB-DECA
- les variables de diographies électriques : SP-ILD-SN
- la vitesses de propagation des on P : DT
- la porosité neutron : NPHI
- les variables correspondant à des densités estimées de paramètres structuraux : BRIT-JOIN-TENS-FRAC-FAUL-BRI1-MOVE-BLOC-ARTI
- les variables correspondant à des degrés estimés de type d'altération : PERV-VEIN-CATA-FMFK
- les variables binaires de caractérisation minéralogiques : BIO1 à BIO7, PLA1 à PL12 et MFK1 à MFK9

⇒ la rubrique LITH contenant les 12 codes géologiques décrivant la nature lithologique de chacune des passes (cf Tab 4).

Dans les tableaux 27 à 33 sont rassemblées les moyennes arithmétiques des variables de diographies pour chacun des 12 groupes lithologiques définis par l'observation géologique des carottes de sondages et le nombre d'observations effectuées pour chacun des minéraux considérés pour ces mêmes groupes.

3.2 RESULTATS

La méthodologie retenue pour l'étude de cette partie du sondage est en tout point identique à celle utilisée pour la partie sommitale du sondage (§2).

Les études statistiques multivariables ont été mises en oeuvre pour les 8 variables de diographies.

3.2.1 Résultats de l'étude des corrélations multivariables

L'analyse factorielle dont les caractéristiques sont rassemblées Tab 34 met en évidence les associations de variables suivantes :

- # l'axe 1 <0 montre l'association des variables SP-NPHI-DT auxquelles viennent se correler les variables de données structurales (BRIT-JOIN-TENS-FRAC-FAUL-MOVE-BLOC-VEIN).
- # l'axe 2 >0 montre l'indépendance de la variable GRAY
- # l'axe 3 >0 montre l'indépendance de la variable SN
- # l'axe 4 >0 montre la corrélation des variables RHOB-ILD-DECA

3.2.2 Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).

Cette CAH faite en valeur naturelle a été mise en oeuvre sur les seules variables de diographies.

Six groupes d'échantillons dont les relations sont visualisées sur le dendrogramme Fig.5

ont été retenus. Chacun de ces groupes correspond donc à un faciès caractérisés par des mesures de diagraphies particulières et différentes d'un groupe à l'autre. Ces caractéristiques sont exprimées dans les Tab 35 à 41 qui rassemblent les moyennes arithmétiques des variables de diagraphies et le nombre d'observation minéralogique pour chacun de ces groupes.

La lecture de ces moyennes montrent qu'il existe trois grandes familles de faciès :

- A) les faciès GRA1 et GRA2 qui se caractérisent par des $SP < 0$, les densités les plus élevées (RHOB-DECA), la porosité neutron la plus faible (NPHI), la résistivité la plus élevée (ILD), les temps de propagation des ondes P les plus faibles (DT).
- B) les faciès ALT1 et ALT2 qui se caractérisent par des $SP > 0$, une porosité neutron forte (NPHI), des résistivités faibles (ILD) et des temps de propagation des ondes P plus élevés.
- C) les faciès ALT3 et ALT4 ont les mêmes caractéristiques que ceux de la famille précédente mais avec des valeurs beaucoup plus contrastées (ou plus faibles ou plus fortes).

En examinant les tableaux des variables estimées par l'observation on peut ajouter que ces trois grandes familles se caractérisent aussi par :

- la famille A) : de faibles valeurs pour les variables structurales et pour les variables d'altérations à l'exception de l'altération pervasive (PERV). Les variables minéralogiques se caractérisent dans ces faciès par l'abondance des biotites de types BIO1 à BIO4, par l'abondance des plagioclases de types PLA1 à PLA4 et par l'abondance des feldspaths potassiques de types MFK1 à MFK6.

-la famille B) : les données structurales et d'altérations les plus élevées , une altération pervasive faible. En ce qui concerne les variables minéralogiques on doit distinguer :

- * le faciès ALT1 avec des biotites, des plagioclases et des feldspaths potassiques de presque tous les types,
 - * le faciès ALT2 avec des biotites de types BIO5 à BIO7, des plagioclases de types PLA5 et PLA9, des feldspaths potassiques de types MFK5 à MFK9.
- la famille C) : mêmes caractéristiques d'ensemble que le faciès ALT2.

3.3 SYNTHESE DES RESULTATS

Le Tab. 42 représente le croisement des codes lithologiques et des codes issus de la CAH. Chaque case représente le nombre de passes qui ont à la fois les codes indiqués en tête des lignes et colonnes : il y a par exemple 2800 passes codées simultanément GRAN en lithologie et GRA1 par la CAH.

Ce tableau permet d'interpréter les codes de la CAH :

- les groupes GRA1, GRA2 sont deux faciès du granite GRAN
- le groupe ALT1 correspond principalement à des granites altérés ou fracturés (HYDR CATA, BREC...). On peut penser qu'il s'agit des faciès faiblement altérés encaissant les zones fortement altérées/fracturées recherchées.
- les groupes ALT2, ALT3 et ALT4 correspondent aux faciès de granites les plus altérés et fracturés avec
 - * l'ensemble des faciès VEIN rassemblés dans le groupe ALT2
 - * le groupe ALT3 qui correspond à des faciès HYDR
 - * le groupe ALT4 qui correspond à des faciès BREC

Par ailleurs sur un même log Fig 6 il a été dessiné sur la première colonne la lithologie résultat de l'observation géologique des carottes, sur la deuxième colonne la visualisation des groupes de chaque passe définis par la CAH et visualisés par des figurés différents. Dans les colonnes suivantes nous avons dessinés les fluctuations des variables de diagraphies.

En conclusion on retiendra de ces deux documents que :

- il y a une bonne concordance entre le log reconstitué par la CAH et le log lithologique en particulier pour la détection des zones fracturées recherchées.
- dans cette partie du sondage il apparaît que les zones fracturées sont bien définies par les variables NPHI-SP et DT .

IV) Conclusion Générale

Les outils statistiques multivariés (ACP et CAH) mis en oeuvre sur les données du sondage de Soultz sous Forêts nous ont permis de définir les corrélations entre les variables de diagraphies et de reconstituer un log lithologique. Considérant ce dernier point la Classification Ascendante Hiérarchique est apparu comme un puissant outil de synthèse adapté à l'objectif recherché : caractériser et cartographier les grandes unités lithologiques correspondant aux différents faciès du granite et à ses faciès résultant des phénomènes d'altération/fracturation.

4.1 Reconstitution d'un log lithologique.

En conclusion pour illustrer l'apport de la CAH nous avons dessiné un log de synthèse Fig 7 en reportant :

- la lithologie définie par l'observation des carottes
- les groupes de la CAH avec

- * les deux principaux faciès granitiques en rouge
- * le granite différentié en bleu clair
- * les granites altérés en vert
- * les zones de forte altération en jaune et noir
- * les zones altérées en contexte radioactif en bleu sombre

- les variables de diagraphies

Ce log montre bien nous semble-t-il que la CAH permet la reconstitution d'un log lithologique en distinguant trois grands types de faciès :

- l'altération de surface du granite
- les différentes zones d'altérations/fracturation intenses avec leur auréoles diffuses
- deux faciès non altéré de granite dont un constitue la base du sondage

4.2 Corrélations des variables

L'étude des corrélations par ACP et de la régionalisation par CAH des différentes variables mesurées en diagraphies a été résumée Fig 8.

Cette figure est une aide au choix des variables de diagraphies pour les futurs sondages. On peut retenir de façon globale que les variables nucléaires et les variables de densité ne semblent pas être très utiles. Les variables majeures seraient à notre point de vue les variables électriques (SP, conductivité et/ou résistivité), les variables soniques (DT, ...) et la porosité neutron.

LISTE DES TABLEAUX

PREMIERE PARTIE DU SONDAGE

Tab. 1	Description des variables
Tab. 2	id
Tab. 3	id
Tab. 4	Codes géologiques et symboles
Tab. 5 à 10	Moyennes arithmétiques par groupe litho
Tab. 11 à 13	Nombre d'observations minéralogiques par groupe litho
Tab. 14	Résultats de l'ACP
Tab. 15 à 20	Moyennes arithmétiques par groupe CAH
Tab. 21 à 23	Nombre d'observations minéralogiques par groupe CAH
Tab. 24	Croisement des codages litho et CAH
Tab. 25	Moyenne arithmétique de NPHI par groupe LITH
Tab. 26	Moyenne arithmétique de NPHI par groupe CAH

DEUXIEME PARTIE DU SONDAGE

Tab. 27 à 30	Moyennes arithmétiques par groupe litho
Tab. 31 à 33	Nombre d'observations minéralogiques par groupe litho
Tab. 34	Résultats de l'ACP
Tab. 35 à 38	Moyennes arithmétiques par groupe CAH
Tab. 39 à 41	Nombre d'observations minéralogiques par groupe CAH
Tab. 42	Croisement des codages litho et CAH

LISTE DES FIGURES

PREMIERE PARTIE DU SONDAGE

Fig. 1	Dendrogramme de la CAH
Fig. 2	log du sondage
Fig. 3	Diagramme binaire NPHI-SP
Fig. 4	Report de NPHI et Sp

DEUXIEME PARTIE DU SONDAGE

Fig. 5	Dendrogramme de la CAH
Fig. 6	log du sondage

SYNTHESE

Fig. 7	log de sondage
Fig. 8	diagramme de synthèse

BASE EPS1DIA**TAB 1**

PROF : profondeur (en m)

LITH	: code lithologique	GRAN	granite pophyroïde standard
		MFKR	" enrichi en K - Feldspath
		CUMU	cumulat de K-Feldspath
		MELA	granite enrichi en biolite
		XENO	xenolite
		HYDR	granite hychothermalisé
		CATA	" cataclasé
		BREC	" fracturé (breccia)
		MBRE	" très fracturé (microbreccia)
		PMYL	protomylonitic zone
		MYLO	zone mylonitique
		VEIN	veine de quartz

Diographies Schlumberger

GRAY	gamma-ray (GAPI)
URAN	uranium (ppm)
POTA	potassium (%)
THOR	thorium (ppm)
DT	temps propagation ondes P (μ s/feet) (delta t)
RHOB	densité (g/cm ³),
DRHO	correction de densité (g/cm ³)
CALI	caliper (in)
NPHI	porosité neutron (%)
SP	potentiel spontané (mv)
ILD	deep induction Standard Processed Resistivity (ohm.m)
SN	short normal (ohm.m)
ILM	medium Induction Standard Processed Resistivity (ohm.m)
IDPH	induction log deep phasor resistivity (ohm.m)
IMPH	induction log medium phasor resistivity (ohm.m)
CIDP	induction deep phasor conductivity (m. mho)
CIMP	induction medium phasor conductivity (m. mho)
DECA	gamma densité mesurée sur carottes (g/cm ³)

Diagraphie VAL

TAB 2

SHEA	vitesse propagation des ondes shear ($\mu\text{s}/\text{f}$)
PVAL	porosité (calculée) (%)
MODS	shear wave modulus (giga.N/m ²)
VERS	vertical summation (calculée) (h3?)

Paramètres Fractures

BRIT	densité de l'ensemble des fractures naturelles (par m.)
JOIN	" des joints
TENS	" des fentes
FRAC	" des fractures
FAUL	" des failles avec mouvement indéterminé
BRI1	" des failles perméables (OPEN + FILO + GEOD)
MOVE	" des failles avec ou sans mouvement
BLOC	" des fractures mineures (TENS+FRAC+CRAC)
ARTI	" des fractures induites

Paramètres petrographiques et minéralogiques

PERV	degré altération pervasive (0 à 7)
VEIN	degré altération filonienne (0 à 7)
CATA	degré de cataclase (0 à 3)
FMFK	degré de fracturation des MFK (0 à 3)

BI01	biotite noire cristalline (0 : absent ; 1: présent)
BI02	" " mate "
BI03	" " rayée "
BI04	" grise métallique "
BI05	" verdâtre chloritisée "
BI06	" rougeâtre hématisée "
BI07	" disparue "

PLA1	plagioclase gris cristallin (0: absent ; 1 : présent)
PLA2	" blanc laiteux
PLA3	" translucide
PLA4	" délavé
PLA5	" brun kaki
PLA6	" vert pistache
PLA7	" vert cuivre
PLA8	" tendre argilisé
PLA9	" rougeâtre - rosâtre

TAB 3

PL10	plagioclase	brun sombre (0 : absent; 1 : présent)
PL11	"	sombre
PL12	"	disparu
MFK1	K-feldspath	gris cristallin (0 : absent : 1 : présent)
MFKZ	"	gris-rose
MFK3	"	rose
MFK4	"	orange cristallin
MFK5	"	orange
MFK6	"	rougeatre
MFK7	"	brun
MFK8	"	spongieux
MFK9	"	disparu

Tab. 4

Codes géologiques et symboles

BRGM

SOULTZ SOUS FORETS EPS1

	GRAN	Standard Porphyroid Granite
	MFKR	K-Felspar-rich Porphyroid Granite
	CUMU	K-Felspar Megacryst Cumulate
	MELA	Biotite-rich Porphyroid Granite
	XENO	Xenolite
	HYDR	Hydrothermalised Granite
	CATA	Cataclased Porphyroid Granite
	BREC	Brecciated Granite
	MBRE	Microbreccia Zone
	PMYL	Protomylonitic Zone
	MYLO	Mylonitic Zone .
	VEIN	Quartz Vein

DIAGRAPHIES NUCLEAIRES

LITH	Titres	Obs.	GRAY	URAN	POTA	THOR
GRAN		8866	323.3	5.8	5.6	40.2
MFKR		255	355.9	4.6	6.9	44.7
CUMU		350	330.8	5.4	6.9	37.4
MELA		65	341.4	6.2	5.6	43.7
XENO		38	354.3	6.2	6.2	44.2
HYDR		529	368.2	6.7	7.2	42.3
CATA		1003	316.7	3.9	6.3	39.8
BREC		125	376.6	5.9	7.6	44.1
MBRE		46	352.9	6.1	6.7	41.9
PMYL		16	321.5	3.0	6.7	41.1
MYLO		0	0.0	0.0	0.0	0.0
VEIN		6	288.0	2.4	6.2	36.3

Tab. 5 Moyennes arithmétiques par groupe litho

GAMMA DENSITIES

LITH	Titres	Obs.	RHOB	DECA
GRAN		8866	2.63	2.63
MFKR		255	2.61	2.59
CUMU		350	2.62	2.58
MELA		65	2.64	2.63
XENO		38	2.63	2.63
HYDR		529	2.61	2.59
CATA		1003	2.61	2.59
BREC		125	2.62	2.60
MBRE		46	2.60	2.66
PMYL		16	2.59	2.61
MYLO		0	0.00	0.00
VEIN		6	2.58	2.60

Tab. 6 Moyennes arithmétiques par groupe litho

DIAGRAPHIES ELECTRIQUES

LITH	Titres	Obs.	SP	ILD	ILM	IDPH	IMPH	CIDP	CIMP
GRAN		8866	-27	1713	130	1711	141	0	12
MFKR		255	-11	1224	176	1209	194	1	14
CUMU		350	-8	1485	165	1495	121	1	14
MELA		65	-22	1941	86	1943	74	0	17
XENO		38	-8	1206	200	1218	136	2	14
HYDR		529	36	476	47	504	48	12	29
CATA		1003	25	394	59	383	54	8	23
BREC		125	29	489	56	538	55	8	22
MBRE		46	30	438	59	505	58	7	21
PMYL		16	46	78	38	82	38	14	28
MYLO		0	0	0	0	0	0	0	0
VEIN		6	31	38	29	37	21	29	52

Tab. 7

Moyennes arithmétiques par groupe litho

DIAGRAPHIES SONIQUES

LITH	Titres	Obs.	SHEA	PVAL	MODS	VERS
GRAN		8866	88	0.03	32	166
MFKR		255	90	0.04	31	65
CUMU		350	90	0.05	30	82
MELA		65	88	0.03	32	190
XENO		38	88	0.03	32	378
HYDR		529	98	0.10	26	926
CATA		1003	93	0.07	28	258
BREC		125	95	0.08	27	155
MBRE		46	93	0.06	29	576
PMYL		16	99	0.11	25	287
MYLO		0	0	0.00	0	0
VEIN		6	99	0.11	25	1630

Tab. 8

Moyennes arithmétiques par groupe litho

DONNEES STRUCTURALES

LITH	Titres	Obs.	BRIT	JOIN	TENS	FRAC	FAUL	BRI1	MOVE	BLOC	ARTI
GRAN		8866	2.4	0.1	1.2	0.5	0.2	0.0	0.3	1.9	1.1
MFKR		255	5.5	0.7	1.8	1.4	1.2	0.0	1.5	3.3	0.9
CUMU		350	5.8	0.1	3.3	0.9	0.5	0.0	0.8	4.8	1.5
MELA		65	0.5	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.2
XENO		38	3.4	0.6	0.2	1.8	0.5	0.0	0.5	2.3	1.0
HYDR		529	10.5	0.5	2.6	3.4	2.7	0.1	3.7	6.1	0.1
CATA		1003	11.8	0.8	1.3	5.0	3.2	0.1	4.5	6.4	0.0
BREC		125	14.0	0.2	3.8	4.5	3.7	0.3	5.2	8.3	0.0
MBRE		46	18.0	0.0	7.2	4.9	3.8	0.0	5.9	12.1	0.0
PMYL		16	20.4	0.0	5.2	6.5	6.1	0.0	8.6	11.7	0.0
MYLO		0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
VEIN		6	15.0	0.3	0.5	8.2	4.7	1.2	4.8	8.6	0.0

Tab. 9 Moyennes arithmétiques par groupe litho

DONNEES D'ALTERATION

LITH	Titres	Obs.	PERV	VEIN	CATA	FMFK
GRAN		8866	2.8	0.2	0.2	0.2
MFKR		255	3.6	0.3	0.3	0.3
CUMU		350	3.2	0.6	0.4	0.6
MELA		65	3.1	0.0	0.0	0.0
XENO		38	0.5	0.4	0.4	0.4
HYDR		529	0.0	1.2	1.2	1.2
CATA		1003	0.1	2.4	2.5	2.4
BREC		125	0.0	3.0	2.7	3.0
MBRE		46	0.0	2.7	2.9	2.7
PMYL		16	0.0	2.9	2.9	2.9
MYLO		0	0.0	0.0	0.0	0.0
VEIN		6	0.0	1.5	3.0	1.5

Tab. 10

Moyennes arithmétiques par groupe litho

NATURE DES MICAS

LITH	Titres	Obs.	BIO1	BIO2	BIO3	BIO4	BIO5	BIO6	BIO7
GRAN		8866	6499	6957	2015	240	2247	294	279
MFKR		255	120	193	133	0	130	59	0
CUMU		350	47	279	187	35	202	9	28
MELA		65	55	62	11	0	5	0	0
XENO		38	6	7	2	2	0	3	2
HYDR		529	2	82	90	23	146	159	399
CATA		1003	1	3	42	28	277	661	858
BREC		125	0	0	1	0	16	2	123
MBRE		46	0	0	0	0	9	0	46
PMYL		16	0	0	0	0	1	0	16
MYLO		0	0	0	0	0	0	0	0
VEIN		6	0	0	0	0	0	0	3

Tab. 11 Nombre d'observations minéralogiques par groupe litho

Tab. 12 Nombre d'observations minéralogiques par groupe litho

NATURE DES PLAGIOCLASES

LITH	Titres	Obs.	PLA1	PLA2	PLA3	PLA4	PLA5	PLA6	PLA7	PLA8	PLA9	PL10	PL11	PL12
GRAN	8866	508	3880	660	3813	107	1218	260	644	655	676	1155	40	
MFKR	255	37	56	59	197	0	0	0	0	1	0	104	0	
CUMU	350	8	39	8	206	0	24	0	65	57	7	74	18	
MELA	65	0	49	3	21	0	0	0	0	0	0	0	0	
XENO	38	0	3	0	3	0	2	0	0	5	2	5	0	
HYDR	529	0	0	0	3	4	2	61	100	456	29	153	154	
CATA	1003	0	0	45	149	1	33	92	623	180	634	6		
BREC	125	0	0	0	0	43	7	0	0	89	8	49	5	
MBRE	46	0	0	0	0	19	0	0	9	31	4	1	2	
PMYL	16	0	0	0	0	15	0	0	0	1	0	0	0	
MYLO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
VEIN	6	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	

NATURE DES FELDSPATHS POTASSIQUES

LITH	Titres	Obs.	MFK1	MFK2	MFK3	MFK4	MFK5	MFK6	MFK7	MFK8	MFK9
GRAN		8866	180	3574	3488	1409	1244	480	211	12	0
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
MFKR		255	0	56	60	143	56	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
CUMU		350	7	46	123	157	67	14	11	0	0
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
MELA		65	0	47	3	0	5	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
XENO		38	0	5	1	4	1	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
HYDR		529	0	0	45	90	289	205	116	65	1
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
CATA		1003	0	0	10	39	713	628	186	0	12
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
BREC		125	0	0	7	0	52	25	28	7	39
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
MBRE		46	0	0	0	0	33	9	3	1	10
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
PMYL		16	0	0	0	0	2	3	4	0	11
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
MYLO		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
VEIN		6	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Tab. 13

Nombre d'observations minéralogiques par groupe litho

RESULTATS APRES ROTATION DES FACTEURS

	m	*	1 *	2 *	3 *	4 *
*Valeur propre			2.864 *	2.380 *	1.205 *	1.054 *
* Pourcentage			26.0 *	21.6 *	11.0 *	9.6 *
*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
*	f(GRAY)	*	0.172 *	0.983 *	0.011 *	0.031 *
*	f(URAN)	*	-0.353 *	0.684 *	-0.119 *	0.104 *
*	f(POTA)	*	0.590 *	0.608 *	0.138 *	0.079 *
*	f(THOR)	*	0.191 *	0.723 *	0.025 *	-0.135 *
*	f(RHOB)	*	-0.496 *	0.038 *	0.188 *	0.236 *
*	f(SP)	*	0.817 *	0.077 *	0.153 *	0.206 *
*	f(IDPH)	*	-0.786 *	-0.042 *	-0.286 *	-0.140 *
*	f(IMPH)	*	-0.112 *	0.027 *	0.053 *	-0.921 *
*	f(DECA)	*	-0.618 *	-0.082 *	0.167 *	0.037 *
*	f(SHEA)	*	0.633 *	0.188 *	0.445 *	0.209 *
*	f(VERS)	*	0.019 *	-0.049 *	0.895 *	-0.071 *
*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
*	f(BRIT)	*	0.587 *	0.002 *	0.204 *	0.121 *
*	f(JOIN)	*	0.311 *	-0.055 *	0.085 *	-0.024 *
*	f(TENS)	*	0.228 *	0.012 *	0.017 *	0.062 *
*	f(FRAC)	*	0.538 *	-0.096 *	0.255 *	0.060 *
*	f(FAUL)	*	0.467 *	0.138 *	0.173 *	0.140 *
*	f(MOVE)	*	0.483 *	0.133 *	0.172 *	0.157 *
*	f(BLOC)	*	0.496 *	-0.061 *	0.174 *	0.084 *
*	f(PERV)	*	-0.276 *	-0.091 *	-0.201 *	-0.030 *
*	f(VEIN)	*	0.596 *	-0.051 *	0.203 *	0.164 *
*	f(CATA)	*	0.614 *	-0.058 *	0.216 *	0.151 *
*	f(FMFK)	*	0.596 *	-0.051 *	0.203 *	0.164 *
*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****

Tab. 14

Résultats de l'ACP

Analyse factorielle en composantes principales
(Traitement sur valeurs naturelles)

DIAGRAPHIES NUCLEAIRES

CD04	Titres	Obs.	GRAY	URAN	POTA	THOR
GRA1		5830	324.3	6.0	5.5	40.3
GRA2		1108	307.9	5.4	5.3	38.6
DIVE		94	563.2	19.8	10.0	49.4
ALT1		786	310.1	2.8	6.2	40.7
ALT2		321	338.9	4.2	7.3	40.1
ALT3		550	380.3	5.2	7.4	47.4
ALT4		44	326.3	3.9	6.5	40.9
ENC1		1353	317.3	5.2	5.8	39.2
ENC2		899	332.3	5.5	6.7	38.4
Gdif		333	325.5	6.0	5.5	41.0

Tab. 15 Moyennes arithmétiques par groupe CAH

GAMMA - DENSITES

CD04	Titres	Obs.	RHOB	DECA
GRA1		5830	2.63	2.63
GRA2		1108	2.64	2.66
DIVE		94	2.62	2.56
ALT1		786	2.61	2.58
ALT2		321	2.60	2.60
ALT3		550	2.62	2.58
ALT4		44	2.61	2.57
ENC1		1353	2.62	2.62
ENC2		899	2.61	2.60
Gdif		333	2.63	2.63

Tab. 16 Moyennes arithmétiques par groupe CAH

DIAGRAPHIES ELECTRIQUES

CD04	Titres	Obs.	SP	ILD	ILM	IDPH	IMPH	CIDP	CIMP
GRA1		5830	-30	1939	101	1935	92	-1	13
GRA2		1108	-76	1895	152	1892	156	-2	8
DIVE		94	40	270	45	205	50	12	28
ALT1		786	30	250	59	264	51	8	23
ALT2		321	45	71	30	74	30	20	38
ALT3		550	22	426	59	462	59	6	20
ALT4		44	20	366	48	466	49	13	31
ENC1		1353	11	662	77	633	76	2	15
ENC2		899	0	1757	111	1786	104	0	13
GDIF		333	-37	1738	919	1757	1353	-1	0

Tab. 17 Moyennes arithmétiques par groupe CAH

DIAGRAPHIES SONIQUES

CD04	Titres	Obs.	SHEA	PVAL	MODS	VERS
GRA1		5830	87	0.02	32	90
GRA2		1108	87	0.02	33	505
DIVE		94	102	0.12	24	57
ALT1		786	94	0.08	27	185
ALT2		321	103	0.12	23	1131
ALT3		550	93	0.07	28	196
ALT4		44	98	0.10	26	7215
ENC1		1353	89	0.04	31	133
ENC2		899	90	0.05	30	103
GDIF		333	87	0.02	32	197

Tab. 18 Moyennes arithmétiques par groupe CAH

DONNEES STRUCTURALES

CD04	Titres	Obs.	BRIT	JOIN	TENS	FRAC	FAUL	BRI1	MOVE	BLOC	ARTI
GRA1		5830	1.6	0.1	0.8	0.2	0.1	0.0	0.1	1.3	1.0
GRA2		1108	0.6	0.0	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.5	1.5
DIVE		94	12.9	0.1	4.1	0.8	5.5	0.3	7.5	4.9	0.2
ALT1		786	10.3	1.0	1.4	4.2	2.4	0.1	3.3	6.0	0.2
ALT2		321	13.1	0.5	2.7	5.3	3.0	0.1	4.4	8.2	0.1
ALT3		550	9.0	0.8	1.7	3.9	2.2	0.0	2.6	5.6	0.4
ALT4		44	11.1	0.5	1.2	7.6	1.3	0.0	1.6	8.9	0.3
ENC1		1353	7.3	0.3	2.6	2.3	1.4	0.0	2.0	5.1	0.9
ENC2		899	5.7	0.2	3.5	0.5	0.6	0.0	1.1	4.3	1.5
GDIF		333	2.9	0.3	1.5	0.6	0.2	0.0	0.3	2.4	1.0

Tab. 19 **Moyennes arithmétiques par groupe CAH**

DONNEES D' ALTERATION

CD04	Titres	Obs.	PERV	VEIN	CATA	FMFK
GRA1		5830	2.9	0.1	0.1	0.1
GRA2		1108	2.1	0.0	0.0	0.0
DIVE		94	0.1	1.7	1.9	1.7
ALT1		786	0.9	2.0	2.0	2.0
ALT2		321	0.2	1.6	1.7	1.6
ALT3		550	1.8	1.3	1.2	1.3
ALT4		44	1.1	1.0	1.4	1.0
ENC1		1353	2.1	1.0	1.1	1.0
ENC2		899	3.0	0.4	0.4	0.4
GDIF		333	2.3	0.1	0.1	0.1

Tab. 20 **Moyennes arithmétiques par groupe CAH**

NATURE DES MICAS

CD04	Titres	Obs.	BIO1	BIO2	BIO3	BIO4	BIO5	BIO6	BIO7
GRA1		5830	4736	4785	968	97	1185	24	102
GRA2		1108	1067	1067	3	0	35	16	24
DIVE		94	0	3	10	5	35	14	73
ALT1		786	13	83	147	18	258	522	490
ALT2		321	22	32	32	0	24	95	275
ALT3		550	76	211	178	15	211	188	159
ALT4		44	9	24	18	0	18	20	12
ENC1		1353	276	477	602	116	708	276	505
ENC2		899	270	674	422	69	529	32	104
GDIF		333	269	235	109	8	38	0	10

