

reconnaissance par diagraphies des fractures recoupées par un forage

survey by various logging techniques of natural fractures
intersecting a borehole

F.H. CORNET

Laboratoire de Sismologie,
Institut de Physique du Globe de Paris*

Rev. Franç. Géotech. n° 45, p.p. 5-19 (octobre 1988)

Résumé

Dans le cadre d'une expérimentation in-situ centrée sur l'étude des possibilités d'exploiter la chaleur des roches profondes peu perméables, différentes techniques ont été mises en œuvre pour reconnaître les fractures naturelles recoupées par des forages de 800 m de profondeur implantés dans un massif granitique.

La diagraphie électrique Mosnier a permis de préciser avec efficacité le pendage et l'azimut des fractures. Les résultats des diagraphies d'atténuation des ondes mécaniques hautes fréquences (Darcilog, atténuation des ondes S et atténuation des ondes de Stoneley) susceptibles de fournir une caractérisation des propriétés hydrauliques des fractures ont été confrontés à ceux de débitmètres et thermomètres obtenus lorsque les forages étaient soit en condition d'injection soit en condition de production. Aucune de ces diagraphies, à elle seule, n'a permis de mettre en évidence systématiquement toutes les fractures significatives du point de vue des écoulements forcés dans le massif.

Ces résultats permettent de conclure que sur la centaine de fractures reconnues pour chacun des forages, moins d'une dizaine est d'importance pour les écoulements forcés. Ainsi il est apparu qu'il ne suffit pas de mesurer la conductivité hydraulique des fractures au niveau des forages mais qu'il est également nécessaire de reconnaître leur interconnection à l'intérieur du massif.

Abstract

Various logging techniques have been used for surveying natural fractures intersecting 800 m deep borholes percussion drilled in a granitic massif.

Mosnier's electrical log has revealed very efficient for determining both the dip and azimuth of the fractures. Results of logs of acoustic wave attenuation (Darcilog, attenuation of S waves and of Stoneley waves) have been compared with results of spinner logs and thermal logs obtained when the wells were either under injection or production conditions. Results show that none of these logs taken alone can be used to identify all the fractures of import for forced fluid flow.

Although more than hundred fractures were identified in each well, less than ten of these revealed significant for forced fluid flow. This implies that in addition to measuring the hydraulic conductivity of fractures at their intersection with the wells it is necessary to characterize their interconnection within the rock mass.

* 4 place Jussieu, Tour 14, 75252 Paris Cedex 05, Tél. 43.36.25.25

1. INTRODUCTION

Un programme de recherche, centré sur l'étude in-situ des possibilités de développer un échangeur thermique artificiel dans un massif cristallin, se poursuit depuis 1984 sur le site granitique du Mayet de Montagne, à 25 km au sud-est de Vichy.

L'objectif était de faire circuler des débits d'eau de l'ordre de 60 m³/h entre deux forages (INAG III-8 et INAG III-9) distants l'un de l'autre de 100 m et profonds d'environ 800 m. Dans ce cadre, un effort a été porté sur l'identification par méthodes géophysiques des fractures naturelles qui recoupent les forages et sur la caractérisation de leurs propriétés hydrauliques.

Cet article présente les résultats de diverses diagraphies (thermiques, électriques, acoustiques et géochimiques) réalisées dans le forage INAG III-8 ainsi que les débit-métries et thermométries réalisées lorsque ce forage était placé en condition d'injection ou de production.

Une attention particulière a été portée sur les possibilités d'évaluer la conductivité hydraulique des fractures à partir de diagraphies acoustiques. Cette discussion se place exclusivement sur la base observationnelle fournie par la confrontation des résultats déduits des diagraphies acoustiques (d'une part Darcilog, d'autre part diagraphie d'atténuation des ondes S et diagraphies d'atténuation des ondes de Stoneley obtenues à partir des résultats de la sonde EVA de Elf-Aquitaine) avec les résultats des débit-métries et thermométries.