Tab. 21

Nombre d'observations minéralogiques par groupe CAH

NATURE DES PLAGIOCALSES

CDO4	Titres	Obs.	PLA1	PLA2	PLA3	PLA4	PLA5	PLA6	PLA7	PLA8	PLA9	PL10	PL11	PL12
GRA1	5830	514	2733	555	2651	101	487	119	417	338	390	501	501	0
GRA2	1108	0	1038	0	50	0	18	4	0	19	19	4	4	0
DIVE	94	0	0	0	3	0	10	0	29	91	5	21	0	
ALT1	786	0	0	54	38	98	87	9	102	440	138	450	56	
ALT2	321	0	0	0	22	22	0	0	22	235	23	69	104	
ALT3	550	0	0	13	201	9	88	36	34	269	9	321	38	
ALT4	44	0	6	0	6	0	3	0	12	32	3	2	12	
ENC1	1353	26	38	42	566	89	317	127	189	312	289	612	612	0
ENC2	899	4	48	66	583	21	236	59	105	178	30	182	15	
GDIF	333	9	171	0	177	0	8	0	0	4	0	13	0	

Tab. 22 Nombre d'observations minéralogiques par groupe CAH

NATURE DES FELDSPATHS POTASSIQUES

CD04	Titres	Obs.	MFK1	MFK2	MFK3	MFK4	MFK5	MFK6	MFK7	MFK8	MFK9
GRA1		5830	185	3230	2176	726	649	287	93	12	0
GRA2		1108	0	59	1003	9	41	8	6	0	0
DIVE		94	0	0	42	3	21	21	0	42	7
ALT1		786	2	0	17	131	569	392	36	0	27
ALT2		321	0	0	12	56	193	99	99	30	17
ALT3		550	0	0	52	332	156	83	21	1	1
ALT4		44	0	0	6	14	24	12	15	0	0
ENC1		1353	0	139	68	333	484	363	239	0	24
ENC2		899	0	118	260	198	304	91	50	0	0
Gdif		333	0	189	102	41	29	8	0	0	0

Tab. 23 Nombre d'observations minéralogiques par groupe CAH

CROISEMENT CODES CAH ET LITH

	GRA1	GRA2	DIVE	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ENC1	ENC2	Gdif
GRAN	5529	1087	8	203	41	169	17	932	569	311
MFKR	84	0	0	0	0	109	0	3	39	20
CUMU	91	0	0	8	18	26	0	17	190	0
MELA	60	0	0	0	0	0	0	0	5	0
XENO	14	4	0	2	0	11	0	4	2	1
HYDR	16	10	56	58	160	81	27	75	46	0
CATA	25	4	14	467	69	119	0	274	30	1
BREC	0	0	16	32	14	22	0	31	10	0
MBRE	0	3	0	7	8	13	0	15	0	0
PMYL	0	0	0	6	8	0	0	2	0	0
MYLO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VEIN	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0

Tab. 24 Croisement des codages litho et CAH

LITH	Titres	Obs.	NPHI	SP
GRAN		3356	3.30	-45.49
MFKR		38	3.76	-6.98
CUMU		23	3.62	-34.62
MELA		0	0.00	0.00
XENO		5	3.40	-45.19
HYDR		42	5.42	6.62
CATA		85	5.10	-1.85
BREC		6	5.98	13.36
MBRE		0	0.00	0.00
PMYL		0	0.00	0.00
MYLO		0	0.00	0.00
VEIN		0	0.00	0.00

Tab. 25 Moyenne arithmétique de NPHI par groupe LITH

CD04	Titres	Obs.	NPHI	SP
GRA1		2180	3.50	-29.05
GRA2		1011	2.82	-82.08
DIVE		21	5.59	-0.02
ALT1		0	0.00	0.00
ALT2		0	0.00	0.00
ALT3		0	0.00	0.00
ALT4		6	2.60	-77.55
ENC1		176	4.61	-6.20
ENC2		36	4.73	-5.26
GDIF		119	3.34	-43.81

Tab. 26 Moyenne arithmétique de NPHI par groupe CAH

LITH	Titres	Obs.	GRAY	RHOB	DECA	NPHI
GRAN		3565	303.37	2.62	2.66	2.79
MFKR		32	302.81	2.58	2.60	2.74
CUMU		25	291.40	2.58	2.64	3.56
MELA		42	301.39	2.60	2.63	2.64
XENO		12	283.04	2.61	2.70	2.66
HYDR		306	305.61	2.59	2.59	7.09
CATA		107	294.87	2.60	2.64	4.51
BREC		53	268.78	2.58	2.62	7.94
MBRE		48	256.36	2.58	2.61	5.22
PMYL		14	285.05	2.64	2.64	6.03
MYLO		15	262.15	2.57	2.61	9.76
VEIN		21	202.66	2.59	2.60	5.06

Tab. 27 Moyennes arithmétiques par groupe litho

LITH	Titres	Obs.	SP	ILD	SN	DT
GRAN		3565	-12.3	1996	30.2	54.1
MFKR		32	24.0	2000	25.2	63.6
CUMU		25	19.4	2000	25.6	55.7
MELA		42	9.3	2000	38.2	57.4
XENO		12	-3.7	2000	29.7	54.9
HYDR		306	26.6	1804	17.4	60.3
CATA		107	-8.0	2000	18.6	56.0
BREC		53	35.9	1577	13.3	69.4
MBRE		48	15.6	2000	22.0	60.9
PMYL		14	8.6	2000	25.7	58.1
MYLO		15	9.6	2000	22.3	64.6
VEIN		21	23.9	1994	18.8	62.1

Tab. 28 Moyennes arithmétiques par groupe litho

LITH	Titres	Obs.	PERV	VEIN	CATA	FMFK
GRAN		3565	2.4	0.1	0.1	0.1
MFKR		32	2.5	0.0	0.0	0.0
CUMU		25	2.0	0.6	0.6	0.6
MELA		42	1.3	0.0	0.0	0.0
XENO		12	2.5	0.0	0.0	0.0
HYDR		306	0.0	0.8	1.0	0.8
CATA		107	0.4	2.4	2.5	2.4
BREC		53	0.0	3.0	3.0	3.0
MBRE		48	0.0	3.0	3.0	3.0
PMYL		14	0.0	2.8	2.8	2.8
MYLO		15	0.0	3.0	3.0	3.0
VEIN		21	0.0	1.6	1.6	1.6

Tab. 29

Moyennes arithmétiques par groupe litho

Tab. 30 Moyennes arithmétiques par groupe litho

LITH	Titres	Obs.	BRIT	JOIN	TENS	FRAC	FAUL	BRI1	MOVE	BLOC	ARTI
GRAN	3565	2.20	0.01	1.62	0.05	0.30	0.01	0.41	1.77	0.58	
MFKR	32	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.50	
CUMU	25	7.68	0.00	1.44	1.08	2.76	0.00	4.08	3.60	0.64	
MELA	42	1.40	0.00	0.48	0.00	0.00	0.00	0.48	0.93	0.00	
XENO	12	0.25	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	
HYDR	306	11.66	0.00	5.19	1.67	3.74	0.41	4.22	7.04	0.40	
CATA	107	9.11	0.00	4.40	1.86	2.21	0.11	2.74	6.26	0.23	
BREC	53	12.38	0.00	2.34	2.41	4.75	1.06	6.56	4.75	0.00	
MBRE	48	16.02	0.00	1.52	5.40	8.35	0.00	9.10	6.91	0.15	
PMYL	14	15.43	0.00	1.57	0.86	13.00	0.00	13.00	2.43	0.00	
MYLO	15	14.60	0.00	0.40	7.40	5.20	1.20	5.60	7.79	0.00	
VEIN	21	17.52	0.00	1.95	6.76	6.52	1.76	7.05	8.71	0.14	

LITH	Titres	Obs.	BIO1	BIO2	BIO3	BIO4	BIO5	BIO6	BIO7
GRAN		3565	1990	3315	1310	1459	632	0	43
MFKR		32	16	32	16	0	16	0	0
CUMU		25	10	10	10	15	15	0	0
MELA		42	42	12	0	0	0	0	0
XENO		12	0	1	1	0	1	0	0
HYDR		306	0	33	38	165	290	0	234
CATA		107	1	45	14	33	82	0	61
BREC		53	0	0	0	0	29	0	52
MBRE		48	0	0	0	0	8	0	48
PMYL		14	0	1	0	0	1	0	13
MYLO		15	0	0	0	0	0	0	15
VEIN		21	0	0	0	0	0	0	3

Tab. 31 **Nombre d'observations minéralogiques par groupe litho**

Tab. 32 Nombre d'observations minéralogiques par groupe litho

LITH	Titres	Obs.	PLA1	PLA2	PLA3	PLA4	PLA5	PLA6	PLA7	PLA8	PLA9	PL10	PL11	PL12
GRAN	3565	487	2637	150	1441	16	216	0	386	49	0	89	0	
MFKR	32	16	16	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0	
CUMU	25	0	0	0	25	0	10	0	15	0	0	15	0	
MELA	42	0	42	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	
XENO	12	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
HYDR	306	0	0	0	59	36	9	0	97	300	0	0	0	
CATA	107	0	0	1	45	25	0	0	45	62	0	12	32	
BREC	53	0	0	0	0	44	0	0	0	52	0	0	0	
MBRE	48	0	0	0	0	48	0	0	0	15	0	0	0	
PMYL	14	0	0	0	0	13	0	0	0	1	0	0	0	
MYLO	15	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	
VEIN	21	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	

Tab. 33 Nombre d'observations minéralogiques par groupe litho

LITH	Titres	Obs.	PLA1	PLA2	PLA3	PLA4	PLA5	PLA6	PLA7	PLA8	PLA9	PL10	PL11	PL12
GRAN	3565	487	2637	150	1441	16	216	0	386	49	0	89	0	
MFKR	32	16	16	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0	
CUMU	25	0	0	0	25	0	10	0	15	0	0	0	15	0
MELA	42	0	42	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	
XENO	12	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
HYDR	306	0	0	59	36	9	0	97	300	0	0	0	0	
CATA	107	0	0	1	45	25	0	0	45	62	0	12	32	
BREC	53	0	0	0	0	44	0	0	0	52	0	0	0	
MBRE	48	0	0	0	0	48	0	0	0	15	0	0	0	
PMYL	14	0	0	0	0	13	0	0	0	1	0	0	0	
MYLO	15	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	
VEIN	21	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	

RESULTATS APRES ROTATION DES FACTEURS

	m	1	2	3	4
* Valeur propre	*	1.895	1.134	1.428	1.697
* Pourcentage	*	23.7	14.2	17.9	21.2
*****	*****	*****	*****	*****	*****
* f(GRAY)	*	0.006	0.977	0.045	0.029
* f(DT)	*	-0.599	-0.359	-0.392	-0.401
* f(RHOB)	*	0.357	0.164	0.140	0.551
* f(SP)	*	-0.901	0.034	0.143	-0.027
* f(SN)	*	-0.027	0.079	0.914	0.017
* f(ILD)	*	0.408	-0.124	0.443	0.504
* f(DECA)	*	0.008	-0.005	-0.027	0.900
* f(NPHI)	*	-0.656	-0.003	-0.447	-0.408
*****	*****	*****	*****	*****	*****
* f(BRIT)	*	-0.479	-0.224	-0.261	-0.068
* f(JOIN)	*	-0.028	-0.009	0.054	0.011
* f(TENS)	*	-0.332	0.100	-0.207	-0.042
* f(FRAC)	*	-0.218	-0.417	-0.170	-0.054
* f(FAUL)	*	-0.362	-0.297	-0.155	-0.022
* f(MOVE)	*	-0.381	-0.291	-0.163	-0.034
* f(BLOC)	*	-0.386	-0.068	-0.237	-0.059
* f(PERV)	*	0.242	0.110	0.279	0.153
* f(VEIN)	*	-0.423	-0.347	-0.230	-0.046
* f(CATA)	*	-0.402	-0.325	-0.258	-0.034
* f(FMFK)	*	-0.423	-0.347	-0.230	-0.046
*****	*****	*****	*****	*****	*****

Tab. 34 Résultats de l'ACP
 Analyse factorielle en composantes principales
 (Traitement sur valeurs naturelles)

CD03	Titres	Obs.	GRAY	RHOB	DECA	NPHI
GRA1		2914	303.57	2.62	2.66	2.82
GRA2		514	298.46	2.62	2.65	2.44
ALT1		703	300.49	2.60	2.61	4.76
ALT2		62	236.26	2.57	2.58	8.22
ALT3		32	353.78	2.52	2.46	13.73
ALT4		15	208.03	2.46	2.56	11.34

Tab. 35 Moyennes arithmétiques par groupe CAH

CD03	Titres	Obs.	SP	ILD	SN	DT
GRA1		2914	-8.1	2000	34.0	54.1
GRA2		514	-54.3	2000	11.9	53.8
ALT1		703	23.7	1987	20.6	57.4
ALT2		62	22.3	1904	17.5	70.4
ALT3		32	36.2	272	10.9	65.9
ALT4		15	41.9	203	6.1	97.7

Tab. 36 Moyennes arithmétiques par groupe CAH

CD03	Titres	Obs.	PERV	VEIN	CATA	FMFK
GRA1		2914	2.4	0.1	0.1	0.1
GRA2		514	1.9	0.1	0.1	0.1
ALT1		703	0.8	1.0	1.1	1.0
ALT2		62	0.0	1.8	1.8	1.8
ALT3		32	0.0	0.5	0.5	0.5
ALT4		15	0.0	2.2	2.2	2.2

Tab. 37 Moyennes arithmétiques par groupe CAH

CD03	Titres	Obs.	BRIT	JOIN	TENS	FRAC	FAUL	BRI1	MOVE	BLOC	ARTI
GRA1		2914	2.14	0.01	1.44	0.06	0.40	0.01	0.52	1.60	0.46
GRA2		514	1.31	0.00	0.86	0.34	0.04	0.00	0.12	1.19	1.02
ALT1		703	9.17	0.00	4.29	1.16	2.79	0.15	3.30	5.71	0.58
ALT2		62	16.31	0.00	2.00	6.55	5.52	1.76	6.00	8.55	0.00
ALT3		32	11.50	0.00	10.50	0.00	0.50	0.00	1.00	10.50	0.00
ALT4		15	10.00	0.00	2.67	0.33	4.00	2.33	4.66	2.99	0.00

Tab. 38 Moyennes arithmétiques par groupe CAH

CD03	Titres	Obs.	BIO1	BIO2	BIO3	BIO4	BIO5	BIO6	BIO7
GRA1		2914	1472	2708	1152	1121	474	0	83
GRA2		514	471	514	11	187	45	0	0
ALT1		703	116	222	220	353	495	0	303
ALT2		62	0	0	0	0	24	0	47
ALT3		32	0	5	6	11	32	0	21
ALT4		15	0	0	0	0	4	0	15

Tab. 39 Nombre d'observations minéralogiques par groupe CAH

CD03	Titres	Obs.	PLA1	PLA2	PLA3	PLA4	PLA5	PLA6	PLA7	PLA8	PLA9	PL10	PL11	PL12
GRA1		2914	133	2125	140	979	34	203	0	367	66	0	103	0
GRA2		514	314	462	11	348	0	0	0	32	0	0	0	32
ALT1		703	57	108	0	283	119	32	0	133	339	0	13	0
ALT2		62	0	0	0	0	24	0	0	0	28	0	0	0
ALT3		32	0	0	0	5	11	0	0	11	32	0	0	0
ALT4		15	0	0	0	0	11	0	0	0	15	0	0	0

Tab. 40 Nombre d'observations minéralogiques par groupe CAH

CD03	Titres	Obs.	MFK1	MFK2	MFK3	MFK4	MFK5	MFK6	MFK7	MFK8	MFK9
GRA1		2914	376	2153	675	293	293	287	0	24	0
GRA2		514	0	471	366	11	32	32	0	0	0
ALT1		703	0	117	116	72	371	129	0	76	64
ALT2		62	0	0	0	0	16	25	0	8	18
ALT3		32	0	0	11	5	27	0	0	0	0
ALT4		15	0	0	0	0	15	0	0	0	11

Tab. 41 Nombre d'observations minéralogiques par groupe CAH

	GRA1	GRA2	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	
GRAN	2800	482		278	0	5	0
MFKR	0	0		32	0	0	0
CUMU	14	0		11	0	0	0
MELA	32	0		10	0	0	0
XENO	6	0		6	0	0	0
HYDR	30	0		220	25	27	4
CATA	32	32		43	0	0	0
BREC	0	0		37	5	0	11
MBRE	0	0		36	12	0	0
PMYL	0	0		14	0	0	0
MYLO	0	0		10	5	0	0
VEIN	0	0		6	15	0	0

Tab. 42 Croisement des codages litho et CAH

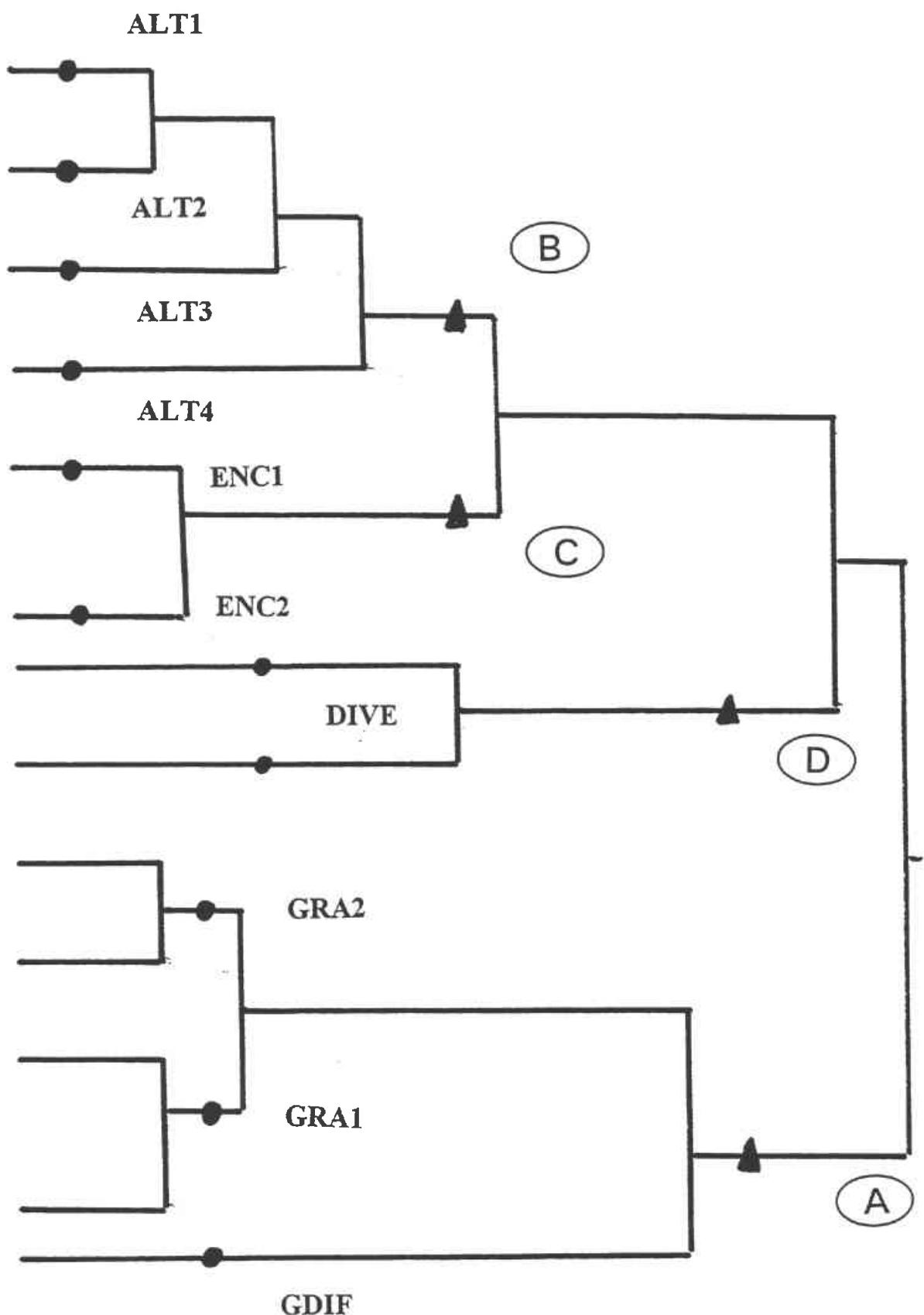
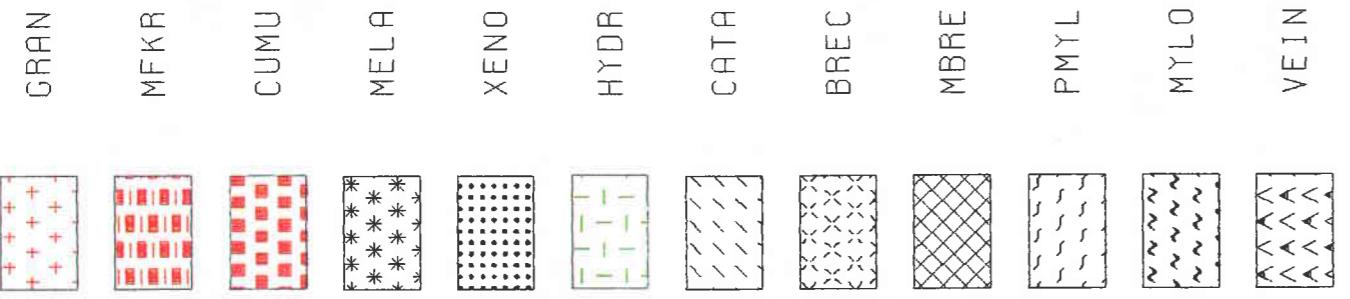


Fig. 1 Dendrogramme de la CAH

CODE LITH



CODE CAH

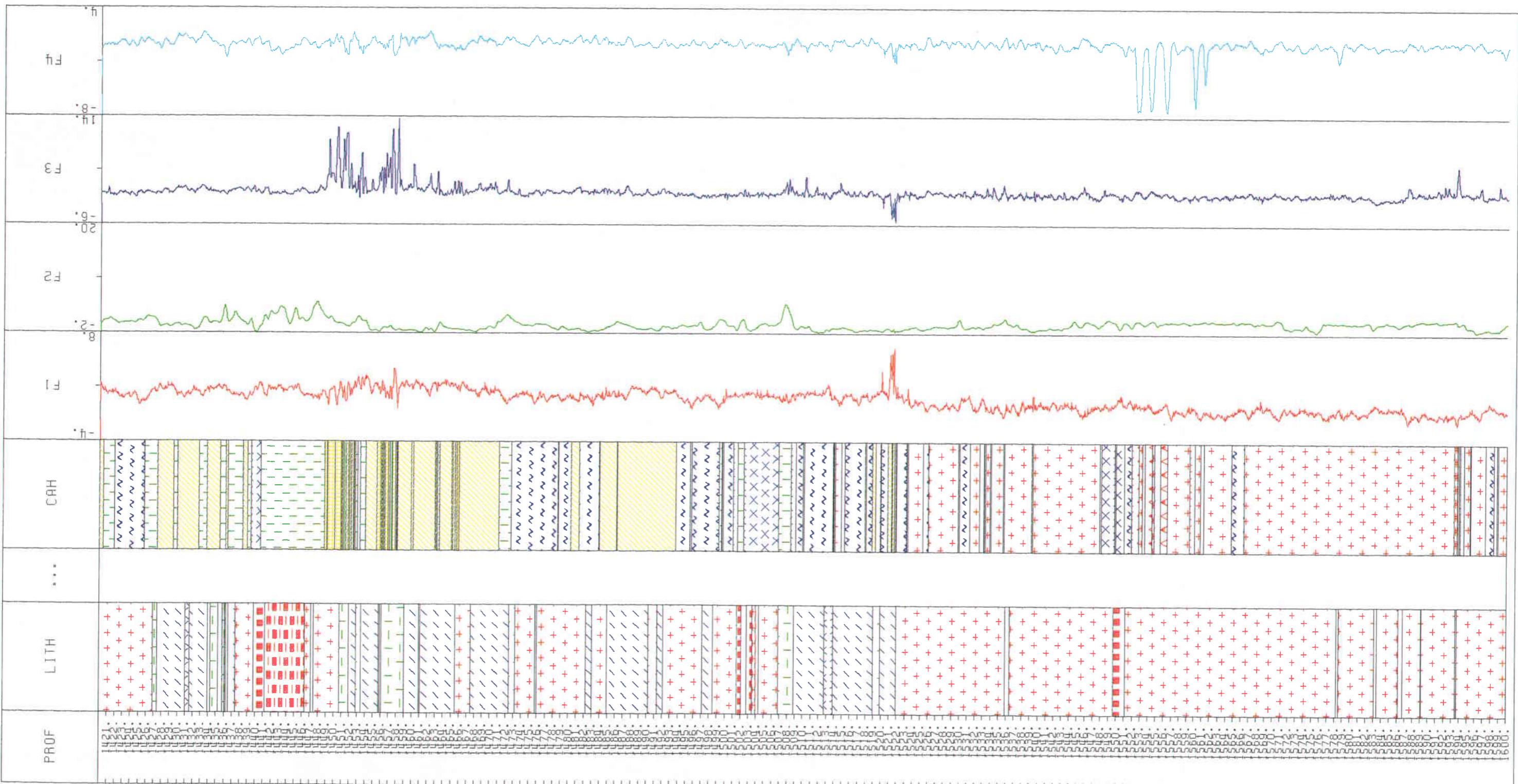
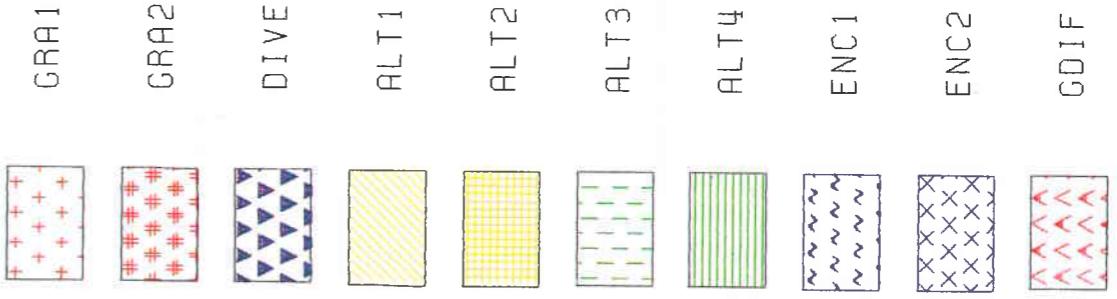
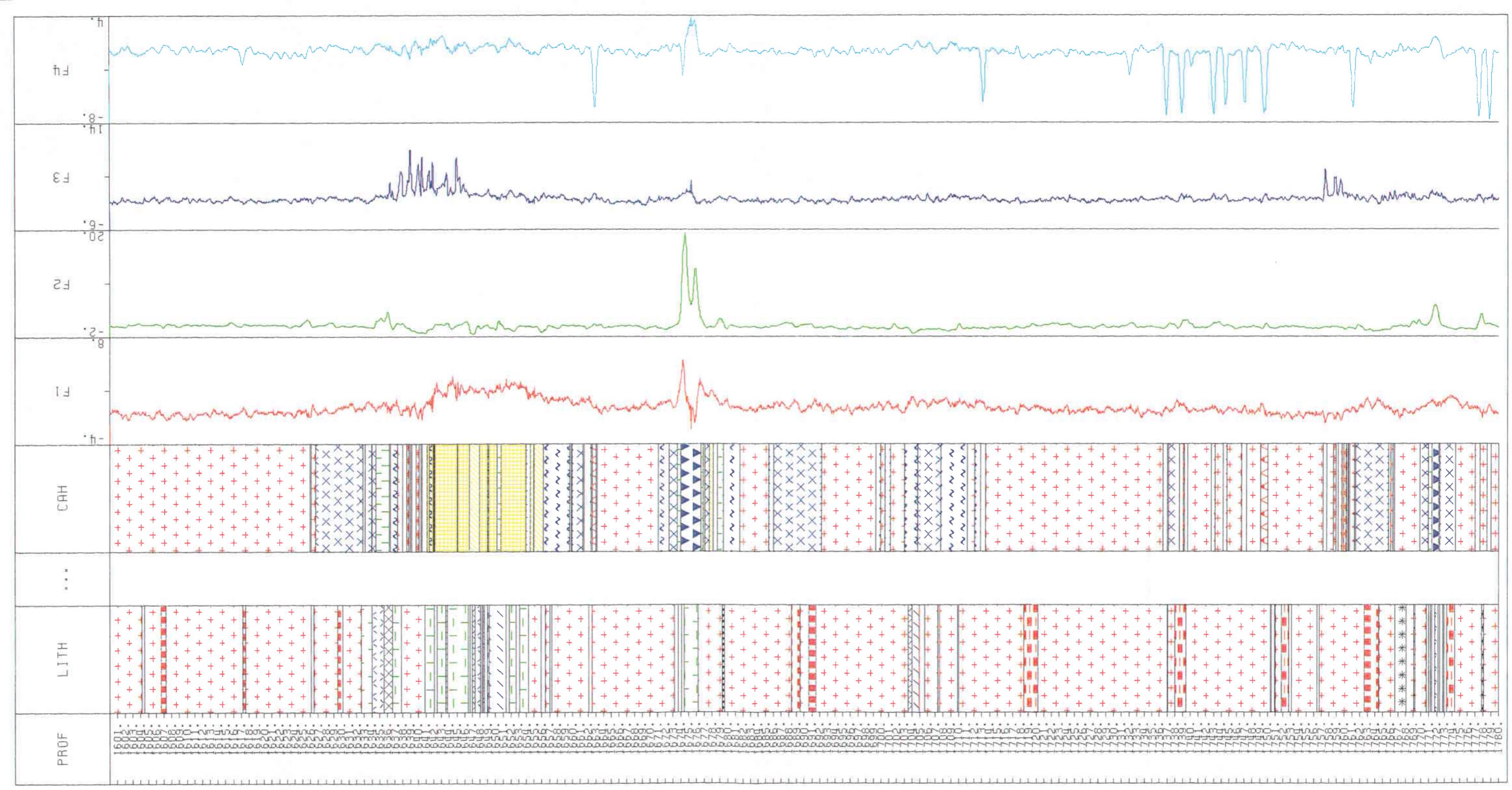


Fig. 2 Log du sondage
EPS1

Fig 2 (suite du sondage)



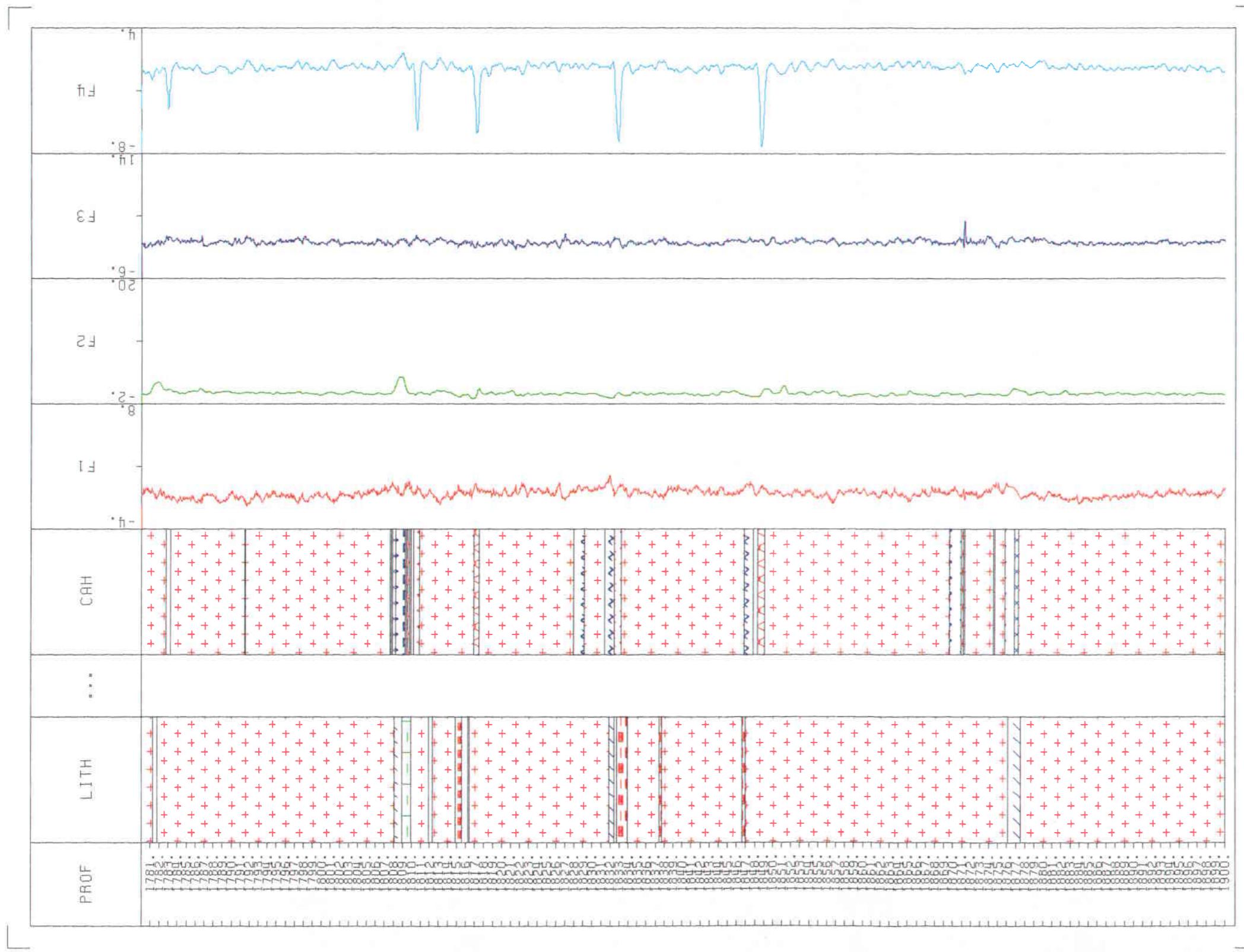


Fig 2 (suite du sondage)

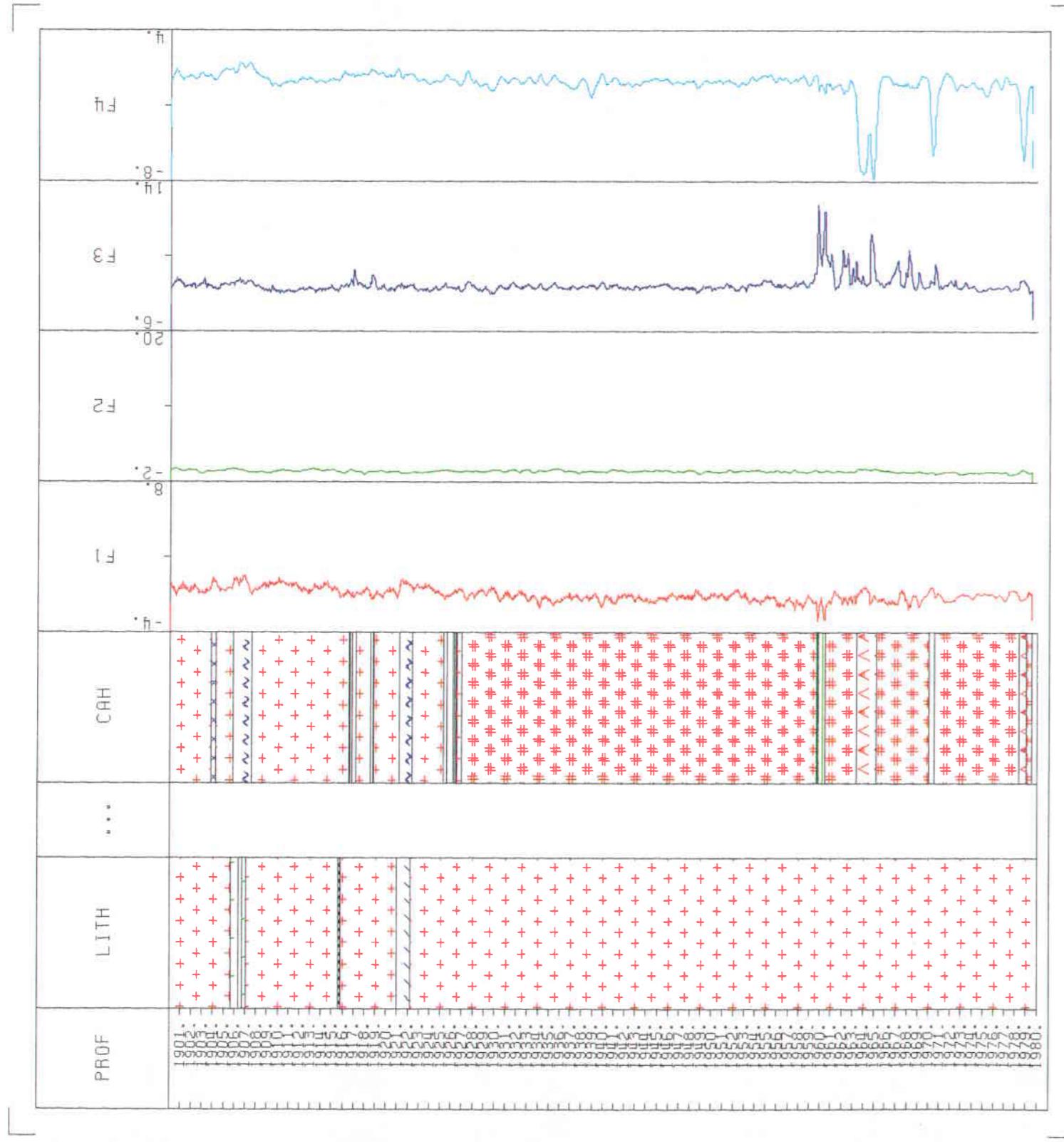


Fig 2 (suite du sondage)

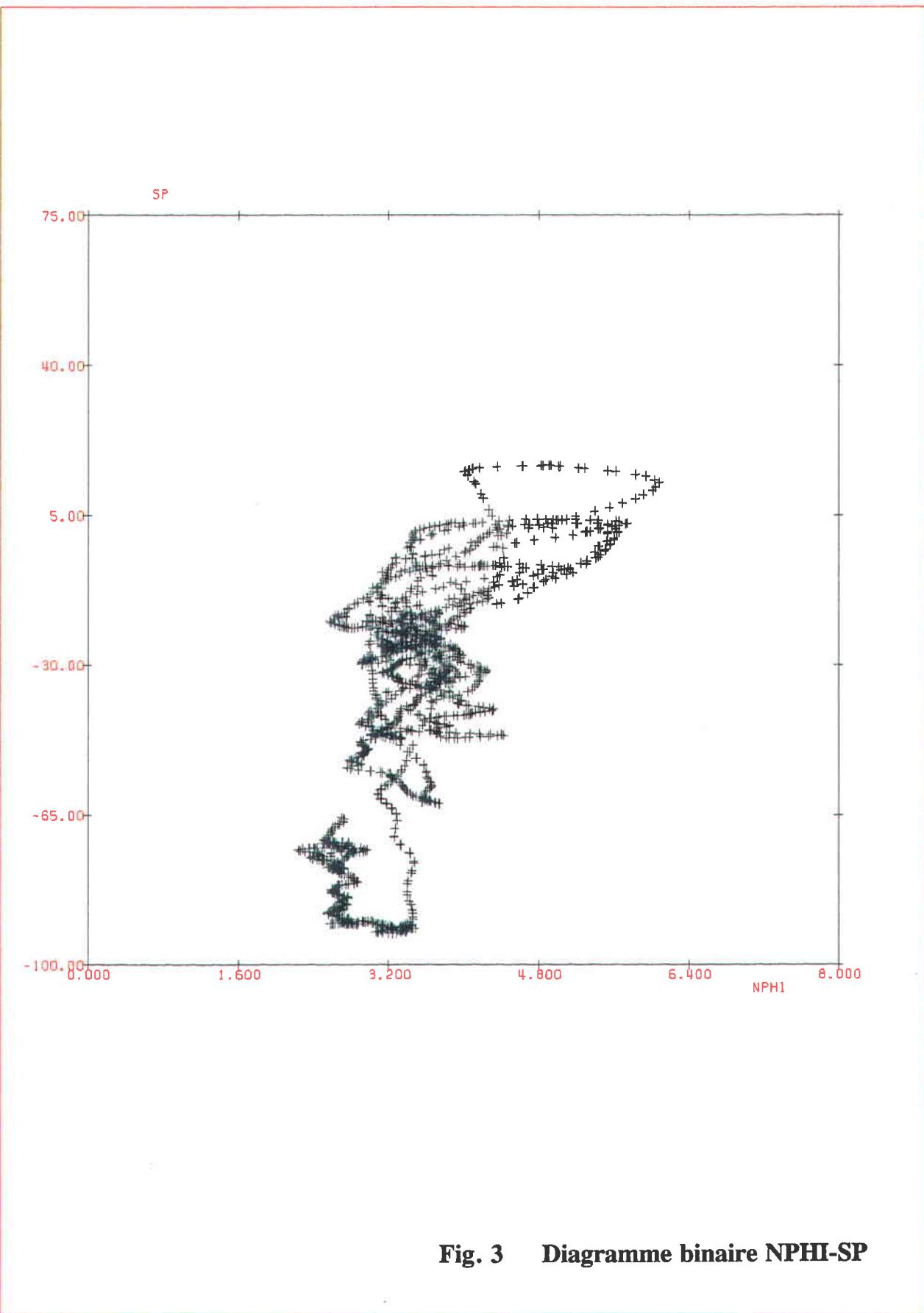
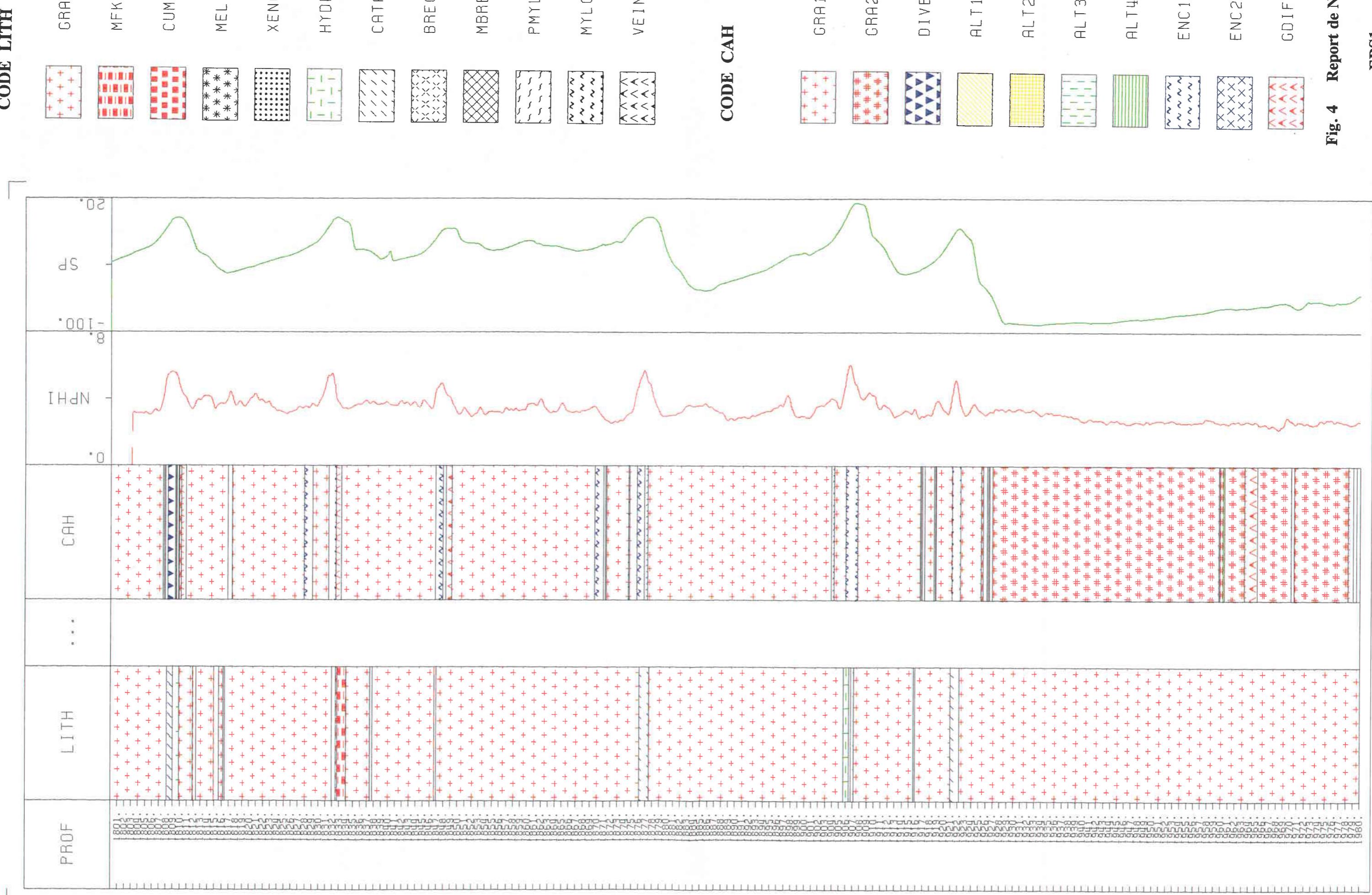
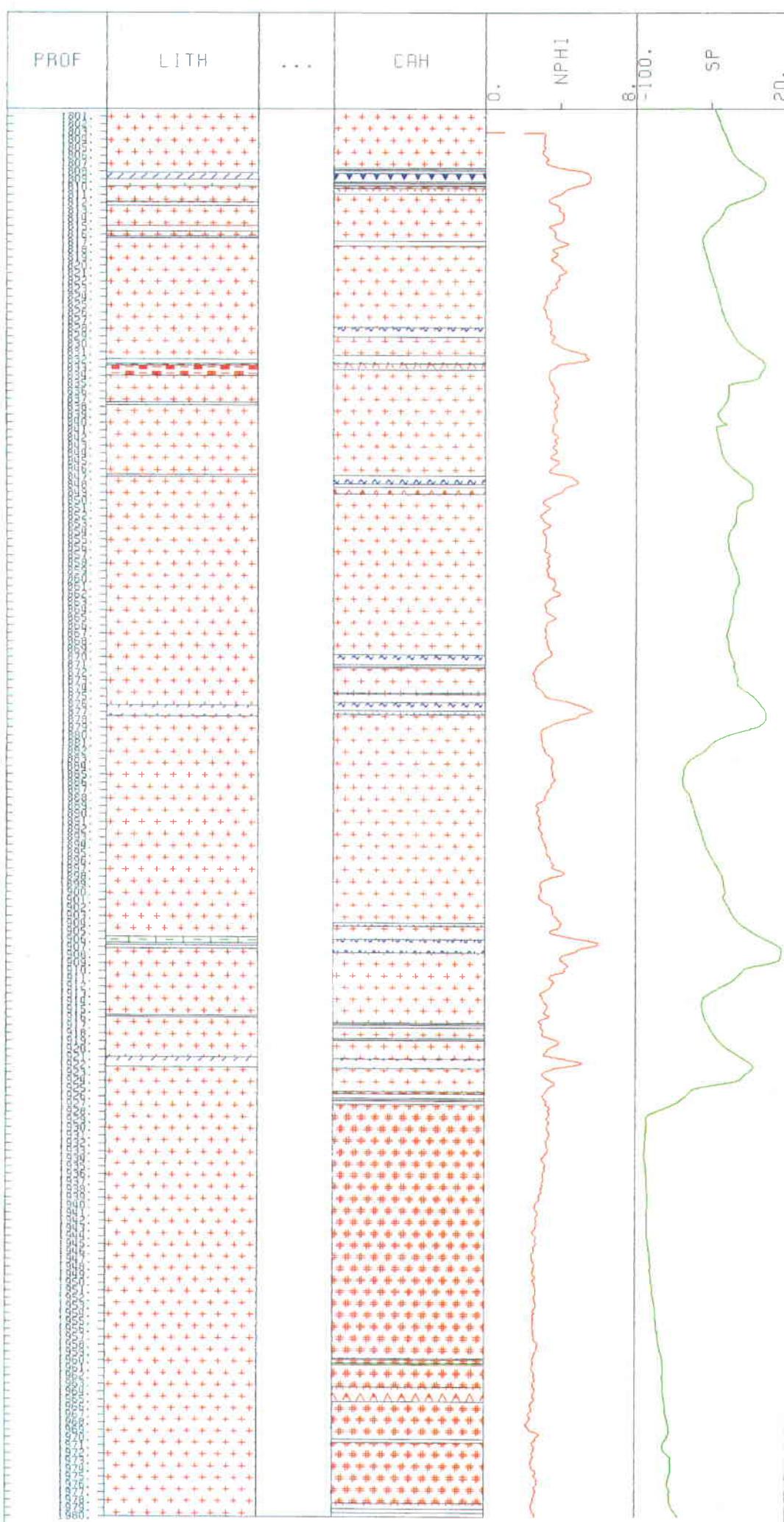


Fig. 4 Report de NPHI et Sp



CODE LITH

	GRAN
	MFKR
	CUMU
	MELA
	XENO
	HYDR
	CATA
	BREC
	MBRE
	PMYL
	MYLO
	VEIN



CODE CAH

	GRA1
	GRA2
	DIVE
	ALT1
	ALT2
	ALT3
	ALT4
	ENC1
	ENC2
	GD1F

Fig. 4 Report de NPHI et Sp

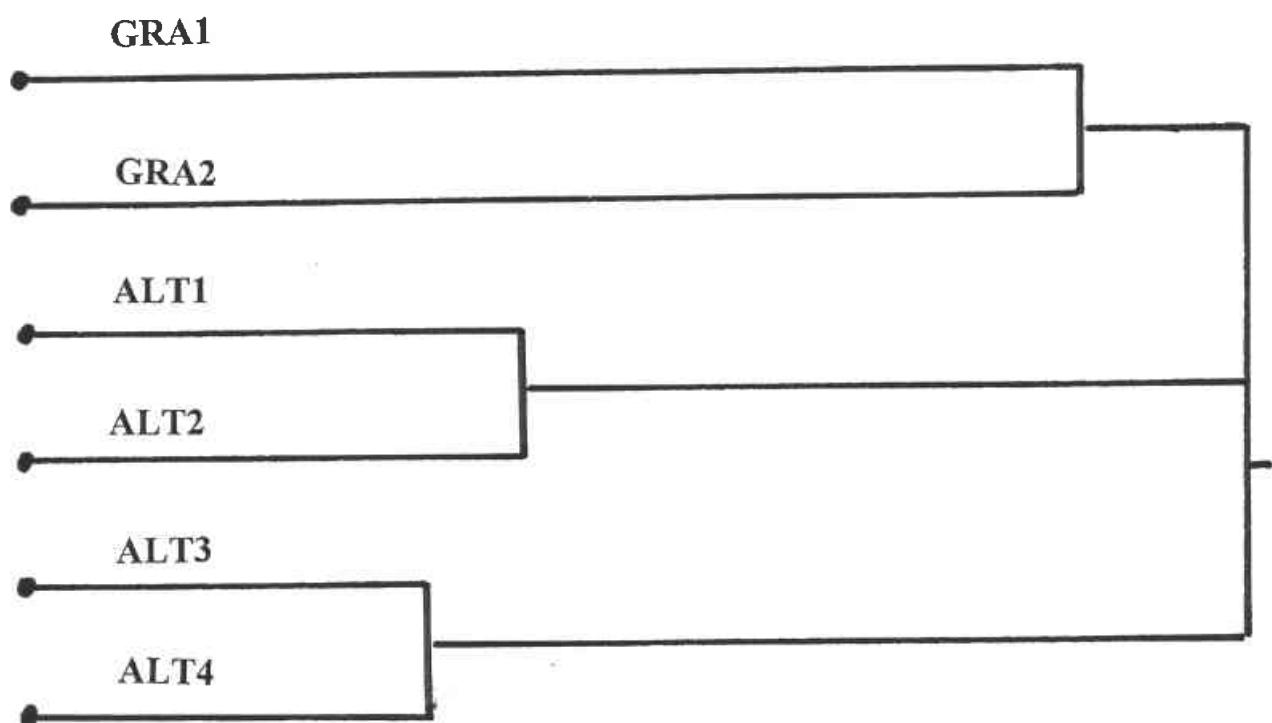


Fig. 5 Dendrogramme de la CAH

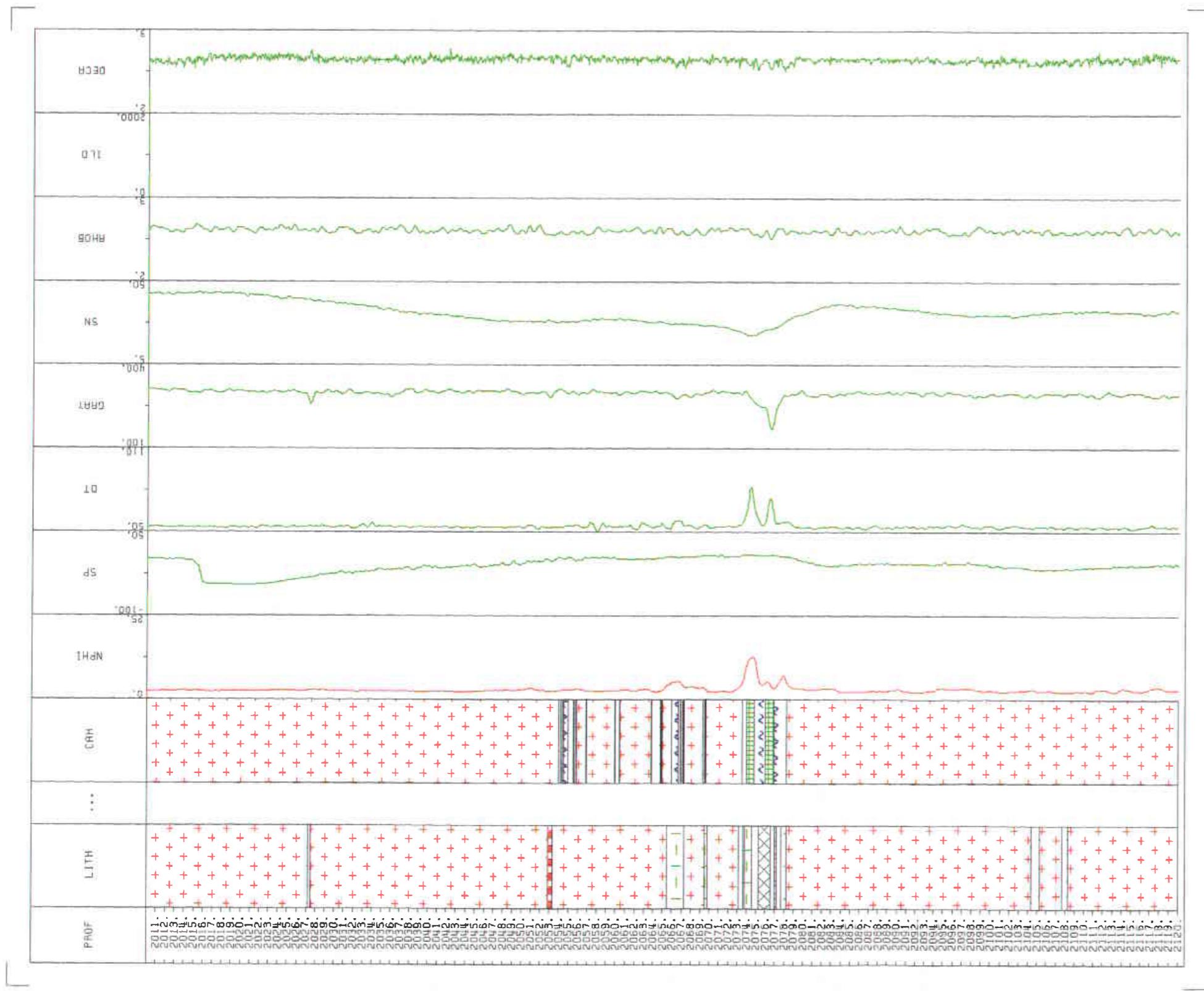
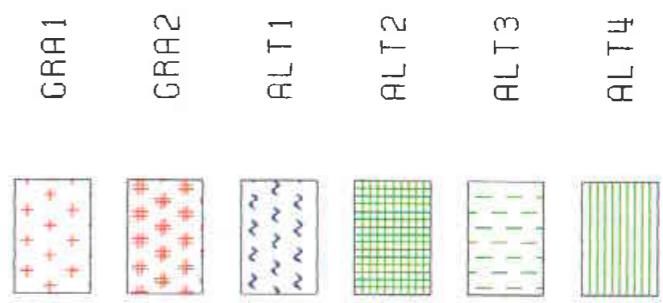


Fig. 6 log du sondage EPS1



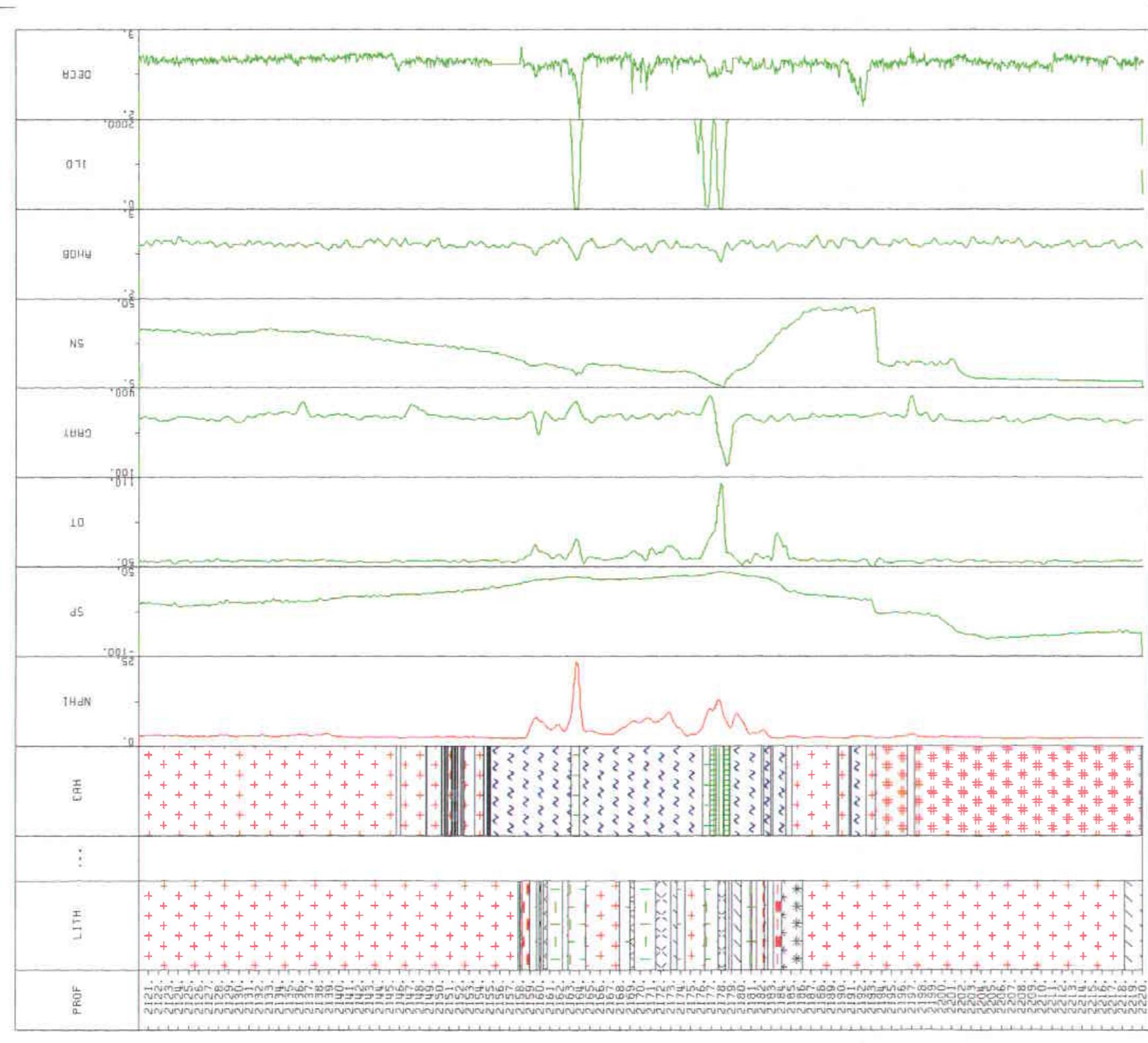
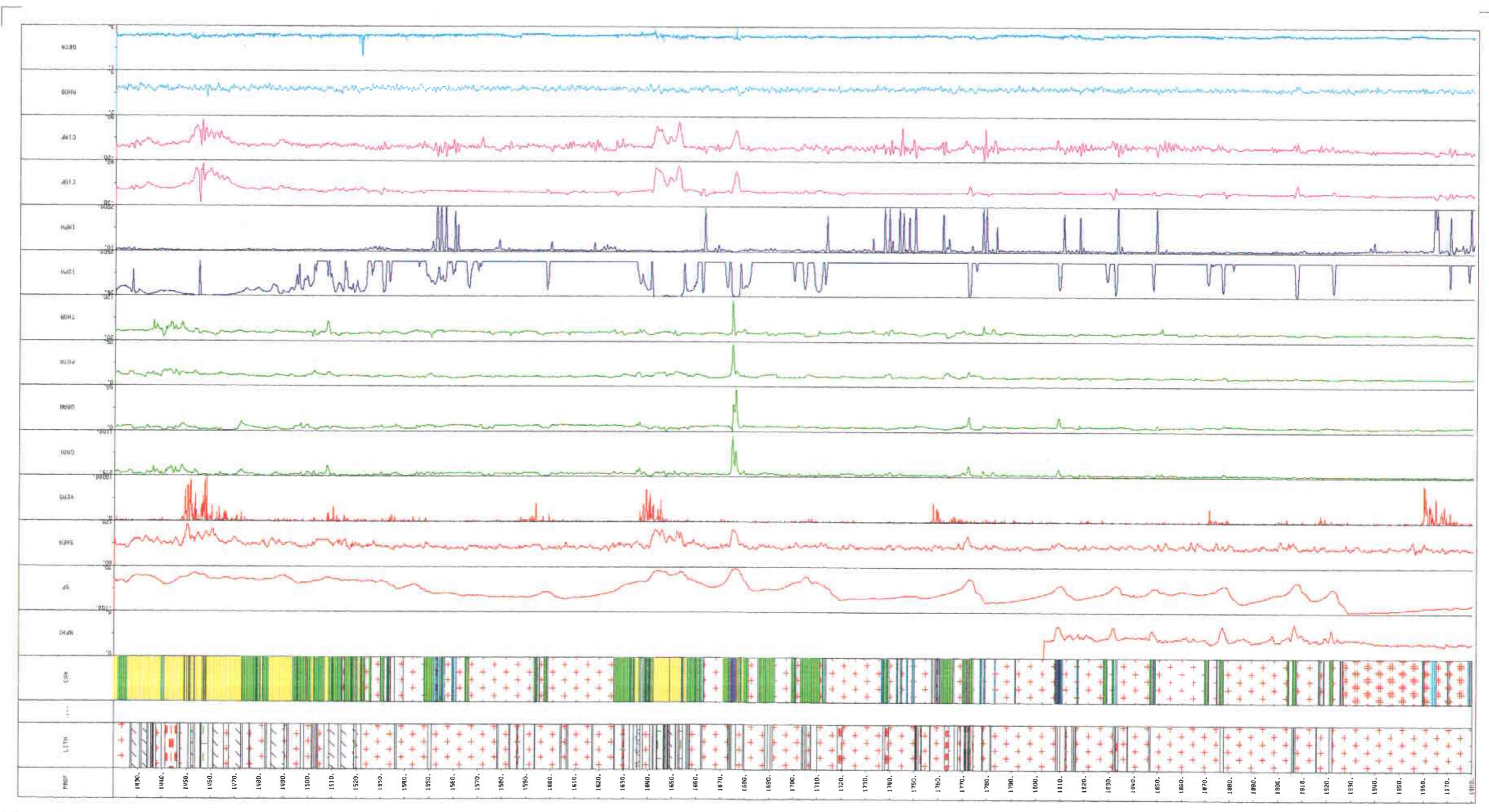


Fig 6 (suite du sondage)

Fig. 7 log de sondage



CODE LITH

CODE CAH

GD1F

ENC2

ENC1

ALT4

ALT3

ALT2

ALT1

DIVE

GRA2

GRA1

MYLO

PMYL

MBRE

BREC

CATA

HYDR

XENO

MELA

CUMU

MFKR

GRAN

EPS1

**SCHEMA ILLUSTRENT LA COMPOSITION MOYENNE
DES TROIS GRANDS TYPES DE FACIES
SONDAGE EPS1-SOULTZ**

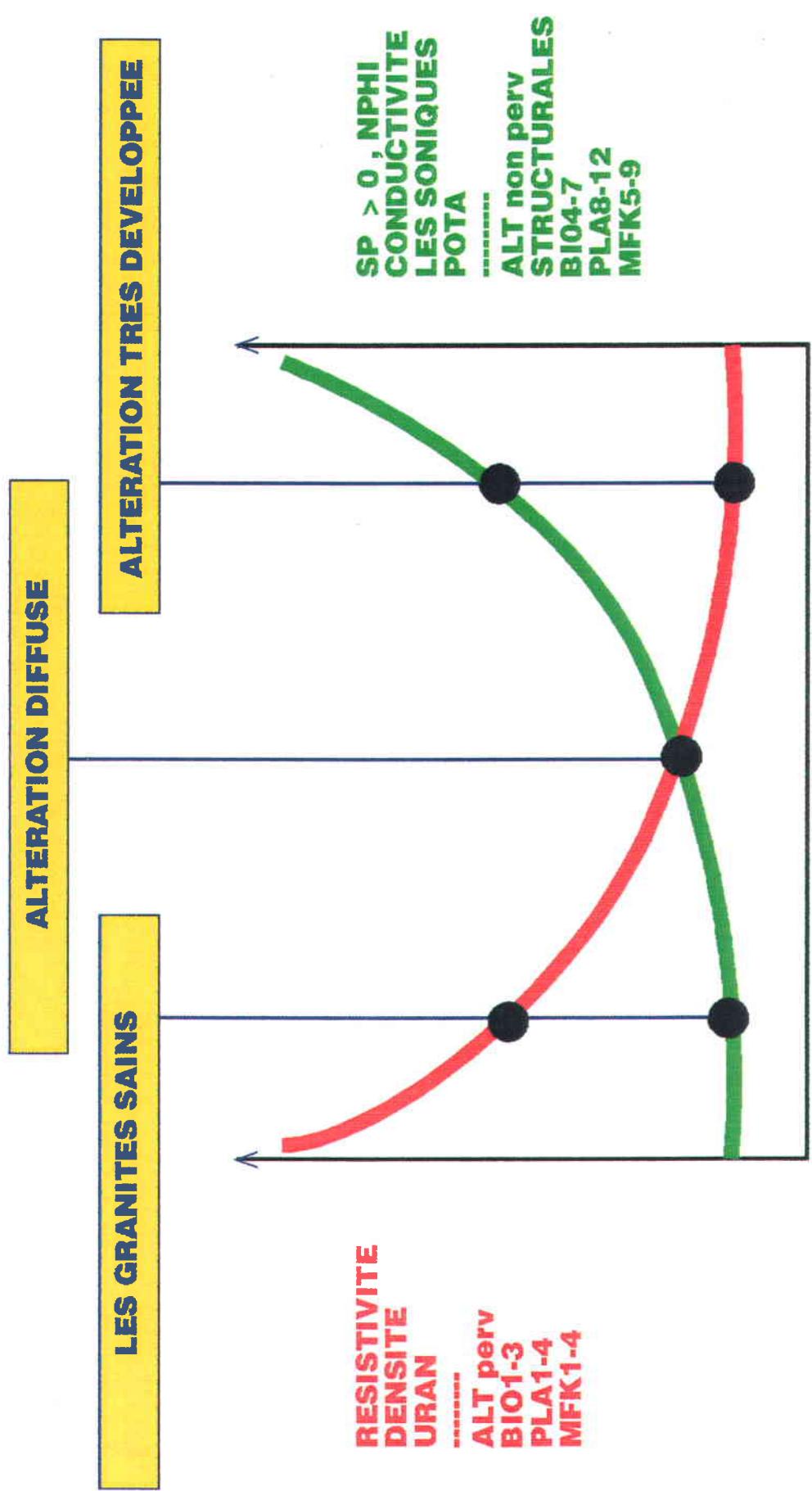


Fig 8

Appendix 3

Appendix 3: Lithological reconstruction of Well GPK1 from well logging data from Artignan (1996).

**SONDAGE GEOTHERMIQUE
GPK1 de SOULTZ sous FORETS**

**Elaboration d'un log lithologique
à partir des données de diagraphies**

D. ARTIGNAN

AVRIL 96

Note technique SMN/DEX/T2M 96/014

Etude réalisée par le Service Minier National / Département de l'Exploration
à la demande et sur financement de la Direction de la Recherche / Département GIG

1. Introduction

Le sondage GPK1 est situé sur la partie ouest du graben du Rhin sur la commune de Soultz-sous-Forêts (Alsace France) connue pour son gradient thermique inusuel bien établi par les nombreux sondages pétroliers du champs de Pechelbronn. Ce sondage a été réalisé dans le cadre du projet franco-germanique "Hot-Dry-Rock" (HDR) dont l'objectif est de tester les capacités d'utilisation à des fins géothermiques du socle granitique sous la couverture sédimentaire.

Stoppé à 3587.3 mètres de profondeur GPK1 a recoupé 2211.3 mètres de faciès granitiques sous 1376 mètres de couverture sédimentaire. Seul 43m ont été carottés, et donc la presque totalité du sondage a été réalisée en destructif. Les cuttings ont fait l'objet d'observations pétrographiques fines (H. Trainneau et al., 1991 -A.Genter et H.Traineau 1993) et des levés diagraphiques complets et sophistiqués ont été réalisés sur la totalité du sondage en contexte granitique avec des outils Schlumberger. L'objectif de cette étude est de reconstituer par traitement statistique des données de diographies un log pétrographique, en particulier de détecter les faciès d'altération pour venir en appui aux observations faites sur cuttings.

2. Présentation globale de l'information

2.1 les données de diographies

Pour des raisons techniques les méthodes de diographies ont varié dans le temps et les variables mesurées ne sont pas les mêmes tout au long des 3587 mètres de GPK1. Si les mesures commencent toutes à 1430m de profondeur elles se terminent à des profondeurs très variables comme on peut le voir dans le Tab1 et sur la Fig 1. Au nombre de 20 ces variables appartiennent aux trois types suivants :

- ⇒ les diographies radioactives : SGR-CGR-RHOB-PEF-URAN-THOR-POTA-NPHI
- ⇒ les diographies soniques : DT4S-DT4P-DTST-PR-YME-AIMP-GR-RGR
- ⇒ les diographies électriques : SP-MSFL-LLD-LLS

Leurs unités et leurs gammes de variations sont présentées Tab 1, tableau dans lequel ont été calculé pour chaque variable les longueurs cumulées de mesure le long du sondage, la valeur mini et maxi, la moyenne arithmétique, l'écart type, la moyenne géométrique et la déviation géométrique.

Var.	Unité	Nombre d'obs.	Fin de mesure	Longueur m	Valeur min	Valeur max	Moy arithm	Ecart type	Moy geom	Dev. geom.
PROF	m				1430.0	3587.3				
SGR	GAPI	42679	3550.00	2133.95	6.0	1244.0	248.2	45.8	244.7	1.2
CGR	GAPI	42488	3550.00	2124.40	7.1	3680.0	207.0	115.0	201.1	1.2
RHOB	g/cm3	42679	3550.00	2133.95	1.20	2.76	2.62	0.08	2.6	1.0
PEF	Pe	42679	3550.00	2133.95	1.4	4.6	3.1	0.2	3.1	1.1
URAN	ppm	42082	3550.00	2104.10	0.1	30.0	5.5	2.8	5.0	1.6
THOR	ppm	42082	3550.00	2104.10	5.5	51.9	29.4	5.8	28.7	1.3
POTA	%	42082	3550.00	2104.10	1.2	10.0	5.1	0.7	5.0	1.1
DTST	µs/f	41261	3492.95	2063.05	43.4	239.6	203.5	5.1	203.2	1.0
PR	-	41257	3492.95	2062.85	0.0	2.4	0.3	0.0	0.3	1.1
DT4S	µs/f	41257	3492.95	2062.85	15.0	134.9	92.2	6.7	91.9	1.1
DT4P	µs/f	41261	3492.95	2063.05	9.7	853.0	53.0	7.9	52.8	1.1
YME	10E+6 PSI	41257	3492.95	2062.85	3.6	299.4	10.5	1.9	10.4	1.2
AIMP	MSGC	41261	3492.95	2063.05	884.4	69308.5	15132.3	1156.1	15042.8	1.1
GR	GAPI	41261	3492.95	2063.05	59.6	508.0	245.3	43.0	241.6	1.2
NPHI	%	10899	1974.90	544.95	0.3	28.1	3.2	3.5	2.2	2.1
SP	mV	10899	1974.90	544.95	-57.8	35.5	-14.4	16.2	2.8	4.0
MSFL	ohm.m	10899	1974.90	544.95	0.2	2000.1	428.4	639.7	106.5	6.4
LLD	ohm.m	10899	1974.90	544.95	3.1	54663.3	3099.0	6153.8	812.7	5.9
LLS	ohm.m	10899	1974.90	544.95	1.8	33604.3	2101.1	4014.3	598.5	5.8
RGR	GAPI	10899	1974.90	544.95	127.8	1944.0	306.6	64.1	302.1	1.2

Tab n. 1 : Paramètres statistiques élémentaires des variables de diaglyphies

2.2 les données pétrographiques

Ces données sont extraites des études pétrographiques sur cuttings publiées par A. Genter et H. Trainneau (1993) et H. Trainneau et al. (1991).

L'étude des cuttings a permis de définir 11 faciès pétrographiques qui correspondent à 5 faciès granitiques, deux faciès leucogranites et quatre faciès de granites altérés décrits ci après avec la longueur cumulée de chacun d'eux sur toute la longueur du sondage soit entre 1430 m et 3587 m :

Code	Description pétrographique	Longueur
GRAN	Standard porphyritic granite	1092.5
MELA	Biotite-rich granite	165.4
MFKR	hematitised biotite porphyritic granite	4.8
HEMA	K-feldspar-rich porphyritic granite	69.1
PROP	propylitised biotite porphyritic granite	68.7
LEG1	leucogranite type 1	15.5
LEG2	leucogranite type 2	48.6
HLOW	altered granite (low-grade)	148.2
HMOD	altered granite (moderate-grade)	244.5
HHIG	altered granite (high-grade)	131.9
HEXT	altered granite (very high-grade)	16.4

Tab 2 : description des faciès pétrographiques définis à partir de l'observation des cuttings.

2.3 log des données pétrographiques et de diagraphe

La visualisation de l'ensemble des données de base (diagraphe et pétrographie) a été réalisée Fig 1 à l'échelle de 1/ 6000 .

Elle permet d'avoir une vue d'ensemble de ces données, de leurs fluctuations et de leurs relations globales. Sans entrer dans le détail on notera qu'il existe une diminution régulière, une dérive vers le fond du sondage des variables URAN-THOR-SGR-GR qui peut être imputée à des modifications de lecture des sondes en relation avec l'augmentation de la température ou à un enrichissement en éléments radioactifs vers le toit du massif granitique.

2.4 Conclusion : faciès pétrographiques et variables de diagraphies

En conclusion de cette présentation globale on retiendra pour l'étude statistique ci après que les données ne sont pas toutes disponibles aux mêmes profondeurs comme décrit dans le Tab1 ; au delà de 1974 mètres les variables électriques ne sont pas disponibles.

Enfin et à titre indicatif les moyennes arithmétiques, les écart-types et les longueurs cumulées de mesure des variables de diagraphies pour chacun des faciès pétrographiques sont présentés Tab 3 pour toutes les variables à l'exception des électriques et de NPHI, et Tab 4 pour ces seules dernières variables.

On en retiendra les valeurs moyennes du faciès GRAN le plus représenté comme valeurs de références, et on notera par rapport à ces dernières les fortes fluctuations en de nombreuses variables en relation avec les phénomènes d'altération.

3. Etude des corrélations des différentes variables de diographies par ACP

L'étude des corrélations entre variables a été réalisée par la mise en oeuvre d'une analyse factorielle en composantes principales (ACP). Ce programme statistique permet de définir les associations de variables de diographies qui ont les mêmes fluctuations dans les populations étudiées ; en regroupant ces variables de diographies qui varient simultanément en fonction du contexte géologique l'ACP permet d'extraire l'information majeure et simplifiée de l'information totale supportée par chacune de ces vingt variables, information qui est difficilement accessible du fait de sa complexité.

Du fait de l'hétérogénéité des mesures le long du sondage cette analyse ACP a été réalisée en deux fois :

3.1 De 1430 m à 1974.9 m : ACP sur toutes les variables.

Dans cette partie supérieure du sondage les 20 variables disponibles ont été prises en compte pour la réalisation de l'ACP mise en oeuvre sur valeurs naturelles avec rotation des facteurs selon le critère Varimax. Les résultats de cette analyse présentés Tab 5 montrent que l'information globale s'organise autour de cinq axes majeurs qui caractérisent les associations de variables résumées Tab 6 .

m ²	1	2	3	4	5
Valeur propre	5.358	3.776	2.911	2.223	1.215
Pourcentage	26.8	18.9	14.6	11.1	6.1

f(SGR)	0.08	0.96	-0.15	-0.02	0.02
f(CGR)	0.18	0.54	-0.75	-0.03	0.00
f(RHOB)	-0.69	-0.04	-0.39	0.07	0.09
f(PEF)	-0.05	0.06	-0.86	-0.10	0.12
f(URAN)	-0.15	0.68	0.64	-0.01	0.00
f(THOR)	-0.02	0.33	-0.90	-0.01	-0.03
f(POTA)	0.56	0.43	0.15	-0.09	0.11
f(DT4P)	0.94	-0.03	-0.05	-0.10	-0.12
f(DT4S)	0.89	-0.01	-0.09	-0.13	0.35
f(DTST)	0.26	0.07	0.22	0.00	-0.04
f(GR)	0.03	0.93	-0.21	-0.04	0.00
f(RGR)	0.06	0.95	-0.16	-0.02	0.01
f(NPHI)	0.67	0.08	-0.17	-0.13	-0.06
f(SP)	0.19	-0.10	-0.03	-0.58	0.20
f(MSL)	-0.30	-0.05	0.14	0.20	0.06
f(LLD)	-0.13	-0.07	0.02	0.95	0.01
f(LLS)	-0.13	-0.11	0.03	0.92	0.05
f(PR)	-0.03	0.05	-0.09	-0.08	0.97
f(YME)	-0.94	0.01	0.04	0.15	-0.20
f(AIMP)	-0.97	0.02	-0.04	0.11	0.14

Tab 5 : Résultats de l'Analyse factorielle en composantes principales après rotation des axes (traitements sur valeurs naturelles)

Axes N°	Association de variables de diographies corrélées
1 >0	POTA-DT4S-DT4P-NPHI
1 <0	RHOB-YME-AIMP (on notera que cette association fluctue de façon opposée à l'association définie fpar F1>0)
2 >0	SGR-CGR-URAN-POTA-GR-RGR
3 >0	URAN
3 <0	PEF-THOR (on notera que cette association fluctue de façon opposée à l'association définie fpar F3>0)
4 >0	LLD-LLS
4 <0	SP
5 >0	PR

Tab. n.6 Associations de variables mises en évidence par l'ACP (partie sup de GPK1)

Par ailleurs on notera que DTST et MSFL sont des variables non structurées dans l'espace factoriel défini par l'ACP et donc à considérer comme peu significatives, peu caractéristiques d'un élément du contexte géologique.

L'information majeure qui apparaît dans cette analyse est la caractérisation de faciès granitiques (axes 1<0, 2, 3>0 et 3<0) et de phénomènes d'altérations qui se marquent en opposition à ces faciès principalement par la porosité neutronique et une polarisation spontanée (SP) élevée (voire positive) et alors une résistivité faible.

3.2 de 1430 m à 3492.95 m : ACP sans NPHI ni les variables électriques

Cette ACP a été réalisée dans les mêmes conditions que la précédente mais sur la totalité du sondage et avec 14 variables de diagraphies disponibles. Ses résultats sont présentés Tab 7. L'information principale est expliquée par 4 axes dont les caractéristiques sont résumées Tab 8 ci après.

m	1	2	3	4
Valeur propre	4.034	2.962	2.486	1.345
Pourcentage	28.8	21.3	17.8	9.6
f(SGR)	-0.06	0.76	-0.58	0.02
f(CGR)	-0.12	0.96	-0.03	0.05
f(RHOB)	0.64	0.08	-0.09	0.48
f(PEF)	0.38	0.38	0.53	0.40
f(URAN)	0.06	0.17	-0.90	-0.03
f(THOR)	0.13	0.79	-0.23	-0.04
f(POTA)	-0.52	0.43	0.14	0.20
f(DT4P)	-0.69	-0.04	-0.03	0.25
f(DT4S)	-0.90	0.04	0.04	0.19
f(DTST)	-0.20	-0.19	0.73	-0.11
f(GR)	-0.07	0.67	-0.67	-0.02
f(PR)	-0.15	-0.02	-0.02	0.86
f(YME)	0.95	-0.04	-0.04	0.05
f(AIMP)	0.95	0.00	-0.04	0.23

Tab 7 : Résultats de l'Analyse factorielle en composantes principales après rotation des axes (traitements sur valeurs naturelles)

Axes N°	Association de variables de diagraphies corrélées
1>0	RHOB-YME-AIMP
1<0	POTA-DT4S-DT4P (on notera que cette association fluctue de façon opposée à l'association définie fpar F1>0)
2	SGR-CGR-POTA-THOR-GR
3	PEF-DTST
3<0	URAN-GR (on notera que cette association fluctue de façon opposée à l'association définie fpar F3>0)
4>0	PR - RHOB

Tab 8 : Associations de variables mises en évidence par l'ACP (partie sup de GPK1)

Hormis les variables électriques non prises en compte cette analyse retrouve à quelques variantes près les associations de la partie supérieure du sondage mises en évidence par l'analyse précédente.

Plus généraux car calculés sur la totalité du sondage on considérera ces derniers résultats comme plus caractéristiques du comportement des variables de diagraphie. Une image des variations locales de l'intensité de ces diverses associations de variables de diagraphies (de l'intensité de ces diverses corrélations) est donnée sur le Log Fig 3 par le report des facteurs scores des quatre axes retenus.

En conclusion on retiendra comme majeures les corrélations de l'axe 1 de la densité neutronique RHOB avec les variables soniques YME-AIMP, et (en opposition) les corrélations des variables soniques DT4S-DT4P avec POTA (et la porosité NPHI dans la partie supérieure). La nature des variables qui constituent ces associations et le fait qu'elles fluctuent en opposition (porosité / densité) permet de supposer que ces variables caractérisent les faciès granitiques et les phénomènes d'altération qui les affectent.

Les autres corrélations sont moins évidentes. Elles sont cependant significatives et sans doute en liaison avec des sous-faciès des deux principaux faciès-types envisagés ci dessus (granites sains / granites altérés). Avec l'aide de la cartographie des facteur-scores on notera que :

- les variables associées par le facteur 2 montrent des corrélations globalement fortes entre 1430m - 2300 m , et 2900m -3500m, plus faibles dans la partie centrale du sondage (2300m - 2900m). Localement ces mêmes corrélations sont perturbées en plus ou en moins dans les zones d'altération. Enfin on notera que ces corrélations se transforment en opposition dans les faciès leucogranitiques.
- les corrélations du facteur 3 augmentent de façon notable vers le bas du sondage
- le facteur 4 souligne de façon globale les zones d'altération par des fluctuations fortes en plus ou en moins.

Enfin on notera qu'aucune variable n'est corrélée aux variables électriques.

4. Définition des litho-faciès par mise en oeuvre de la CAH.

L'objectif de la démarche entreprise dans ce paragraphe est de déterminer par analyse statistique multivariée les groupes de passes de sondage qui ont les mêmes caractéristiques de diagraphies selon la méthodologie utilisée pour la sondage EPS 1 (D. Artignan, 1994).

Le programme de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) permet de définir ces groupes de passes à partir de leurs caractéristiques de diagraphies et d'affecter à chacune d'elles un code . Sachant que les mesures de diagraphies varient en fonction du contexte géologique et de façon significative, on peut supposer que ces groupes correspondent à des faciès lithologiques. Leur cartographie le long de l'axe du sondage permet alors de construire un log lithologique issu de l'information géophysique que l'on confrontera au log lithologique issu de l'information pétrographique.

4.1 Résultats de la CAH

La CAH a été mise en oeuvre sur 14 variables de diagraphies (SGR-CGR-RHOB-PEF-URAN-THOR-POTA-DT4P-DT4S-DTST-GR-PR-YME-AIMP) en valeurs naturelles et sur la totalité du sondage. Parmi les différentes solutions proposées la classification automatique en 11 groupes de passes a été retenue.

Le dendrogramme de la CAH dessiné sur le cartouche de la Fig 3 illustre les relations entre ces 11 groupes, leur degré de ressemblance. Ce diagramme montre qu'ils se

regroupent eux-mêmes en trois grandes familles : groupes 1-4-7-9-11 (famille A), groupes 3-6 (famille B), groupes 2-5-8-10 (famille C).

Les caractéristiques géophysiques de chacun de ces 11 groupes sont présentées par leurs moyennes arithmétiques et les écart-types, d'une part Tab 9 et Fig 2 pour l'ensemble des variables de diagraphies sur la totalité du sondage à l'exception des variables électriques et de NPHI ,d'autre part Tab 10 pour ces seules dernières à titre indicatif car peu représentées entre 1430 m et 1974.95 m. Comme pour les faciès pétrographiques on notera dans ce dernier tableau les forts écart-types des variables et donc leur caractère peu représentatif par rapport à ces deux classifications (pétro et CAH)

La lecture du Tab 9 en notant les variables de diagraphies fortes ou faibles (notées entre parenthèses) permet de caractériser chacun des 11 groupes tel que résumé Tab 11 ci après :

Famille	n°groupe	variables de diagraphies caractéristiques
A	1	RHOB-PEF-YME-AIMP
"	4	RHOB-PEF-YME-AIMP
"	7	RHOB-PEF-(URAN)
"	9	RHOB-PEF-YRAN-THOR-GR
"	11	RHOB-(PEF)-URAN-(THOR)GR
B	3	RHOB-SGR-CGR-URAN-THOR-GR-YME-AIMP-(DTST)
"	6	(RHOB)-DT4P-DT4S-SGR-CGR-URAN-THOR-GR-POTA-YME-AIMP
C	2	(RHOB)-DT4P-DT4S-POTA
"	5	(RHOB)- DT4P-DT4S-YME-AIMP-(SGR)-(PEF)-(POTA)-(PR)
"	8	(RHOB)-(PEF)-THOR-(POTA)-DTST-(YME)-(AIMP)-(PR)
"	10	(RHOB)-DT4P-DT4S-DTST-PR-YME-AIMP-POTA

Tab 11 : variables caractéristiques des groupes delà CAH.

Ces tableaux appellent les commentaires suivants :

-Famille A : la plus représentée en métrage elle se caractérise par une densité neutronique stable autour de 2.6 et un PEF (photo electric effect) assez élevé à l'exception du groupe 11. Les différents groupes qui la constituent semblent correspondre

a) aux faciès granitiques (1-4) les plus représentés (837 m cumulés) peu différents l'un de l'autre et caractérisés par de plus fortes variables d'impédances soniques (YME-AIMP)

b) à des faciès granitiques (7-9-11) eux aussi largement représentés (556 m cumulés) qui se diffèrentient les uns des autres par les variables URAN et THOR et GR . On notera le groupe 11 qui est très uranifère et le moins thorifère de tous les faciès.

-Famille B : présente sur 440 m elle se caractérise par des variables nucléaires en particulier URAN et soniques (impédances ou vitesses) élevées. En fait le groupe 3 avec une densité de 2.63 et des impédances soniques fortes se rattache à la famille A

des granites tandis que le groupe 6 avec une faible densité de 2.57 et des vitesses soniques plus fortes est plus proche de la famille C suivante des granites altérés. On notera pour ce dernier les fortes moyennes en POTA et URAN.

- Famille C : présente sur 208 m cumulés elle est très caractéristique avec ses faibles densités <2.6 et aussi par de plus fortes variables de vitesses soniques (DT4P-DT4S). Les autres variables sont très souvent faibles, ceci étant particulièrement vrai pour le groupe 8. Cette famille aux fortes fluctuations de variables semblent correspondre aux faciès granitiques ayant subis une forte altération.

4.2 Construction du log des groupes de la CAH

A chaque passe de sondage la CAH ayant affecté un code correspondant à l'un des 11 groupes définis, le dessin d'un figuré caractéristique de chacun de ces groupes en chaque passe permet de construire le log géophysique Fig 3 de même type que le log des faciès pétrographiques et d'en faire la comparaison.

5. SYNTHESE DES RESULTATS

A titre de conclusion et de document de synthèse de l'information ont été reportés à l'échelle du 1/1500 Fig 3 sur toute la longueur du sondage GPK1 les données d'observation pétrographiques , les données brutes de diagraphe mais aussi les résultats de l'ACP et de la CAH. Ces documents permettent de visualiser et de constater que :

1. Comme le montre l'ACP les variables électriques varient ensemble ou en opposition (tension / résistivité), que les soniques d'impédance varient ensemble et avec la densité, de même que les variables soniques de vitesse avec le potassium, mais pas les variables radioactives qui restent globalement indépendantes les unes des autres.
2. Il existe une bonne corrélation globale entre le log des faciès pétrographiques et le log des faciès géophysiques construit par la CAH. On peut le vérifier par comparaison des logs mais aussi à partir du Tab 12 ci dessous qui donne en % le nombre de passes communes entre les groupes pétrographiques et CAH.

	Groupes CAH										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
GRAN	60.37%	7.20%	47.36%	93.97%	32.11%	0.00%	29.43%	100.00%	60.39%	0.00%	3.15%
MELA	9.07%	0.00%	3.92%	1.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	34.82%	0.00%	0.35%
MFKR	0.00%	0.00%	0.24%	0.16%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.04%	0.00%	0.00%
HEMA	0.00%	0.00%	15.84%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.10%
PROP	0.00%	0.00%	16.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
LEG1	0.00%	0.00%	0.73%	0.27%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	19.23%
LEG2	0.00%	0.00%	0.63%	0.65%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.21%	0.00%	72.38%
HLOW	16.78%	11.95%	0.48%	2.07%	19.47%	0.00%	17.94%	0.00%	0.49%	0.00%	2.80%
HMOD	11.54%	37.53%	8.86%	1.03%	34.21%	0.00%	36.21%	0.00%	3.06%	0.00%	0.00%
HHIG	2.24%	37.79%	5.71%	0.60%	0.53%	68.42%	16.30%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
HEXT	0.00%	5.53%	0.15%	0.00%	13.68%	31.58%	0.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tab 12 : Croisement des faciès pétrographiques et des groupes de la CAH

On peut ainsi constater que :

- il y a des divergences locales sur la présence ou pas d'altération mais pas sur de grandes longueurs
- Les groupes 1-4-7-9 correspondent en général au faciès GRAN dans lequel ils apportent des nuances. Le groupe 1 constitue le faciès dominant de la base du sondage (1850-3500m) alors que les faciès 4 et 9 constituent les faciès dominant de la partie centrale (1980-2850 m)
- Le groupe 11 correspond aux deux faciès de leucogranite LEG1 ET LEG2
- Le groupe 3 correspond au faciès GRAN et aux granites hématititisés et propylitisés HEMA et PROP. On remarquera que ce groupe constitue le faciès dominant de la partie sommitale du sondage (1430-1980 m).
- Le groupe 6 correspond aux granites très altérés HHIG et HEXT
- Les groupes 2-5-10 coïncident avec les faciès de granites altérés de HMOD à HEXT.
- Le groupe 8 très particulier et localisé entre les côtes 1979 et 1983 qui ressemble à un faciès très altéré ne correspond à aucun faciès pétrographique particulier.

En conclusion on peut ajouter que l'ACP et la CAH sont deux outils statistiques multivariés dont la mise en oeuvre sur une base de donnée aussi riche que celle des données de diagraphies du sondage GPK1 de Soultz sous Forêts permet d'extraire l'information majeure et d'apporter une aide précieuse pour :

- reconstituer un log lithologique relativement complet en permettant de différencier trois grands domaines granitiques et les faciès leucogranitiques.
- tracer les zones d'altérations sans divergences majeures par rapport à l'observation pétrographique directe ce qui est un apport particulièrement important dans le cas de sondage non carotté. Ces zones apparaissent comme bien définies, avec des nuances locales, par une densité neutronique faible, des impédances soniques fortes, la présence de potassium et d'uranium.

Sommaire

- 1. Introduction**
- 2. Présentation globale de l'information**
- 2.1 les données de diagraphies
- 2.2 les données pétrographiques
- 2.3 log des données pétrographiques et de diagraphies
- 2.4 Conclusion : faciès pétrographiques et variables de diagraphies
- 3. Etudes des corrélations entre les différentes variables de diagraphies**
- 3.1 Analyse factorielle entre 1430 m et 1974.9 m
- 3.2 Analyse factorielle sur la totalité du sondage
- 4. Définition des litho-faciès part mise en oeuvre de la CAH**
- 4.1 Résultats de la CAH
- 4.2 Construction du log des groupes de la CAH
- 5. SYNTHESE des RESULTATS**

Liste des tableaux

- Tab 1 Description et fluctuations des données de diagraphies
- Tab 2 Description des faciès pétrographiques
- Tab 3 Statistiques données de diagraphies par faciès pétrographiques
- Tab 4 Statistiques données de diagraphies par faciès pétrographiques (variables électriques)
- Tab 5 Résultats de l'analyse factorielle entre 1430 m et 1974.9 m
- Tab 6 Associations de variables mises en évidence par l'ACP (partie sup de GPK1)
- Tab 7 Résultats de l'analyse factorielle sur la totalité du sondage
- Tab 8 Associations de variables mises en évidence par l'ACP sur la totalité du sondage
- Tab 9 Résultats de la CAH sur la totalité du sondage
- Tab 10 Résultats de la CAH pour les variables électriques et NPHI
- Tab 11 Synthèse des résultats de la CAH
- Tab 12 Tableau croisé des groupes "pétrographiques" et des groupes de la CAH

Liste des figures

- Fig 1 Log des faciès pétrographiques et des données de diagraphies à 1/6000
- Fig 2 Visualisation des moyennes par groupe de la CAH
- Fig 3 Log du sondage GPK1 à 1/1500

Bibliographie

H. Trainea, A. Genter, J.P. Cautru, H.Fabriol,P.Chevremont (1991). Petrography of the granite massif from drill cutting analysis and well log interpretation in the geothermal HDR borehole GPK1 (Soultz, Alsace, France).
Geotherm.Sci & Tech;1991 Volume 3(1-4) pp.1-29

A. Genter and H.Trainea (1993). Deepening of GPK1 HDR borehole 2000-3600 m (Soultz-sous-Forêts, France). Rapport BRGM R36611

D. Artignan (1994). Sondage géothermique EPS1 de Soultz-sous-Forêts : reconstitution du log lithologique à partir des données de diagraphies. Note technique BRGM / DEP/DEX/T2M/93035

LITHOLOGIE	L.cumul	SGR	CGR	RHOB	PEF	URAN	THOR	POTA	DT4P	DT4S	DTST	GR	PR	YME	AIMP
GRAN moy	1092.5	244.94	199.58	2.63	3.13	5.53	30.03	4.85	51.78	90.05	203.21	239.25	0.25	10.90	15477.74
SD	30.21	19.41	0.09	0.18	1.99	4.67	0.52	1.48	2.70	4.27	37.46	0.01	0.70	711.18	
MELA moy	165.4	252.73	206.48	2.64	3.11	5.67	32.62	4.72	51.84	89.69	203.58	241.99	0.25	10.97	15501.63
SD	21.73	15.68	0.02	0.16	1.39	3.87	0.47	0.81	1.48	3.16	23.33	0.01	0.36	272.13	
MFKR moy	4.8	272.29	216.19	2.63	3.36	6.96	35.46	4.85	50.63	92.10	200.96	254.29	0.28	10.68	15855.60
SD	10.88	8.11	0.03	0.14	0.55	1.29	0.48	0.55	1.11	1.01	10.87	0.01	0.30	242.13	
HEMA moy	69.1	280.36	222.22	2.65	3.11	7.16	35.04	5.13	52.28	91.50	198.43	296.01	0.26	10.66	15435.78
SD	24.82	17.43	0.02	0.17	1.49	3.86	0.39	1.45	2.18	1.87	27.56	0.01	0.48	411.72	
PROP moy	68.7	297.66	226.87	2.64	3.05	8.71	36.21	5.14	53.05	92.58	196.94	315.31	0.25	10.38	15171.96
SD	19.94	14.59	0.02	0.16	1.58	2.98	0.77	1.83	3.64	1.45	20.28	0.03	0.73	561.31	
LEG1 moy	15.5	270.78	174.94	2.60	2.51	11.79	21.83	5.43	52.21	89.50	198.40	286.80	0.24	10.81	15176.75
SD	20.35	15.57	0.02	0.17	2.44	4.61	0.53	0.92	2.08	1.40	21.98	0.01	0.49	330.37	
LEG2 moy	48.6	248.00	142.55	2.60	2.49	12.85	13.44	5.47	52.63	90.33	198.53	261.02	0.24	10.63	15068.21
SD	55.88	26.54	0.02	0.20	6.22	6.67	0.45	1.03	2.06	2.74	57.71	0.01	0.47	359.70	
HLOW moy	148.2	229.72	195.60	2.61	3.10	4.01	26.01	5.21	53.18	92.88	208.28	219.89	0.25	10.32	15015.59
SD	23.32	17.76	0.06	0.22	1.69	3.24	0.75	3.75	7.10	2.93	21.56	0.02	1.43	1170.81	
HMOD moy	244.5	238.56	203.47	2.59	3.08	4.25	28.05	5.49	55.62	96.91	205.06	233.84	0.25	9.50	14351.54
SD	33.27	22.69	0.08	0.22	2.08	5.21	0.75	5.23	8.85	5.16	40.97	0.03	1.65	1447.35	
HHIG moy	131.9	261.15	221.20	2.56	3.05	4.76	28.27	6.23	59.65	102.90	207.28	262.90	0.26	8.50	13513.61
SD	63.71	43.57	0.07	0.20	3.73	5.54	0.81	19.75	11.77	6.82	55.54	0.05	1.91	1687.62	
HEXT moy	16.4	286.25	227.13	2.49	2.81	5.61	31.17	6.18	62.14	107.48	204.57	305.72	0.23	7.37	12286.99
SD	136.43	46.65	0.19	0.45	6.54	7.16	1.41	4.66	13.30	10.80	68.68	0.07	1.63	1173.14	

Tab 3 : Comparaison des moyennes et des écart-types par raciès pétrographique

LITHOLOGIE	L cumul.	RGR	NPHI	SP	MSFL	LLD	LLS
GRAN moy	196.24	310.56	1.81	-13.88	521.72	3946.54	2203.60
	SD	27.12	0.61	12.62	667.58	6657.28	4034.91
MELA SD	31.88	285.60	1.62	-50.35	595.00	10800.32	8111.66
	SD	27.85	0.20	5.41	538.89	9347.14	5530.17
MFKR moy SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HEMA moy SD	69.14	298.45	1.98	-2.02	565.46	1324.67	1398.23
	SD	29.08	0.80	9.79	678.28	1744.24	2343.64
PROP moy SD	69.76	317.92	2.68	-21.80	206.72	1515.43	1073.42
	SD	21.99	1.20	19.51	362.30	1898.26	1344.79
LEG1 moy SD	15.53	288.95	1.02	-40.45	377.72	12245.34	6937.74
	SD	23.52	0.22	1.27	493.86	11180.78	5922.36
LEG2 moy SD	48.65	263.14	0.92	-9.07	654.46	2995.02	2891.18
	SD	59.06	0.53	3.11	653.50	5260.02	4747.32
HLOW moy SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HMOD moy SD	50.92	304.85	6.55	-10.27	306.22	165.52	191.24
	SD	29.20	3.60	4.22	598.50	167.99	228.01
HHIG moy SD	41.81	351.54	10.24	-5.22	34.58	68.57	45.23
	SD	168.09	4.30	2.71	78.26	66.80	71.25
HEXT moy SD	11.80	330.01	12.48	2.12	14.95	31.76	16.94
	SD	150.90	4.32	1.77	33.12	19.10	11.86

Tab 4 : Comparaison des moyennes et des écart-types par faciès pétrographique (suite)

N° Groupes	L.cumul.	SGR	CGR	RHOB	PEF	URAN	THOR	POTA	DT4P	DT4S	DIST	GR	PR	VME	AIMP
1 Moy	453.00	226.31	190.79	2.64	3.17	4.13	25.93	4.78	51.08	88.32	208.43	218.37	0.25	11.32	15748.08
SD	11.26	10.60	0.02	0.13	0.83	2.22	0.35	0.52	0.99	1.32	13.38	0.01	0.24	205.06	
4 Moy	384.00	225.91	185.71	2.64	3.13	4.98	28.45	4.62	51.54	90.13	201.16	217.34	0.26	10.94	15604.46
SD	10.34	9.79	0.01	0.12	0.96	2.08	0.33	0.75	1.47	1.36	11.08	0.01	0.33	252.30	
7 Moy	197.00	233.83	207.77	2.61	3.21	3.07	26.25	5.91	53.26	92.92	208.09	223.79	0.25	10.20	14943.43
SD	16.40	13.92	0.04	0.23	1.02	3.65	0.79	2.50	3.77	3.28	17.29	0.02	0.82	729.74	
9 Moy	301.00	259.81	209.94	2.63	3.12	6.18	34.00	4.80	52.09	90.58	203.13	245.52	0.25	10.76	15379.21
SD	13.21	11.10	0.02	0.18	0.97	2.63	0.32	0.92	1.81	1.68	13.56	0.02	0.39	330.01	
11 Moy	59.00	245.53	141.76	2.59	2.43	12.66	13.34	5.45	52.75	90.59	198.87	258.15	0.24	10.54	14989.29
SD	56.89	19.05	0.02	0.10	5.99	4.58	0.47	1.05	2.15	2.69	59.30	0.01	0.48	358.53	
3 Moy	436.00	292.99	226.97	2.64	3.08	8.12	35.90	5.22	52.68	91.52	197.96	307.12	0.25	10.59	15277.54
SD	20.95	14.38	0.03	0.16	1.97	2.85	0.62	2.09	3.39	2.34	24.18	0.02	0.74	637.43	
6 Moy	4.00	617.66	347.07	2.58	2.92	24.74	39.15	8.11	60.87	107.62	199.71	495.39	0.26	7.64	12970.02
SD	191.44	185.76	0.03	0.13	7.06	4.38	1.03	4.54	7.90	1.14	14.87	0.03	1.06	945.20	
2 Moy	165.00	240.33	208.48	2.54	3.01	3.88	27.09	6.08	61.72	110.20	206.65	237.79	0.27	7.24	12655.40
SD	33.57	26.99	0.07	0.20	1.67	4.69	0.83	5.07	7.79	6.38	40.00	0.03	1.06	1130.10	
5 Moy	40.00	214.78	181.98	2.38	2.70	4.03	25.86	4.86	59.40	98.83	209.58	217.68	0.21	8.09	12335.62
SD	32.99	26.61	0.21	0.35	2.12	5.32	0.66	6.64	9.08	7.29	40.51	0.05	1.50	1535.52	
8 Moy	3.00	239.38	200.02	1.28	1.92	4.88	34.29	4.13	54.70	92.71	211.67	236.14	0.21	4.85	7118.60
SD	12.43	4.70	0.10	0.24	1.46	1.01	0.13	2.33	6.00	2.09	4.08	0.10	0.58	519.05	
10 Moy	1.00	265.30	232.07	2.49	3.05	3.86	26.13	7.10	313.78	95.19	214.44	253.61	0.81	13.24	7450.38
SD	7.94	5.60	0.01	0.12	0.27	1.61	0.12	1.12.55	1.34	1.40	0.73	0.32	2.04	1133.52	

Tab 9 : Comparaison des moyennes et des écart-types par groupe de la CAH

N° Groupes	Long. m	NPHI	SP	MSFL	LLD	LLS	RGR
1 Moy	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SD		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 Moy	12.80	1.53	-26.84	665.11	13450.46	8745.29	245.67
SD		0.50	15.28	614.26	12632.49	7136.87	19.44
7 Moy	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SD		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9 Moy	5.60	1.28	-12.77	983.34	7074.93	6107.89	264.11
SD		0.33	9.61	798.26	9168.38	6378.23	13.14
11 Moy	55.70	0.89	-14.60	646.83	3375.56	2537.94	266.19
SD		0.39	14.36	660.24	5282.73	3444.61	57.10
3 Moy	408.60	2.74	-13.38	425.13	2620.78	1654.31	312.23
SD		2.44	15.32	611.36	5070.75	3273.25	23.47
6 Moy	3.90	10.94	-4.81	16.51	44.24	22.80	651.14
SD		1.63	3.27	5.70	9.87	4.86	253.36
2 Moy	37.47	11.22	-4.89	29.02	68.73	54.63	293.06
SD		3.47	4.90	109.18	130.69	135.12	38.43
5 Moy	1.00	21.95	2.44	1.50	7.30	4.04	254.33
SD		5.57	0.88	1.81	5.57	3.05	37.78
8 Moy	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SD		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10 Moy	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SD		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tab 10 : Comparaison des moyennes et des écart-types des groupes de la CAH (suite)

LOG of the GPK-1 borehole

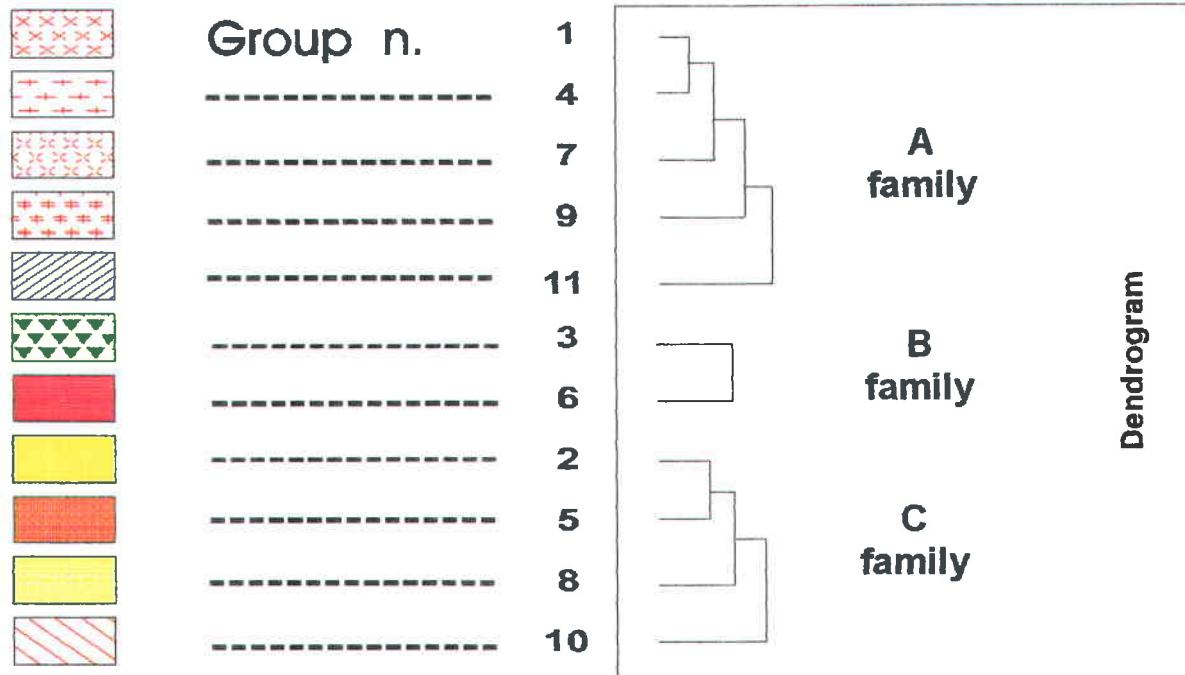
SOULTZ sous FORETS

e=1/1500

Patterns of the Petrographic Log

	GRAN	STANDARD PORPHYRITIC GRANITE
	MELA	BIOTITE-RICH GRANITE
	MFKR	K-Feldspar rich GRANITE
	HEMA	HEMATITISED BIOTITE PORPH. GRANITE
	PROP	PROPYLITISED BIOTITE PORPH. GRANITE
	LEG1	LEUCOGRANITE TYPE 1
	LEG2	LEUCOGRANITE TYPE 2
	HLOW	ALTERED GRANITE (LOW-GRADE)
	HMOD	ALTERED GRANITE (MODERATE-GRADE)
	HHIG	ALTERED GRANITE (HIGH-GRADE)
	HEXT	ALTERED GRANITE (VERY HIGH -GRADE)

Patterns for Cluster Analysis Groups



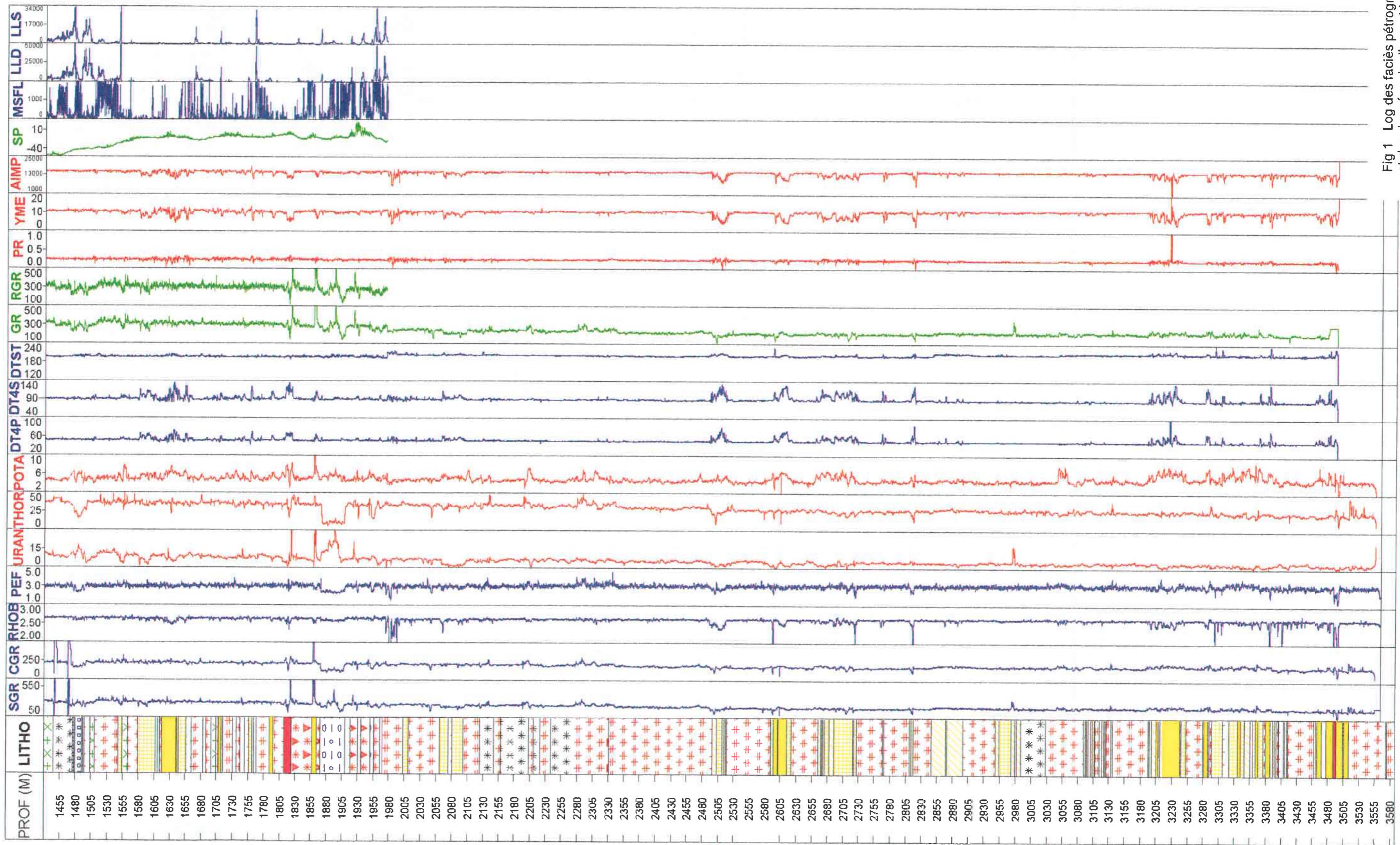


Fig 1 Log des facies pétrographiques et des données de diagraphies à 1/6000

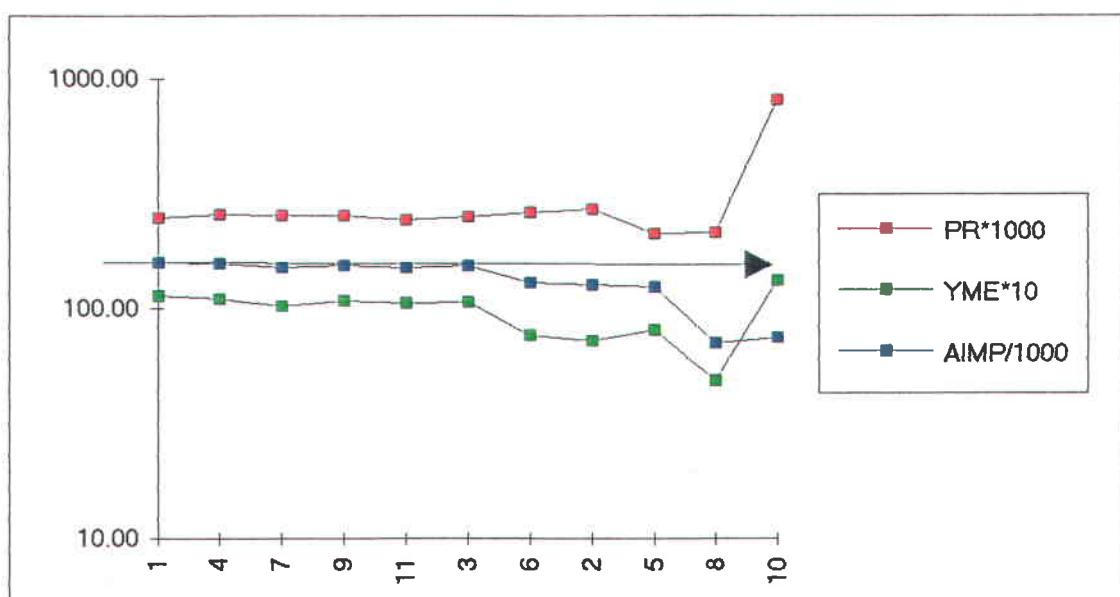
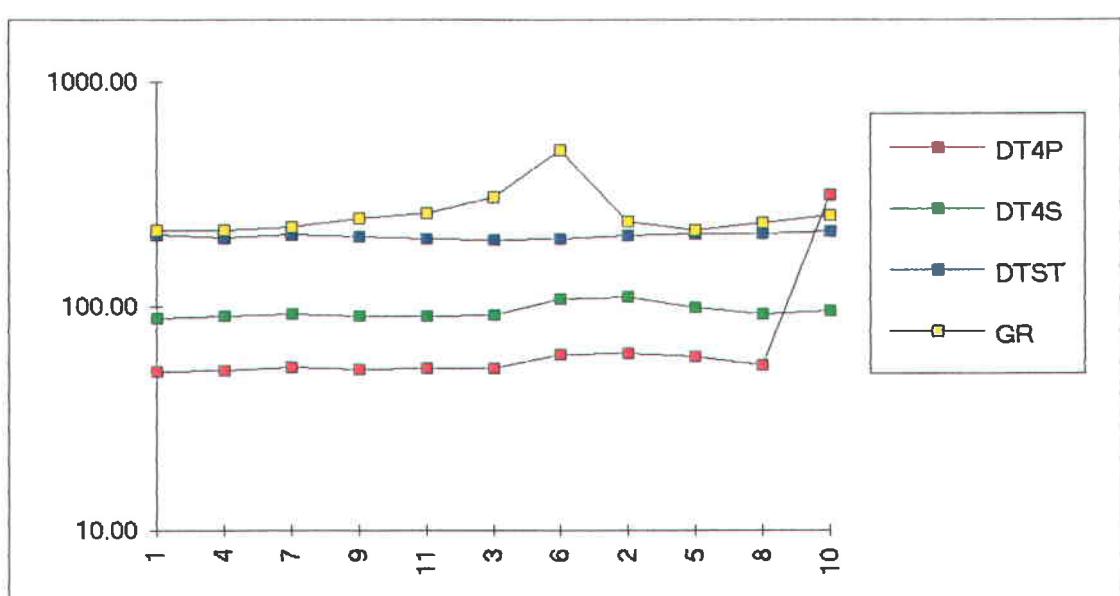
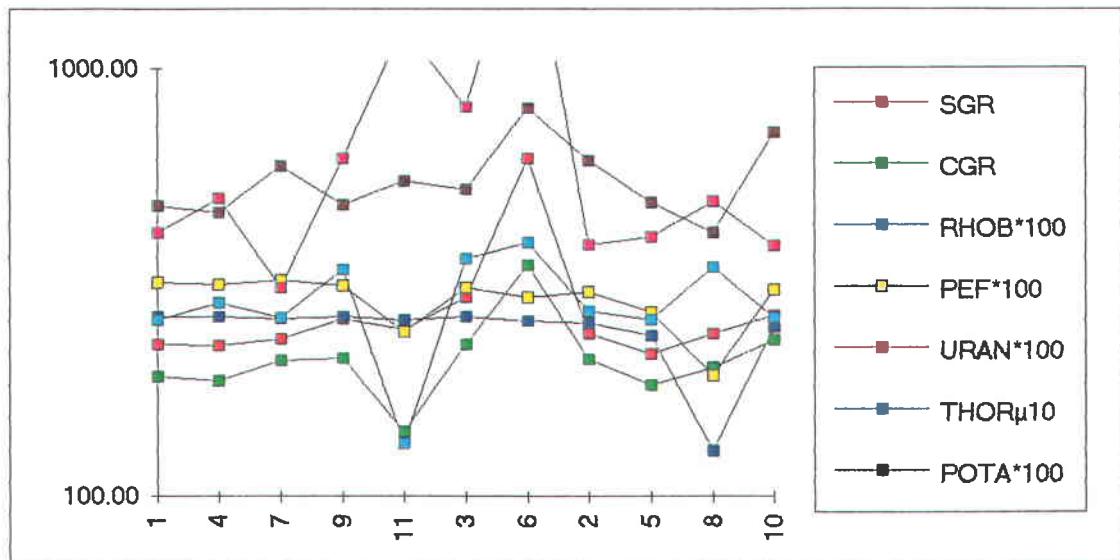


Fig 2 : visualisation des moyennes pour les groupes de la CAH

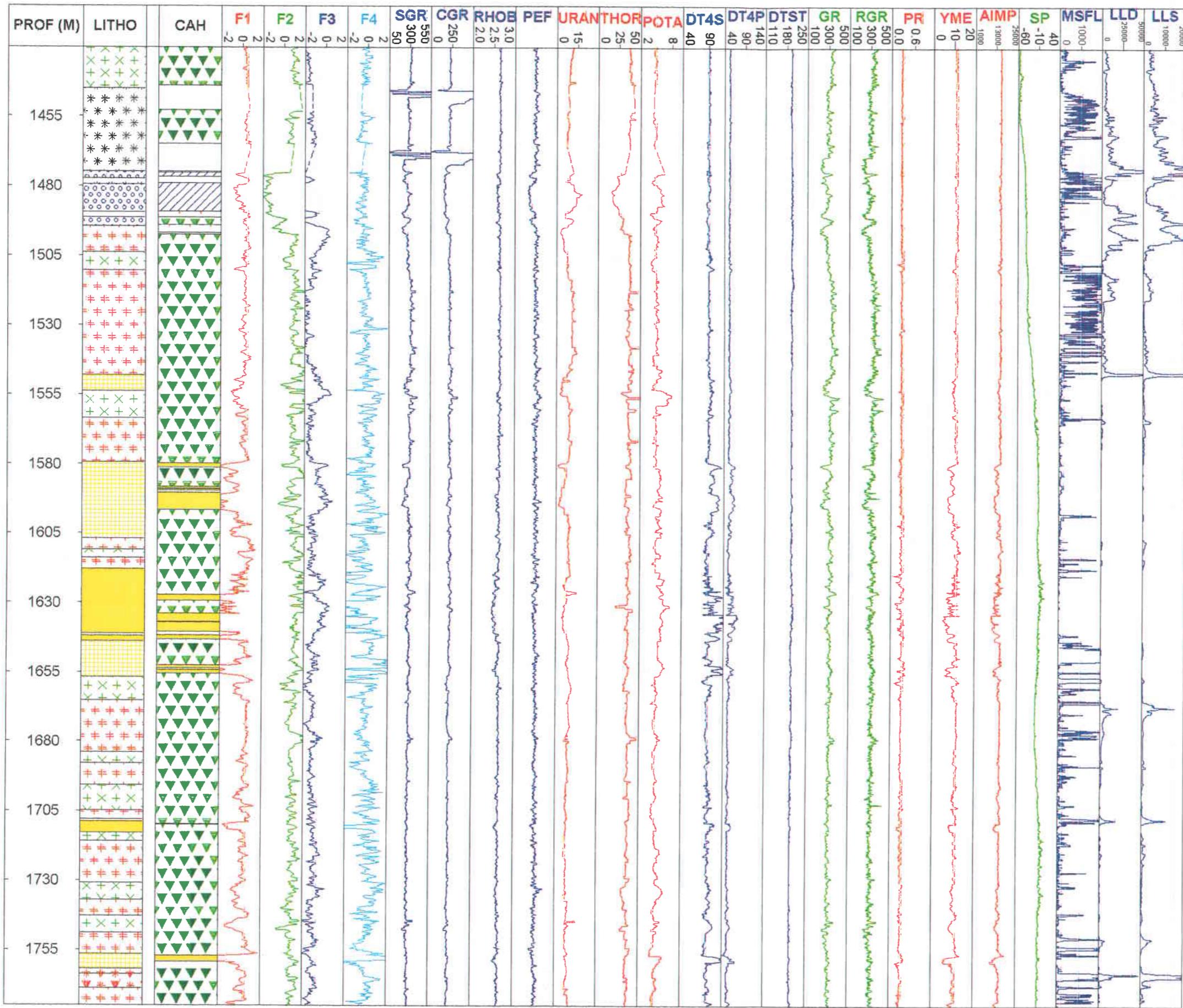


Fig 3 Log du sondage GPK1 à 1/1500

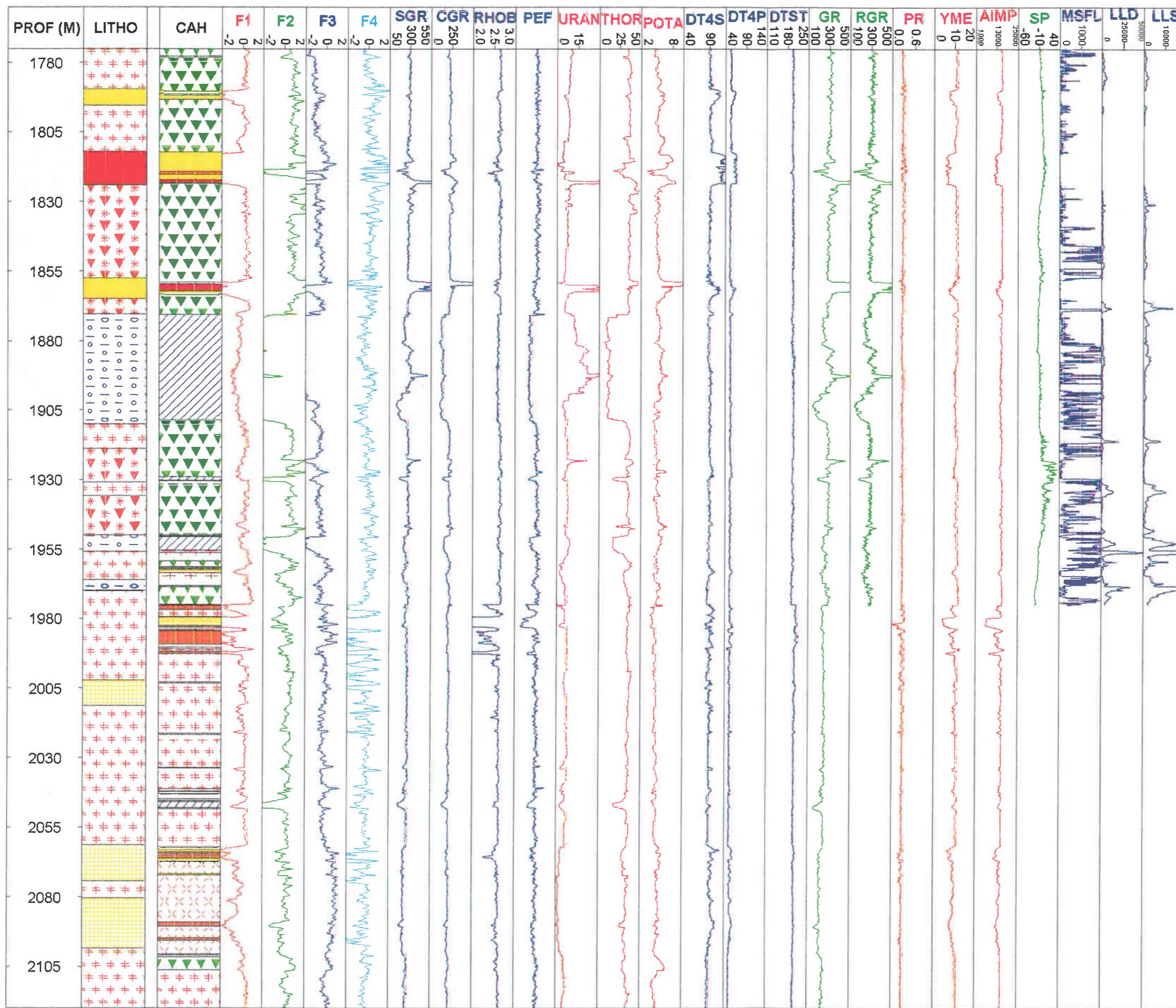


Fig. 3 (suite) Log du sondage GPK1 à 1/1500

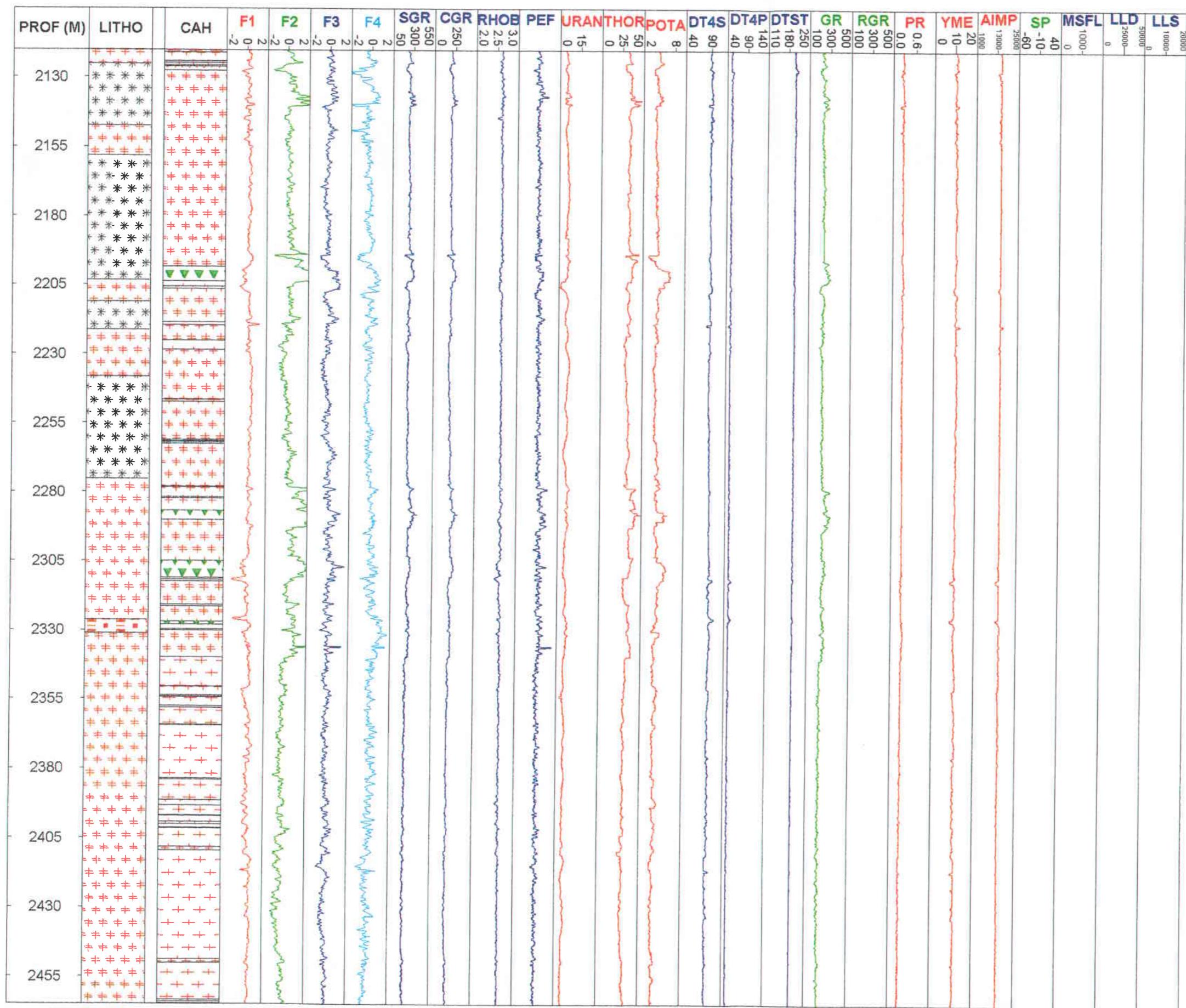


Fig 3 (suite) Log du sondage GPK1 à 1/1500

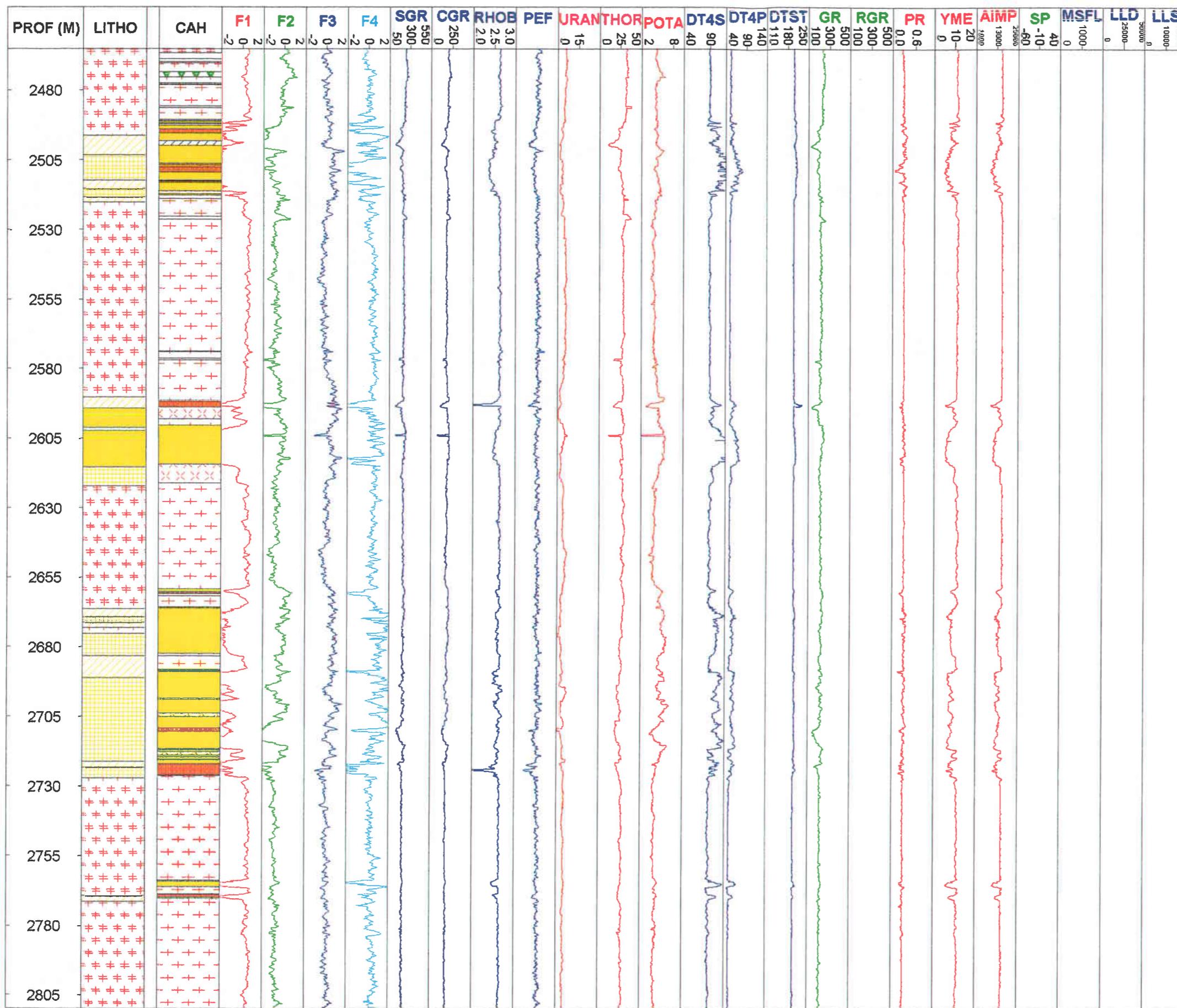


Fig 3 (suite) Log du sondage GPK1 à 1/1500

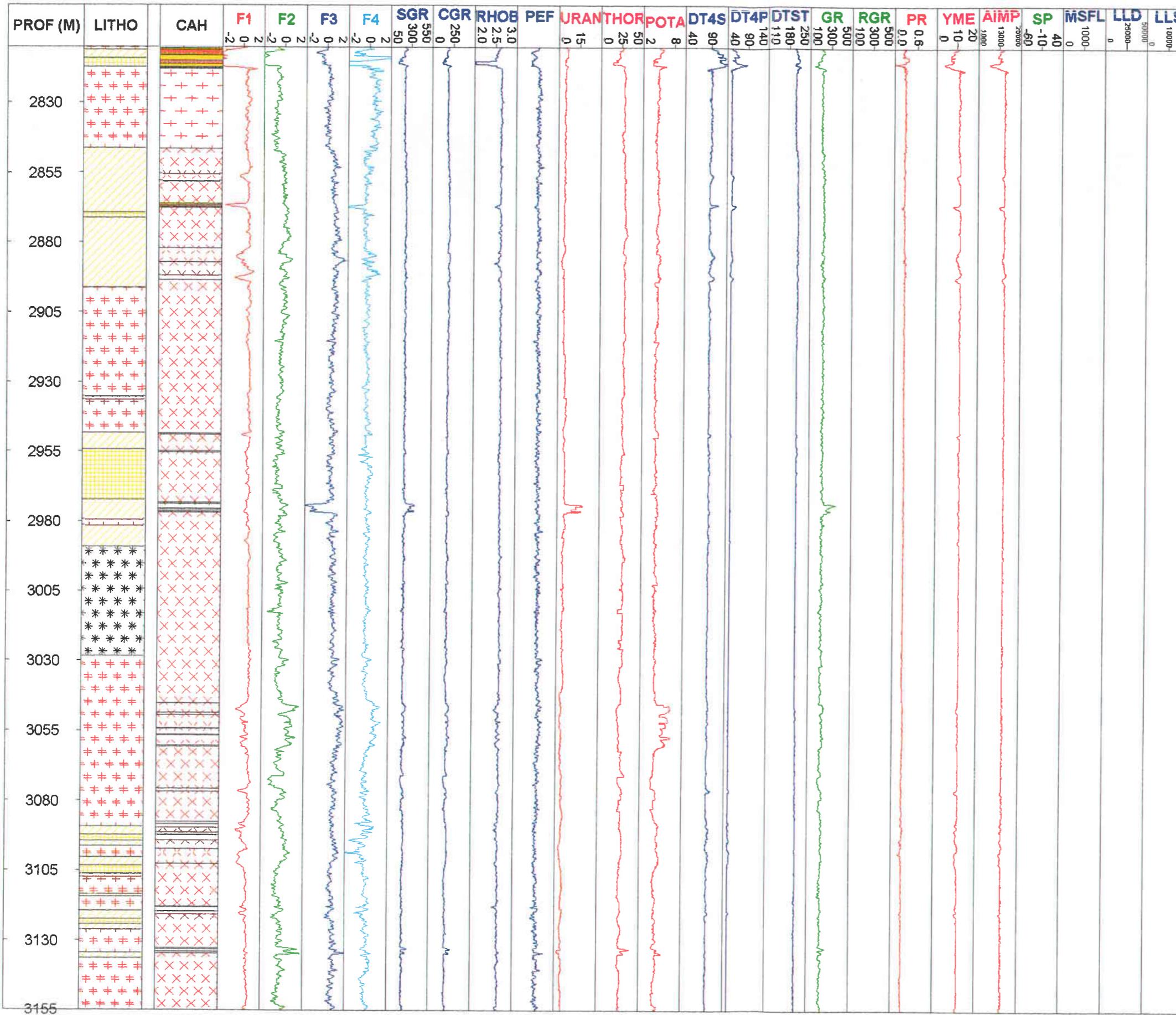


Fig 3 (suite) Log du sondage GPK1 à 1/1500

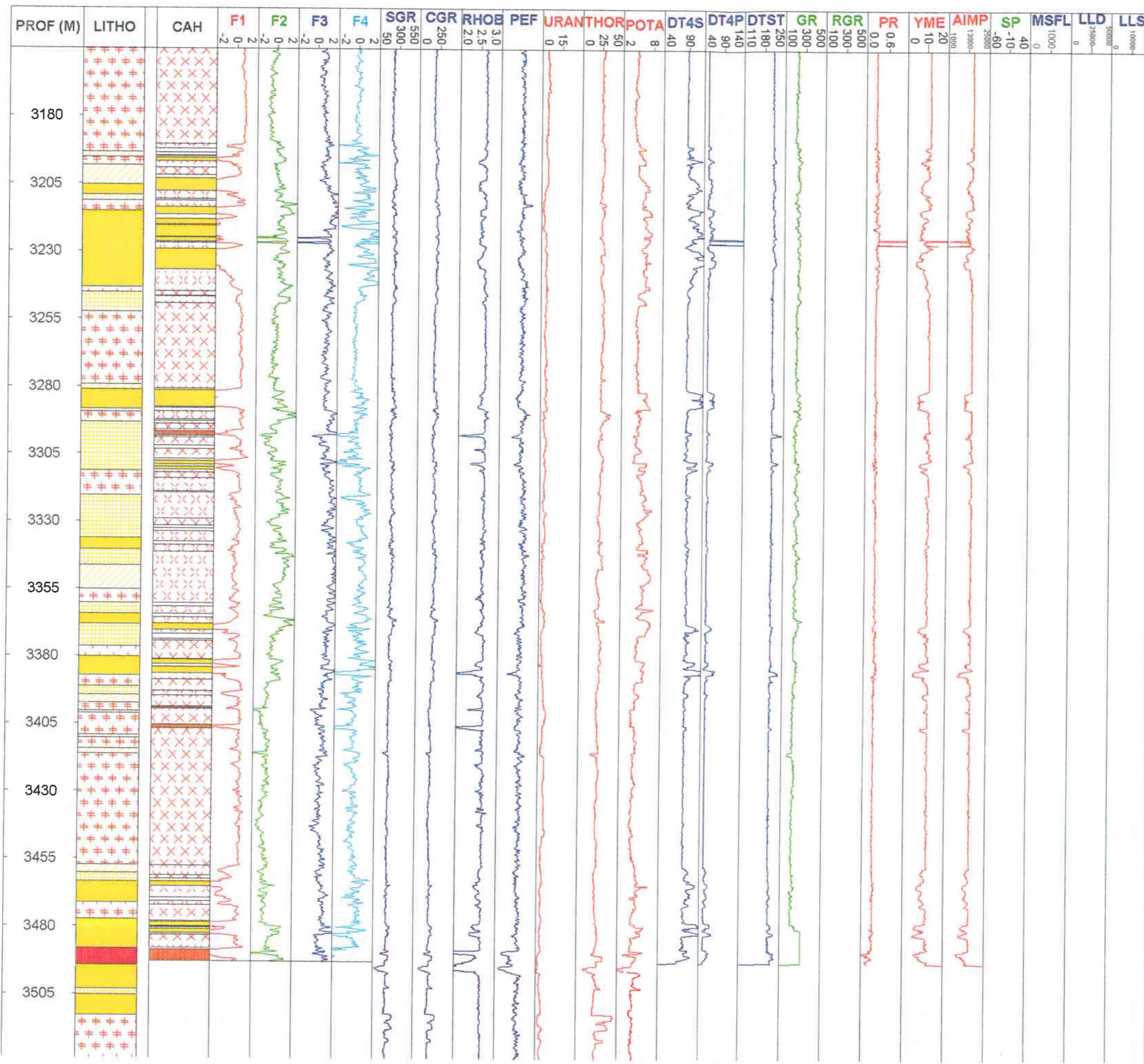


Fig 3 (suite) Log du sondage GPK1 à 1/1500

Appendix 4

Appendix 4: Lithological reconstruction of Well GPK2 from well logging data from Artignan (1996).

**SONDAGE GEOTHERMIQUE
GPK2 de SOULTZ sous FORETS**

**Elaboration d'un log lithologique
à partir des données de diagraphies**

D. ARTIGNAN

Décembre 1996

Note technique SMN/DEX/T2M 96 / 057

Etude réalisée par le Service Minier National / Département de l'Exploration
à la demande et sur financement de la Direction de la Recherche / Département GIG

□ Sommaire

1. Introduction

2. Présentation globale de l'information

- 2.1 les données de diagraphies
- 2.2 les données pétrographiques
- 2.3 log des données pétrographiques et de diagraphies
- 2.4 Conclusion : faciès pétrographiques et variables de diagraphies

3. Etudes des corrélations entre les différentes variables de diagraphies

Analyse factorielle sur la totalité du sondage

4. Définition des litho-faciès par mise en oeuvre de la CAH

- 4.1 Résultats de la CAH
- 4.2 Construction du log des groupes de la CAH

5. SYNTHESE des RESULTATS

- 5.1 entre 1420 et 2112 m : comparaison des faciès pétrographiques et des faciès CAH
- 5.2 entre 2112 et 3705 m : commentaires généraux
- 5.3 comparaison entre les faciès des sondages GPK1 et GPK2

6. CONCLUSION sur GPK1

□ Liste des tableaux

- Tab 1 Description et fluctuations des données de diagraphies
- Tab 2 Description des faciès pétrographiques
- Tab 3a Statistiques sur les données de diagraphies par faciès pétrographiques
- Tab 3b Statistiques sur les données de diagraphies par faciès pétrographiques
- Tab 4 Résultats de l'analyse factorielle sur la totalité du sondage
- Tab 5 Associations de variables mises en évidence par l'ACP sur la totalité du sondage
- Tab 6 Résultats de la CAH sur la totalité du sondage
- Tab 7 Tableau croisé des groupes "pétrographiques" et des groupes de la CAH
- Tab 8 Comparaison des moyennes des faciès CAH pour les sondages GPK1 et GPK2

□ Liste des figures

- Fig 1 Légende des logs
- Fig 2 Log des faciès pétrographiques et des données de diagraphies à 1/6500
- Fig 3 Visualisation des moyennes par groupe de la CAH
- Fig 4 Log du sondage GPK2 à 1/1500
- Fig 5 Log des familles de faciès A, B, C pour les sondages GPK1 et GPK2

1. Introduction

Le sondage GPK2 est situé sur la partie ouest du graben du Rhin sur la commune de Soultz-sous-Forêts (Alsace France) connue pour son gradient thermique inusuel bien établi par les nombreux sondages pétroliers du champs de Pechelbronn. Ce sondage a été réalisé dans le cadre du projet franco-germanique "Hot-Dry-Rock" (HDR) dont l'objectif est de tester les capacités d'utilisation à des fins géothermiques du socle granitique sous la couverture sédimentaire.

Stoppé à 3880 mètres de profondeur GPK2 a recoupé 2469 mètres de faciès granitiques sous 1411 mètres de couverture sédimentaire. La totalité du sondage a été réalisée en destructif ; par suite d'une non récupération des cuttings en dessous de 2110 m seuls les cuttings situés entre 1410 et 2110 m ont fait l'objet d'observations pétrographiques fines (A.Genter et H.Tenzer 1995). Des levés diagraphiques complets et sophistiqués ont été réalisés sur la totalité du sondage en contexte granitique avec des outils Schlumberger et de Western Atlas.

L'objectif de cette étude est de reconstituer par traitement statistique des données de diographies un log pétrographique, en particulier de détecter les faciès d'altération pour venir en appui aux observations faites sur cuttings et pour apporter un diagnostic là où ils n'ont pas pu être récupérés.

2. Présentation globale de l'information

2.1 les données de diographies

Les mesures ont été réalisées sur la totalité du sondage sous la couverture sédimentaire.

Au nombre de 20 ces variables appartiennent aux cinq types suivants :

Variable forage

PROF: profondeur en m

ROP: Rate of pénétration ou vitesse d'avancement en m/s

Variables acoustiques

DTCO: Lenteur (= 1/Vitesse) des ondes P en μ s/feet

DTSH: Lenteur (= 1/Vitesse) des ondes S en μ s/feet

DTST: Lenteur (= 1/Vitesse) des ondes de Stoneley en μ s/feet

POIS Coefficient de Poisson (pas d'unité)

VPVS: ratio entre les vitesses des Ondes P et S.

Variables diamètreur

CALI: Caliper moyen en inch (pouce). CALI = la moyenne entre CAL1+CAL2+ CAL3

CALC : Caliper défini en fin de paragraphe

CAL1: Caliper 1 (somme du rayon1 et rayon 4) en pouce

CAL2: Caliper 2 (somme du rayon2 et rayon 5) en pouce

CAL3: Caliper 3 (somme du rayon3 et rayon 6) en pouce

RAD1: Rayon 1 en pouce

RAD2: Rayon 2 en pouce

RAD3: Rayon 3 en pouce
 RAD4: Rayon 4 en pouce
 RAD5: Rayon 5 en pouce
 RAD6: Rayon 6 en pouce

Variables radioactives

GR: Gamma Ray ou radioactivité naturelle en GAPI (Giga API) Western Atlas

GR2: Gamma Ray ou radioactivité naturelle en GAPI (Giga API) Schlumberger outil UBI

Variable magnétique

FZ: Composante horizontale du champ magnétique terrestre en unité SI d'après l'imagerie UBI de Schlumberger

Leurs unités et leurs gammes de variation sont présentées Tab 1, tableau dans lequel ont été calculé pour chaque variable la valeur mini et maxi, la moyenne arithmétique, l'écart type, la moyenne géométrique et la déviation géométrique.

Var.	Unité	Longueur	Nombre mesures	Valeur min	Valeur max	Moy arithm	Ecart Type	Coeff variat	Moy géom	Dév géom
ROP	m/s	2278.3	22783	1.9	22.9	5.5	2.3	0.41	5.2	1.41
FZ	SI	2278.3	22783	-8.6	95.1	36.5	2	0.06	36.4	1.09
GR2	GAPI	2278.3	22783	124.9	486.4	234.6	25.7	0.11	323.9	1.11
GR	GAPI	2264.5	22645	127	510	243.1	26.6	0.11	241.3	1.12
CALI	Inch	2274.5	22745	5.8	12.3	8.3	1.3	0.15	8.2	1.18
DTCO	μs/feet	2276.9	22769	47.2	75.9	55.3	3.5	0.06	55.2	1.06
DTSH	μs/feet	2276.9	22769	84	134.4	93.2	7.1	0.08	92.8	1.07
DTST	μs/feet	2278.3	22783	186.1	217.4	196.3	5.5	0.03	196	1.03
POIS	-	2276.1	22761	0	0.4	0.2	0	0.13	0.2	1.15
VPVS	-	2276.1	22761	1.4	2.1	1.7	0.1	0.04	1.7	1.04
CAL1	Inch	2273.9	22739	5.8	12.6	8.4	1.3	0.16	8.2	1.18
CAL2	Inch	2273.9	22739	5.8	12.5	8.3	1.3	0.15	8.2	1.18
CAL3	Inch	2273.9	22739	5.7	12.6	8.4	1.3	0.15	8.3	1.18
RAD1	Inch	2273.9	22739	2.1	6.8	3.7	0.7	0.18	3.7	1.22
RAD2	Inch	2273.9	22739	1.5	6.9	3.9	0.7	0.18	3.9	1.23
RAD3	Inch	2273.9	22739	2.5	6.9	4.4	0.8	0.17	4.4	1.21
RAD4	Inch	2273.9	22739	2.8	7.2	4.6	0.8	0.17	4.6	1.19
RAD5	Inch	2273.9	22739	2.5	6.6	4	0.6	0.15	3.9	1.17
RAD6	Inch	2273.9	22739	2.5	6.5	3.9	0.6	0.15	3.9	1.17

Tab n° 1 : Paramètres statistiques élémentaires des variables de diagraphe
 mesurées sur GPK2 entre 1427.1 m et 3705.3 m

Nota : pour la suite des calculs statistiques nous avons introduit la variable CALC qui est la valeur de CAL1 corrigée du changement de diamètre de forage au delà de 3218m (cf § 2.3) pour ne prendre en compte que les variations de diamètre dues à la lithologie. On a donc CALC=CAL1 entre 0 et 3218m et CALC=CAL1+2.25 entre 3218 m et 3705 m.

2.2 les données pétrographiques

Ces données sont extraites des études pétrographiques sur cuttings publiées par A. Genter et H. Tenzer (1995).

Les 7 faciès pétrographiques définis correspondent à 3 faciès granitiques et quatre faciès de granites altérés décrits ci après avec la longueur cumulée de chacun d'eux sur toute la longueur du sondage soit entre 1410 m et 2110 m :

Code	Description pétrographique	Longueur renseignée (m)
GRAN	Standard porphyritic granite	218
MELA	Biotite-rich granite	81
MFKR	K-Feldspar rich Granite	15
HLOW	altered granite (low-grade)	128
HMOD	altered granite (moderate-grade)	117
HHIG	altered granite (high-grade)	107
HEXT	altered granite (very high-grade)	17

Tab 2 : description des faciès pétrographiques définis à partir de l'observation des cuttings.

2.3 log des données pétrographiques et de diagraphie

La visualisation de l'ensemble des données de base (diagraphie et pétrographie) a été réalisée Fig 2 à l'échelle de 1/ 6500 (voir légende Fig 1).

Elle permet d'avoir une vue d'ensemble de ces données, de leurs fluctuations et de leurs relations globales. Sans entrer dans le détail on notera qu'il existe une diminution régulière, une dérive vers le fond du sondage des variables nucléaires GR2 et GR qui peut être imputée à des modifications de lecture des sondes en relation avec l'augmentation de la température ou à un enrichissement en éléments radioactifs vers le toit du massif granitique. Ce point avait déjà été noté sur le sondage GPK1.

Par ailleurs on notera le changement de diamètre de forage à 3218 m de profondeur avec passage de 8-1/2 " à 6-1/4".

2.4 Conclusion : faciès pétrographiques et variables de diographies

Enfin et à titre indicatif les moyennes arithmétiques, les écart-types et les longueurs cumulées de mesure des variables de diographies pour chacun des faciès pétrographiques sont présentés Tab 3a et Tab 3b pour toutes les variables.

On en retiendra les valeurs moyennes du faciès GRAN le plus représenté comme valeurs de références, et on notera par rapport à ces dernières les fortes fluctuations en de nombreuses variables en relation avec les phénomènes d'altération.

LITHOLOGIE	L.cumul.	ROP	FZ	GR2	GR	CALI	DTCO	DTSH	DTST	POIS	VPVS
GRAN moy	218.0	4.58	37.68	262.77	271.91	9.16	55.21	92.93	191.34	0.225	1.68
SD		1.96	0.45	20.64	22.75	0.43	1.43	3.93	1.28	0.020	0.05
MELA moy	81.0	4.38	37.32	261.08	271.72	8.79	54.89	92.44	191.77	0.226	1.68
SD		0.78	0.18	11.66	9.51	0.31	1.42	3.65	1.41	0.020	0.04
MFKR moy	15.0	5.65	38.10	252.32	265.95	9.91	55.39	95.24	190.60	0.242	1.72
SD		0.72	0.04	15.39	14.70	0.31	0.90	3.65	0.94	0.020	0.05
HLOW moy	128.0	5.74	37.72	256.06	265.95	9.36	55.67	95.79	191.07	0.234	1.70
SD		1.75	0.42	13.96	13.98	0.61	1.67	5.03	1.37	0.030	0.06
HMOD moy	117.0	5.52	37.56	259.70	270.40	9.51	56.26	96.23	191.21	0.237	1.71
SD		1.54	0.24	20.98	19.29	0.67	2.92	6.68	1.44	0.030	0.07
HHIG moy	107.0	7.06	36.96	261.45	269.46	9.68	58.17	99.99	191.56	0.240	1.72
SD		3.36	8.13	20.06	23.18	0.80	5.09	10.99	1.95	0.030	0.07
HEXT moy	17.0	6.09	37.36	258.30	269.64	8.99	54.94	93.73	192.86	0.236	1.71
SD		3.34	0.56	25.29	15.80	0.54	1.49	4.26	1.91	0.020	0.05

Tab 3a : Comparaison des moyennes et des écart-types par faciès pétrographique

LITHOLOGIE	L.cumul.	CALI	CAL1	CAL2	CAL3	RAD1	RAD2	RAD3	RAD4	RAD5	RAD6
GRAN moy	218.0	9.16	9.13	9.11	9.23	4.12	4.35	4.87	5.02	4.36	4.31
SD		0.43	0.58	0.59	0.49	0.41	0.31	0.38	0.42	0.36	0.36
MELA moy	81.0	8.79	8.79	8.67	8.92	3.92	4.20	4.78	4.87	4.14	4.09
SD		0.31	0.37	0.24	0.40	0.38	0.29	0.35	0.36	0.31	0.31
MFKR moy	15.0	9.91	10.99	9.37	9.36	5.01	4.28	4.99	5.99	4.37	4.32
SD		0.31	0.51	0.48	0.19	0.24	0.26	0.18	0.36	0.22	0.22
HLOW moy	128.0	9.36	9.58	9.20	9.29	4.36	4.42	4.84	5.22	4.45	4.40
SD		0.61	1.02	0.58	0.53	0.50	0.35	0.40	0.69	0.37	0.37
HMOD moy	117.0	9.51	9.53	9.47	9.54	4.15	4.36	5.03	5.37	4.52	4.47
SD		0.67	0.91	0.86	0.70	0.47	0.39	0.63	0.64	0.49	0.49
HHIG moy	107.0	9.68	9.78	9.69	9.58	4.32	4.49	5.04	5.46	4.54	4.49
SD		0.80	0.98	0.95	0.72	0.62	0.43	0.42	0.69	0.52	0.52
HEXT moy	17.0	8.99	9.06	8.83	9.06	3.86	4.16	4.93	5.20	4.13	4.08
SD		0.54	0.71	0.64	0.50	0.53	0.34	0.34	0.45	0.41	0.41

Tab 3b : Comparaison des moyennes et des écart-types par faciès pétrographique

3. Etude des corrélations des différentes variables de diagraphies par ACP

L'étude des corrélations entre variables a été réalisée par la mise en oeuvre d'une analyse factorielle en composantes principales (ACP). Ce programme statistique permet de définir les associations de variables de diagraphies qui ont les mêmes fluctuations dans les populations étudiées ; en regroupant ces variables de diagraphies qui varient simultanément en fonction du contexte géologique l'ACP permet d'extraire l'information majeure et simplifiée de l'information totale supportée par chacune de ces vingt variables, information qui est difficilement accessible du fait de sa complexité.

10 variables ont été prises en compte pour la réalisation de l'ACP mise en oeuvre sur valeurs naturelles avec rotation des facteurs selon le critère Varimax. Parmi les variables géométriques (diamètreur) nous n'avons retenu que la variable CALC, les autres lui étant directement corrélées. Les résultats de cette analyse présentés Tab 4 montrent que l'information globale s'organise autour de cinq axes majeurs qui caractérisent les associations de variables résumées Tab 5 .

Axe	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Valeur propre	2.48	1.90	2.24	1.00	1.42
Pourcentage	24.80	19.00	22.40	10.00	14.20

GR2	0.10	-0.93	0.10	0.10	-0.16
GR	0.07	-0.92	0.04	0.12	-0.22
ROP	0.77	-0.03	0.09	0.05	0.07
FZ	-0.05	-0.18	0.07	0.97	-0.07
CALC	0.48	-0.25	0.22	0.10	-0.72
DTCO	0.93	-0.08	-0.07	-0.09	-0.11
DTSH	0.85	-0.09	0.43	-0.06	-0.09
DTST	0.12	0.25	0.20	-0.03	0.89
POIS	0.10	-0.08	0.98	0.05	0.04
VPVS	0.14	-0.06	0.98	0.05	0.04

Tab 4 : Résultats de l'Analyse factorielle en composantes principales après rotation des axes (traitements sur valeurs naturelles)

Axe	Variables corrélées
1>0	ROP, DTCO, DTSH
2<0	GR2, GR
3>0	POIS, VPVS
4>0	FZ
5>0	DTST
5<0	CALI

Tab. 5 Associations de variables mises en évidence par l'ACP

On en retiendra une forte corrélation entre les variables POIS et VPVS ainsi qu'entre les variables GR2 et GR. Par ailleurs on notera

- une opposition (anticorrélation) entre CALI et DTST.

- une indépendance de la variable FZ

- une corrélation entre la vitesse d'avancement et les variables DTCO et DTSH.

Une image des variations locales de l'intensité des associations de variables de diagraphies données par les facteurs 1-3-5 (de l'intensité de ces diverses corrélations) est donnée sur le Log Fig 4 par le report des facteurs scores des trois axes retenus.

On remarque globalement que les fluctuations de l'intensité de ces associations se font en fonction de l'intensité et du type d'altération des faciès granitique. L'étude ci après sera plus claire à ce sujet.

4. Définition des litho-faciès par mise en oeuvre de la CAH.

L'objectif de la démarche entreprise dans ce paragraphe est de déterminer par analyse statistique multivariée les groupes de passes de sondage qui ont les mêmes caractéristiques de diagraphies selon la méthodologie utilisée pour la sondage EPS 1 (D. Artignan, 1994) et GPK1 (D. Artignan, 1996).

Le programme de Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) permet de définir ces groupes de passes à partir de leurs caractéristiques de diagraphies et d'affecter à chacune d'elles un code . Sachant que les mesures de diagraphies varient en fonction du contexte géologique et de façon significative, on peut supposer que ces groupes correspondent à des faciès lithologiques. Leur cartographie le long de l'axe du sondage permet alors de construire un log lithologique issu de l'information géophysique que l'on confrontera au log lithologique issu de l'information pétrographique.

4.1 Résultats de la CAH

La CAH a été mise en oeuvre sur 9 variables de diagraphies (ROP,DTSH,CALC,VPVS,DTCO,DTST,POIS,GR2,FZ) en valeurs naturelles et sur la totalité du sondage. Parmi les différentes solutions proposées la classification automatique en 10 groupes de passes a été retenue.

Le dendrogramme de la CAH dessiné sur le cartouche de la Fig 1 illustre les relations entre ces 10 groupes (leur degré de ressemblance).

Les caractéristiques géophysiques de chacun de ces 10 groupes sont présentées par leurs moyennes arithmétiques et les écart-types, d'une part Tab 6 et Fig 3 pour l'ensemble des variables de diagraphies sur la totalité du sondage.

N°Groupes	L.cumul.	ROP	FZ	GR2	GR	DTCO	DTSH	DTST	POIS	VPVS	CALC
1 Moy	319.04	4.37	37.36	259.90	270.68	54.69	90.54	191.71	0.21	1.66	8.85
SD		0.91	0.40	11.85	13.04	0.70	1.31	1.51	0.01	0.03	0.24
5 Moy	335.84	5.45	37.47	258.04	267.26	55.21	94.67	192.35	0.24	1.71	9.28
SD		1.59	0.56	24.52	23.16	1.22	2.87	2.41	0.02	0.04	0.46
2 Moy	465.92	5.64	36.31	229.91	239.44	54.99	91.68	196.23	0.22	1.67	8.70
SD		1.17	0.60	15.04	16.43	1.88	3.98	3.79	0.02	0.03	0.20
6 Moy	497.44	4.98	35.49	213.63	223.39	55.07	89.27	195.35	0.19	1.62	8.57
SD		1.35	0.56	8.67	9.21	1.69	1.99	2.37	0.02	0.03	0.29
10 Moy	366.56	4.30	36.46	218.41	222.67	51.94	89.63	204.60	0.25	1.73	8.24
SD		1.30	0.77	23.27	24.00	1.16	2.44	3.03	0.02	0.04	0.11
3 Moy	67.52	10.29	35.54	226.25	232.67	58.14	105.99	198.81	0.28	1.82	9.04
SD		3.20	0.74	16.91	16.31	3.87	8.96	5.99	0.03	0.08	0.45
7 Moy	99.04	9.68	35.97	238.26	243.69	66.06	112.31	203.58	0.23	1.70	8.99
SD		3.72	0.95	24.21	23.39	3.65	6.61	7.25	0.02	0.05	0.53
9 Moy	6.72	10.43	15.01	275.62	262.26	69.87	124.81	195.20	0.27	1.79	10.73
SD		2.63	10.73	11.27	45.37	3.86	5.17	2.11	0.02	0.06	1.01
4 Moy	113.28	7.79	38.25	256.95	265.11	59.15	104.53	190.91	0.26	1.77	10.30
SD		3.06	1.46	19.55	22.83	3.75	5.84	1.58	0.02	0.06	0.35
8 Moy	0.96	12.22	89.67	279.56	287.97	69.38	127.22	195.31	0.29	1.83	10.68
SD		0.02	7.53	7.48	5.59	1.62	0.66	0.41	0.02	0.05	0.07

Tab 6 : Comparaison des moyennes et des écart-types par groupe de la CAH (GPK2)

La lecture du Tab 6 et de la Fig 3 permet de faire les remarques suivantes :

a) les groupes 1-5-2-6-10 se caractérisent par des variables soniques, des vitesses d'avancement et des diamètres assez stables et homogènes sur les longueurs les plus grandes. C'est la radioactivité qui les différencie.

On peut donc penser qu'il s'agit des différents faciès granitiques non altérés.

b) les groupes 3-7-9-4-8 se caractérisent par des variables soniques , des vitesses d'avancement et des diamètres bien supérieurs à ceux des groupes de a) et non réguliers. La radioactivité participe nettement à leur différentiation en croissant fortement du groupe 3 au groupe 8.

Ces groupes caractérisent à coup sûr les faciès d'altération.

4.2 Construction du log des groupes de la CAH

A chaque passe de sondage la CAH ayant affecté un code correspondant à l'un des 10 groupes définis, le dessin d'un figuré caractéristique de chacun de ces groupes en chaque passe permet de construire le log géophysique Fig 4 de même type que le log des faciès pétrographiques et d'en faire la comparaison.

5. SYNTHESE DES RESULTATS

A titre de conclusion et de document de synthèse de l'information ont été reportés à l'échelle du 1/1500 Fig 3 sur toute la longueur du sondage GPK2 les données d'observation pétrographiques , les données brutes de diagraphe mais aussi les résultats de l'ACP et de la CAH. Ces documents permettent de visualiser et de constater que :

5.1 Entre 1420 et 2110 m : comparaison entre les faciès pétrographiques et les faciès CAH.

C'est la partie supérieure du sondage pour laquelle on dispose d'observations pétrographiques sur les cuttings.

La comparaison des faciès sur le log montre une bonne corrélation d'ensemble entre les faciès observés et les faciès définis par analyse statistique sur les données de diagraphe. Cette comparaison est aussi approchée à partir du Tab 7 qui donne en % le nombre de passes communes entre les groupes pétrographiques et CAH.

Nb passes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
GRAN	43.12%	23.64%	0.00%	10.95%	33.93%	0.00%	12.00%	0.00%	0.00%	0.00%
MELA	16.99%	30.91%	0.00%	0.85%	10.10%	50.00%	28.00%	0.00%	0.00%	0.00%
MFKR	0.27%	0.00%	0.00%	3.56%	4.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
HLOW	15.43%	5.45%	0.00%	24.89%	20.39%	50.00%	20.00%	0.00%	0.00%	0.00%
HMOD	13.33%	0.00%	0.00%	27.31%	17.28%	0.00%	28.00%	0.00%	4.76%	0.00%
HHIG	10.32%	27.27%	0.00%	32.43%	12.33%	0.00%	12.00%	100.00%	95.24%	0.00%
HEXT	0.43%	12.73%	100.00%	0.00%	1.91%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%

Tab 7 : Croisement des faciès pétrographiques et des groupes CAH

On peut ainsi constater que :

- il y a des divergences locales sur la présence ou pas d'altération mais pas sur de grandes longueurs. Il y a généralement convergence de faciès.
- Les groupes 1-5 correspondent au faciès GRAN dans lequel ils apportent des nuances.
- Les groupes 2-6 correspondent à des faciès de granite mélanocrate
- Le groupe 3 correspond au faciès de forte altération noté HEXT
- les groupes 7-9-4-8 correspondent aux faciès d'altération
- Le groupe 10 n'est pas présent dans cette partie du sondage

5.2 entre 2112 et 3705 m

Les faciès CAH présents dans cette partie du sondage sont peu représentés dans la partie supérieure. On a donc peu de passes où l'on peut comparer les faciès pétrographiques et CAH, aucune pour le groupe 10.

On notera que :

- le granite a en grande majorité les caractéristiques des faciès mélano-crates (groupes 2-6 et MELA)
- sans trop de mélange ces faciès de granite s'organisent en deux unités avec du haut vers le bas le faciès 2 puis le faciès 6 .
- le faciès 10 constitue la base du sondage mais nous n'en avons aucune description pétrographique.
- les altérations sont moins diffuses et plus intenses

5.3 Comparaison entre les faciès de GPK1 et GPK2.

De façon à consolider l'interprétation des faciès CAH de GPK2 en particulier dans la partie où aucune observation pétrographique n'a pu être réalisée nous avons tenté de comparer les informations de ces deux sondages sachant que le sondage GPK1 a été l'objet de description pétrographique sur la totalité de sa longueur. Cette comparaison n'a pu être effectuée avec la sondage EPS1 car aucune variable de diagraphie n'est commune avec celles des deux autres sondages.

Il existe 6 variables de diographies communes entre les deux sondages considérés : GR-DTCO-DTSH-POIS (ou PR)-VPVS-DTST. Pour chacun de ces deux sondages nous avons rassemblé Tab 8 les moyennes de chacune de ces 6 variables calculées pour chacun des groupes CAH tels que définis pour chacun des sondages (étude ci dessus et étude réalisée dans la note D. Artignan d'avril1996).

Sondage	Groupe CAH	GR	DTCO	DTSH	PR	VPVS	DTST
GPK1	1	218.37	51.09	88.35	0.25	1.73	208.43
GPK1	2	237.79	61.74	110.23	0.27	1.79	206.65
GPK1	3	307.12	52.70	91.54	0.25	1.74	197.96
GPK1	4	217.34	51.55	90.15	0.26	1.75	201.16
GPK1	5	217.68	59.42	98.86	0.21	1.67	209.58
GPK1	6	495.39	60.88	107.65	0.26	1.77	199.71
GPK1	7	223.79	53.28	92.94	0.25	1.75	208.09
GPK1	8	236.14	54.72	92.73	0.21	1.70	211.67
GPK1	9	245.52	52.11	90.60	0.25	1.74	203.13
GPK1	10	253.61	313.86	95.22	0.81	0.33	214.44
GPK1	11	258.15	52.76	90.61	0.24	1.72	198.87
GPK2	1	270.68	54.68	90.54	0.21	1.66	191.71
GPK2	2	239.44	54.99	91.68	0.22	1.67	196.24
GPK2	3	232.67	58.14	105.99	0.28	1.82	198.81
GPK2	4	265.11	59.15	104.53	0.26	1.77	190.91
GPK2	5	267.26	55.22	94.68	0.24	1.71	192.33
GPK2	6	223.39	55.07	89.28	0.19	1.62	195.34
GPK2	7	243.69	66.06	112.31	0.23	1.70	203.58
GPK2	8	287.97	69.38	127.22	0.29	1.83	195.31
GPK2	9	262.26	69.87	124.81	0.27	1.79	195.20
GPK2	10	222.67	51.94	89.63	0.25	1.73	204.61

** forte valeur (erreur de mesure ??) sur seulement quelques mesures

Tab 8 : Comparaison des moyennes des variables communes aux sondages GPK1 et GPK2 pour les groupes CAH.

De façon à comparer ces 21 groupes il a été réalisé une classification automatique sur les données du Tab 8 qui donne en fonction du degré de similarité les regroupements suivants en trois grandes familles :

- la famille A qui regroupe les faciès d'altération forte avec les groupes 2 et 6 de GPK1, et les groupes 7-3-8-9 de GPK2
- la famille B qui constitue un premier ensemble de faciès granitiques avec les groupes 11 et 3 de GPK1, et 1-5-2-6-4 de GPK2
- la famille C qui constitue un deuxième ensemble de faciès granitiques plus ou moins altérés avec les groupes 9-4-8-5-1-7 de GPK1, et 10 de GPK2

On notera que le faciès 10 de GPK2 pour lequel on n'avait pas d'élément pétrographique de comparaison apparaît comme très similaire aux faciès granitiques de la partie inférieure de GPK1. Cependant l'apparition de ce faciès 10 de GPK2 correspond au changement de diamètre (8 1/2 à 6 1/4), ce qui peut avoir influencer les mesures de diagraphies et donc les regroupements CAH. De même le changement de pétrographie dans GPK1 correspond à un changement de lots de diagraphies (1980m).

La régionalisation de ces trois grandes familles de faciès Fig 5 montre clairement la localisation des grandes zones d'altération et la relation des grandes unités granitiques avec dans la partie supérieure des deux sondages les faciès de la famille B et dans leur partie inférieure les faciès granitiques de la famille C.

6. CONCLUSION

En conclusion on peut retenir que l'ACP et la CAH sont deux outils statistiques multivariés dont la mise en oeuvre sur une base de donnée aussi riche que celle des données de diagraphies du sondage GPK2 de Soultz sous Forêts permet d'extraire l'information majeure et d'apporter une aide précieuse pour :

- reconstituer un log lithologique relativement complet en permettant de différencier quatre grands domaines granitiques dont deux importants mélanocrates. Cette reconstitution est particulièrement intéressante dans la partie inférieure du sondage là où aucune observation pétrographique n'a pu être effectuée. De plus la comparaison des données de diagraphie entre les sondages GPK1 et GPK2 a permis de montrer la similarité de certains faciès de ces sondages et donc d'avancer des hypothèses quant à la nature pétrographique de faciès non observés de la base du sondage GPK1. Enfin cette comparaison démontre l'existence de dérives entre les différents lots de diagraphies, parfaitement détectées par l'approche statistique, dérives qui rendent très délicates les interprétations ainsi que les corrélations inter sondages.
- tracer les zones d'altérations sans divergence majeure par rapport à l'observation pétrographique directe ce qui est un apport particulièrement important dans le cas où les cuttings n'ont pu être récupérés.

Bibliographie

- H. Trainea, A. Genter, J.P. Cautru, H. Fabriol, P. Chevremont (1991). Petrography of the granite massif from drill cutting analysis and well log interpretation in the geothermal HDR borehole GPK1 (Soultz, Alsace, France). Geotherm. Sci & Tech; 1991 Volume 3(1-4) pp.1-29
- A. Genter and H. Trainea (1993). Deepening of GPK1 HDR borehole 2000-3600 m (Soultz-sous-Forêts, France). Rapport BRGM R36611
- D. Artignan (1994). Sondage géothermique EPS1 de Soultz-sous-Forêts : reconstitution du log lithologique à partir des données de diagraphies. Note technique BRGM / DEP/DEX/T2M/93035
- D. Artignan (1996). Sondage géothermique GPK1 de Soultz-sous-Forêts : Elaboration d'un log lithologique à partir des données de diagraphies. Note technique BRGM / SMN/DEX/T2M/96014
- A. Genter et H. Tenzer (1995). Geological monitoring of GPK2 HDR borehole, 1420-3880 m (Soultz-sous-Forêts, France) Rapport BRGM R 38629

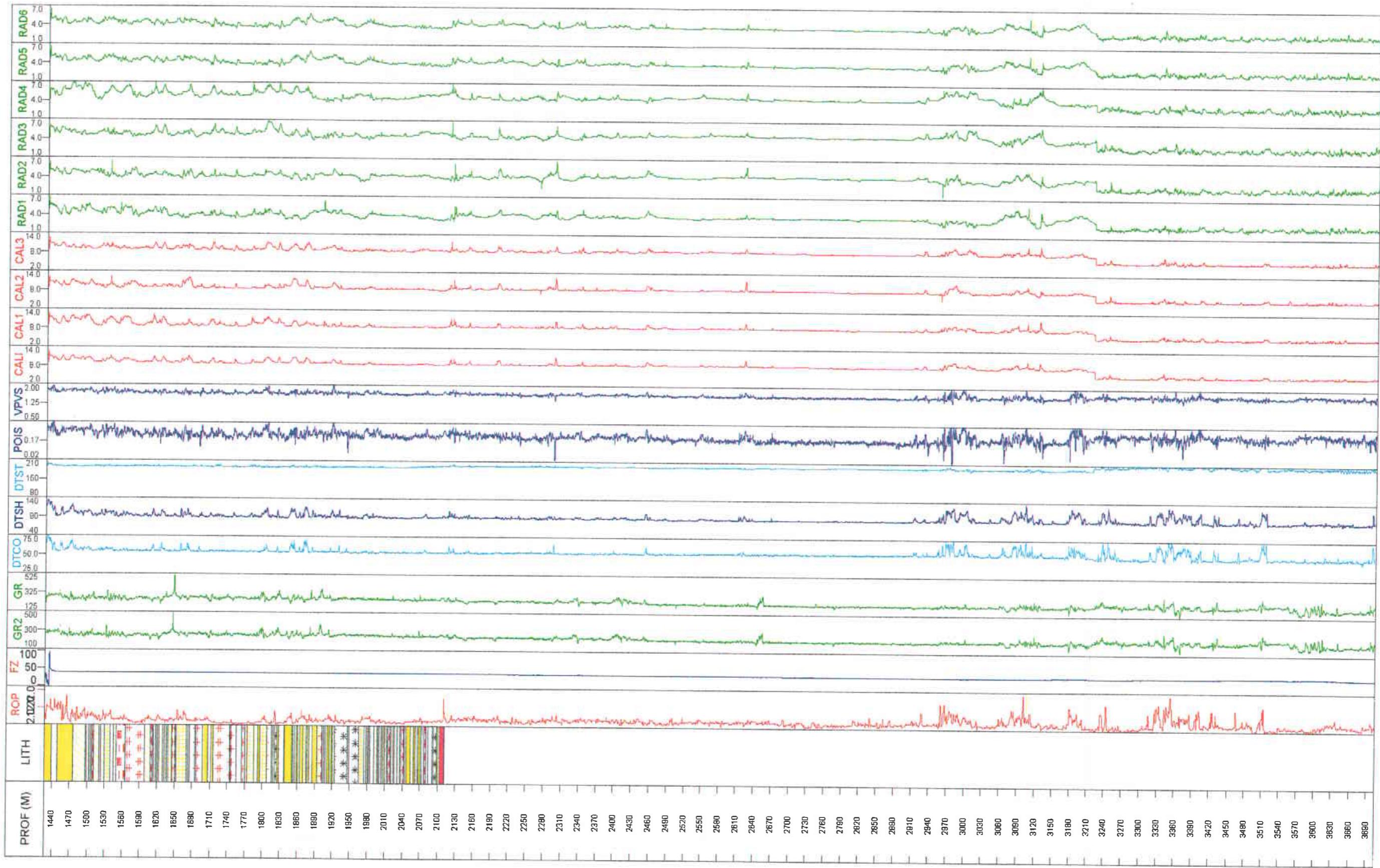


Fig 2 : Log des facies pétrographiques et des données de diagraphies à 1/6500

GPK2

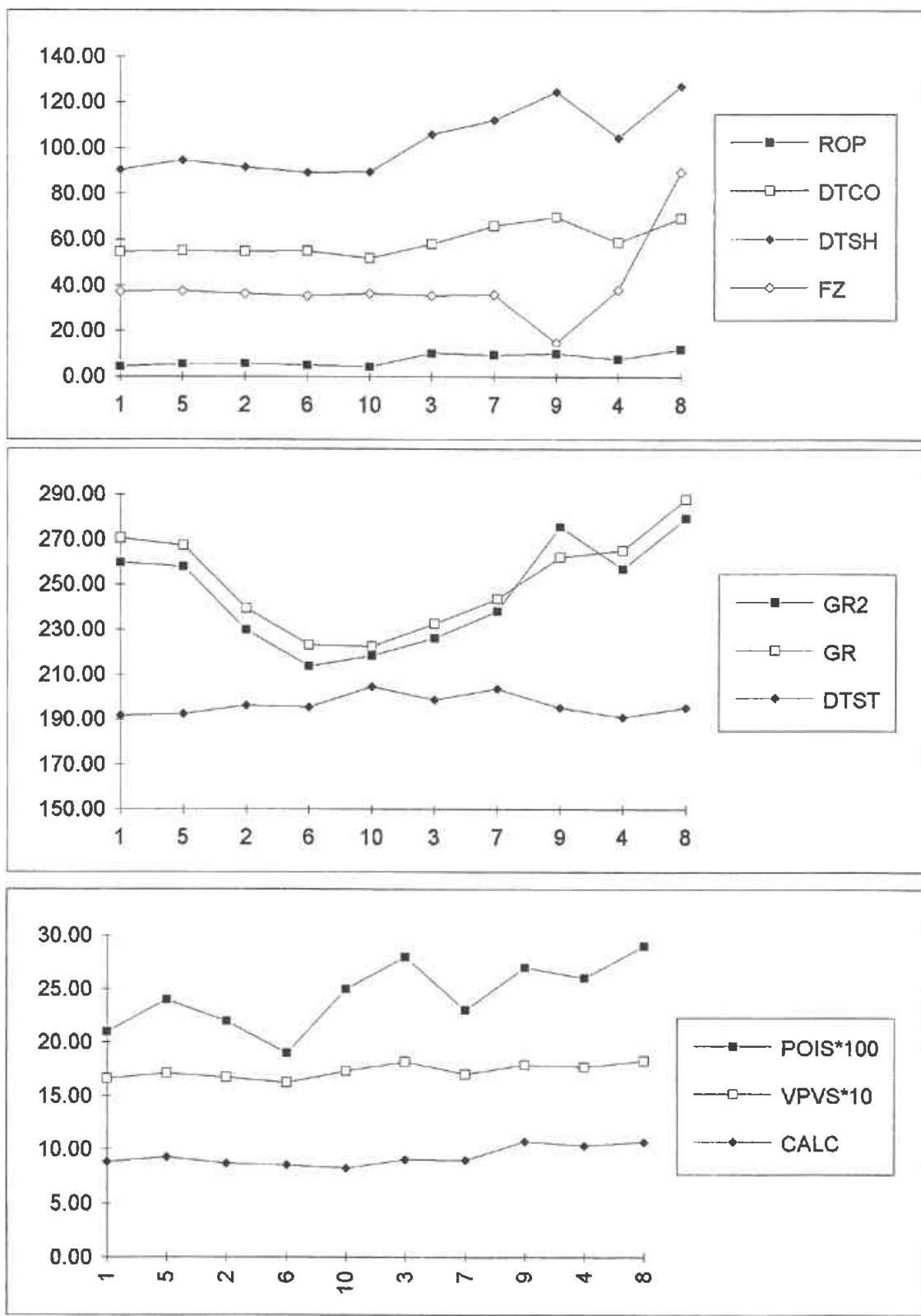


Fig 3 : Visualisation des moyennes calculées pour les variables de diagraphies pour chacun des groupes de la CAH

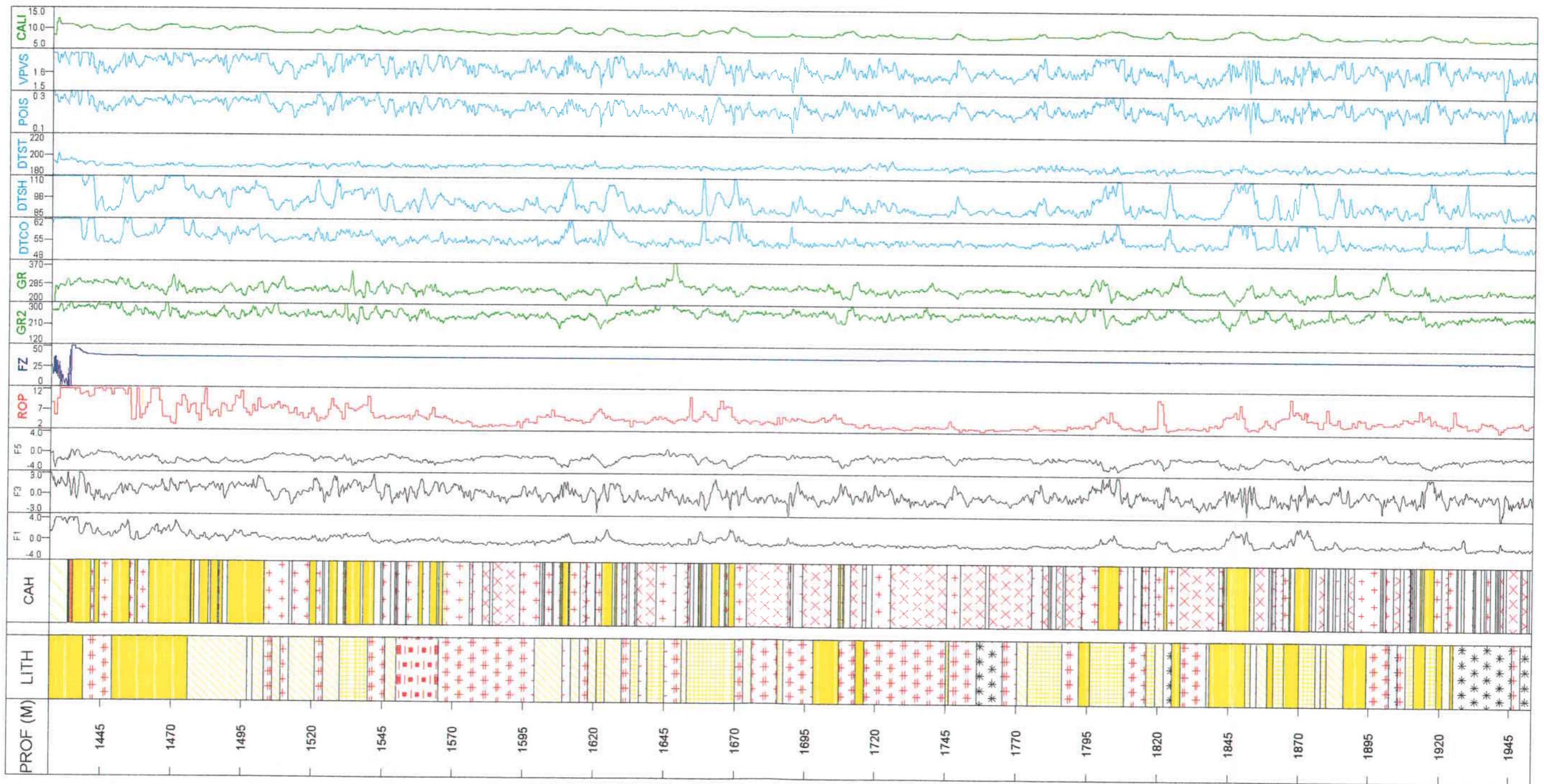


Fig 4 a : log du sondage GPK2
e= 1 / 1500

Fig 4 b : log du sondage GPK2
e= 1 / 1500

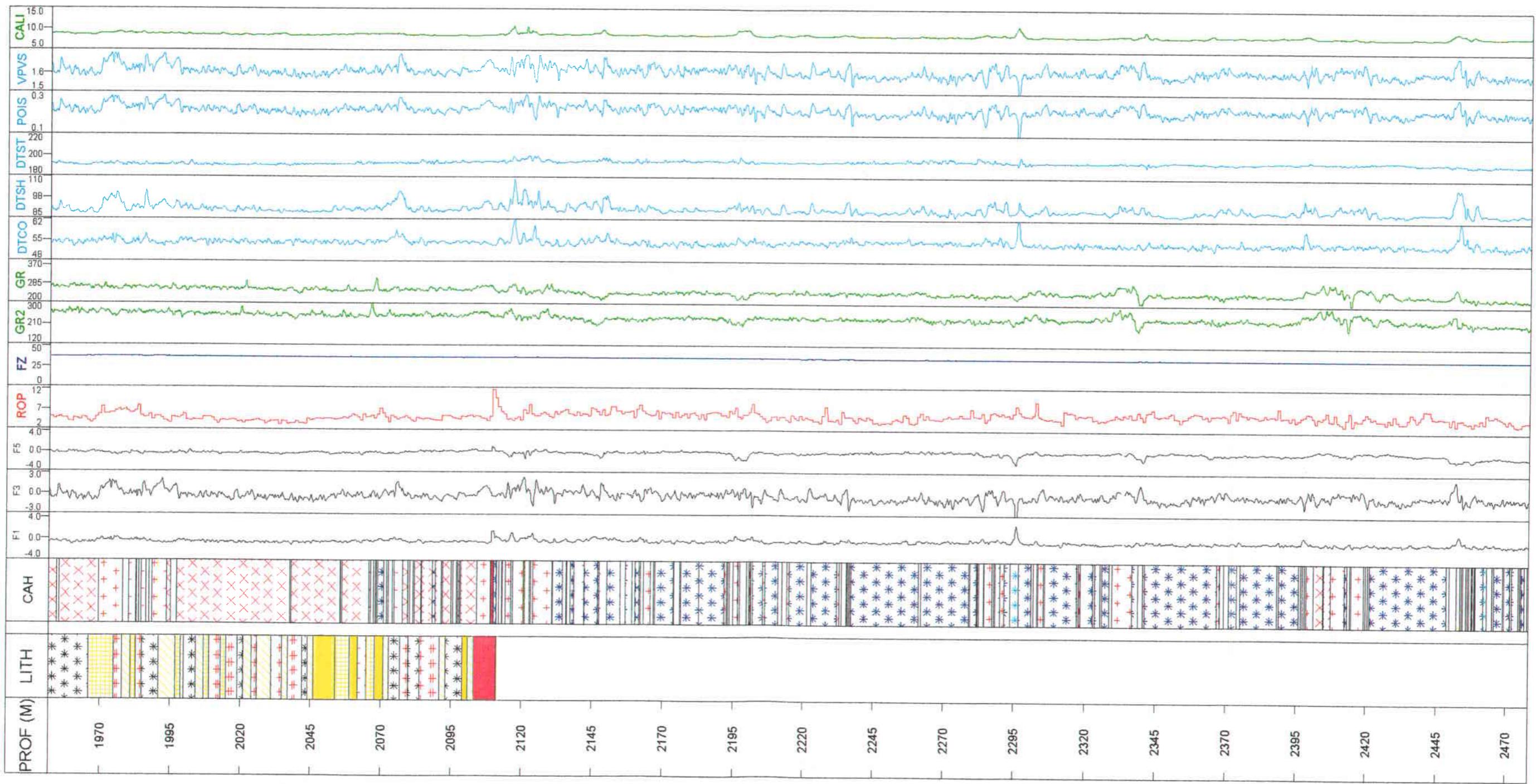


Fig 4 c : log du sondage GPK2
e= 1 / 1500

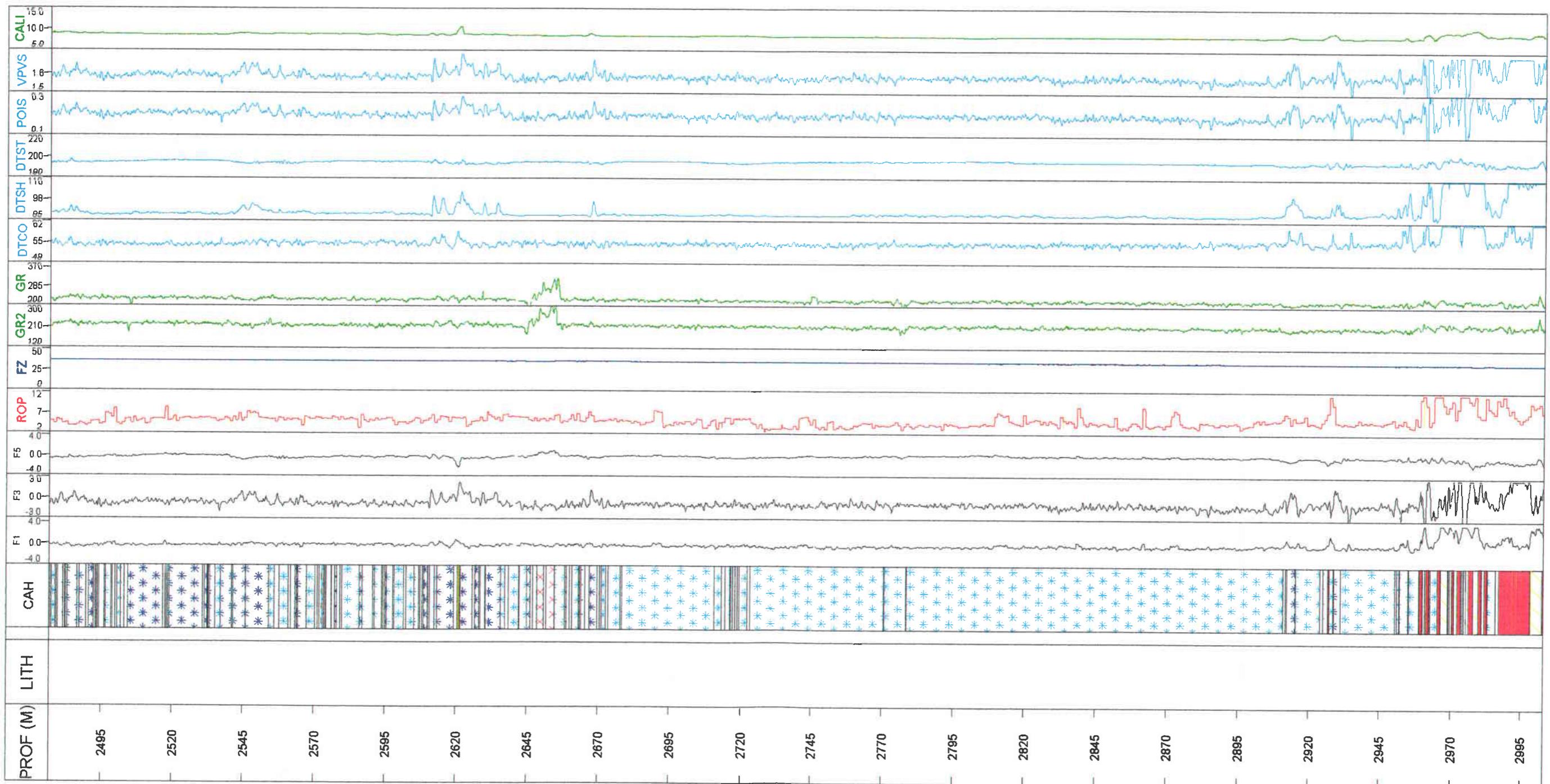
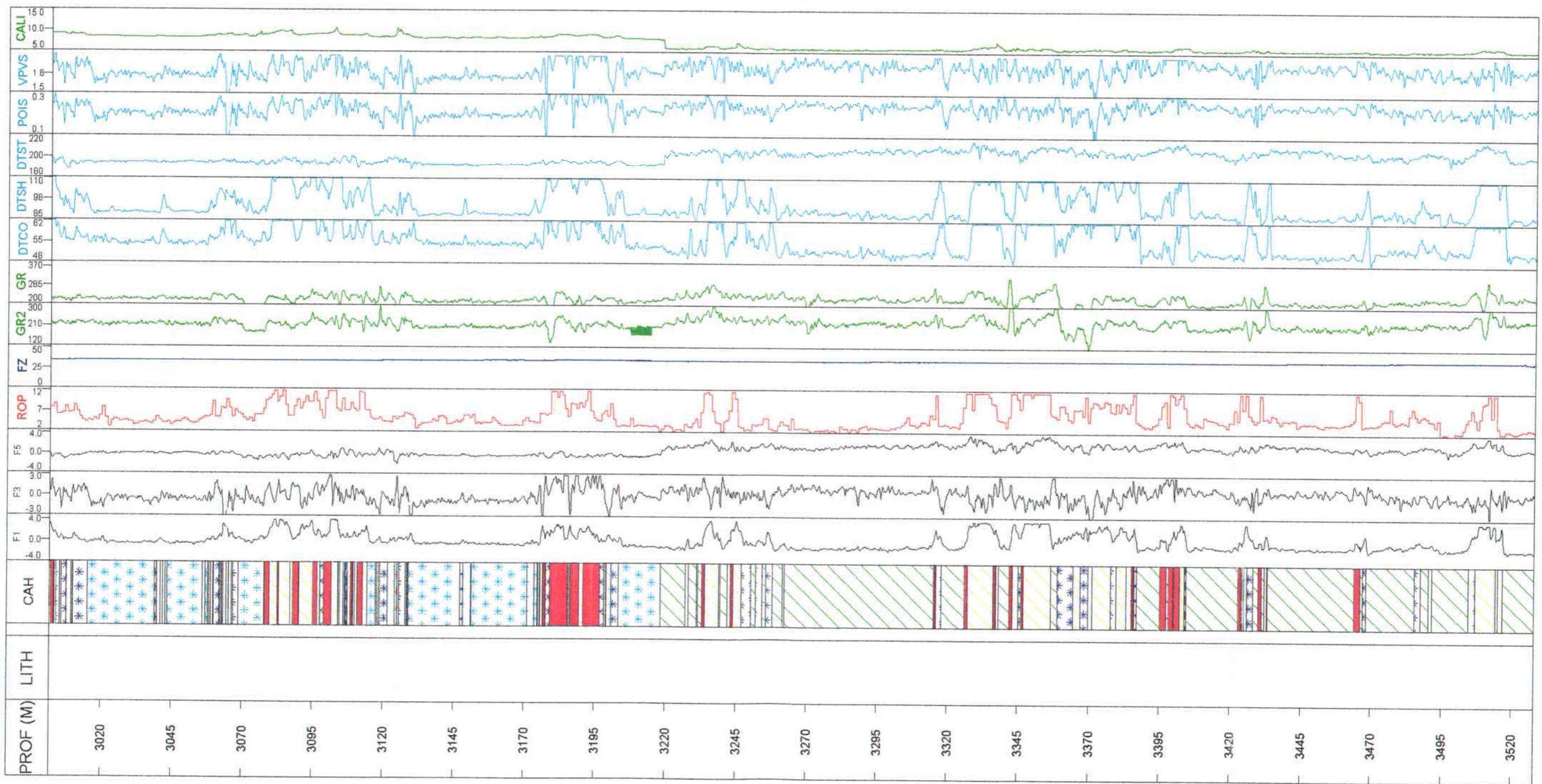


Fig 4 d : log du songage GPK2
e = 1 / 1500



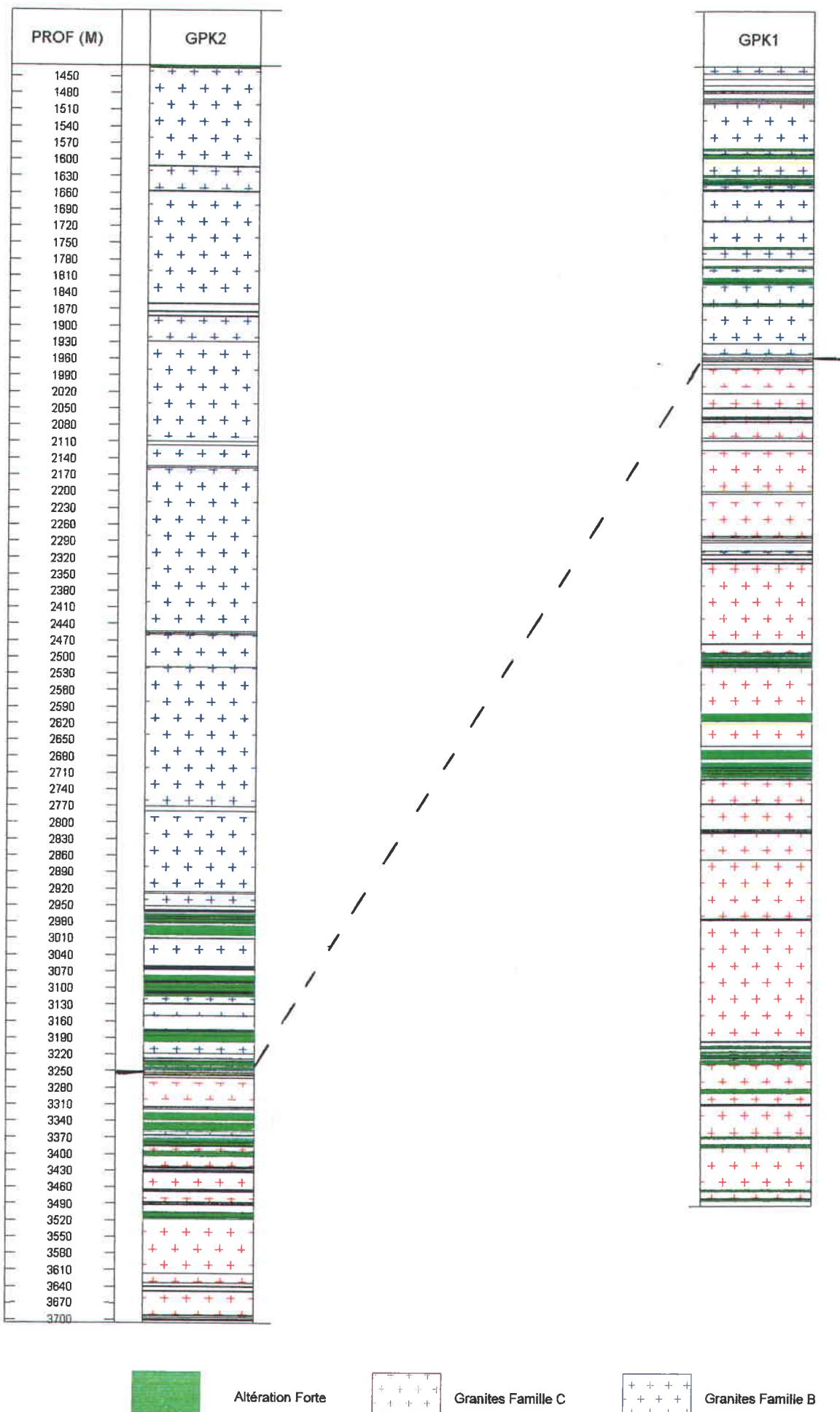


Fig 5 : Log des familles de faciès A, B et C pour les sondages GPK1 et GPK2
e = 1 / 10 000

BRGM
Service Reprographie
Impression et façonnage