Le forage INAG III-8 profond de 782 m a été réalisé au marteau fond de trou. Son diamètre est de 250 mm jusqu'à 170 m de profondeur, puis de 165 mm jusqu'à 550 m et enfin de 159 mm jusqu'à 782 m. Il était tubé de la surface jusqu'à 170 m lors des premières diagraphies mais, du fait de déficiences dans le tubage, ce dernier a été retiré par la suite.

L'inclinaison de l'axe du forage vis-à-vis de la verticale est inférieure à 3°5 jusqu'à 680 m, profondeur à partir de laquelle cette inclinaison augmente progressivement pour atteindre 8° à 750 m. De 750 m à 782,7 m (longueur totale forée) l'inclinaison est constante et égale à 8° dans la direction N 148° E.

Une diagraphie par diamètre à 4 bras indique que le forage est bien calibré et circulaire sur toute sa hauteur sauf entre les cotes 221,5 m et 228 m où sa forme devient irrégulière. Le diamètre moyen atteint 240 mm entre 221,5 m et 224 m.

2. ETUDE DES « CUTTINGS »

La remontée des cuttings s'est faite à l'air seul jusqu'à 14 m et, à partir de ce niveau, par une émulsion d'eau et d'air comprimé, avec addition d'un produit moussant aux plus grandes profondeurs. Les cuttings ont été prélevés à des fins d'analyses (COUTURIÉ et al., 1984) chaque fois que le forage avait progressé de 1 m. Pour vérifier la représentativité de ces échantillons, des analyses chimiques comparatives ont également été réalisées par ces auteurs sur des carottes du sondage

INAG III-1 et sur des cuttings de INAG III-3 pour des cotes identiques (28 m, 84 m et 110 m); ces deux sondages sont à moins d'une quinzaine de mètres de INAG III-8. La comparaison des résultats ne montre pas de variations significatives, mis à part une diminution de 10 à 20 % de Feo et Mgo sur certains échantillons de cuttings (attribuable à un entraînement par l'eau des petites lamelles de biotite).

Le forage traverse sur toute sa hauteur le granite du Mayet de Montagne (décrit par PEYREL, 1981). Il s'agit d'un monzogranite porphyroïde contenant des mégacristaux de feldspath potassique de teinte rose dont la taille varie de 3 à 5 cm. La biotite (10 % en vol.) est associée à la hornblende verte (1 à 2 %) contenant parfois des reliques de clinopyroxène. On note deux faciès de granite, le premier correspond à la roche saine et le second à la roche rubéfiée. Le faciès rubéfié, qui correspond à une hydrothermalisation du granite, est dominant (65 % du forage); il a été traversé sans interruption de 469 m jusqu'au fond du forage.

Des variations de composition minéralogique indiquant un changement lithologique (concentration feldspathique; enclaves microgrenues sombres correspondant à une abondance de minéraux ferromagnésiens) s'observent à différentes profondeurs.

La fracturation naturelle s'est manifestée durant le forage par des chutes d'outil ou des vitesses d'avancement très importantes accompagnées parfois de venues d'eau. Dans les cuttings elle se traduit par la présence de fragments de brèche quartzo-phyliteuse verdâtre ou de cataclasite noire. A certaines fractures sont associés des sulfures (chalcopryrite ou pyrite) ainsi que de la calcite ou du quartz hydrothermal.

3. ANALYSE GÉOCHIMIQUE DES EAUX DU FORAGE

L'analyse géochimique des eaux du forage a été réalisée par BIDAUX (1987). Des échantillons de 300 cm³ ont été prélevés tous les 20 m, de 180 à 780 m. Les mesures du PH et de l'alcalinité (HCO₃⁻) ont été effectuées sur le terrain alors que les dosages concernant SiO₂, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Ca⁺⁺, Na⁺, Li et Mn ont été réalisés au laboratoire.

Il apparaît que l'eau est de faciès dominant bicarbonaté calcique légèrement acide (PH variant de 6.52 à 6.93). Les variations de composition (mg/l) au long du forage sont en général faibles et irrégulières (voir fig. 1).

On relève cependant un niveau réducteur à 480 m, lié très probablement à une circulation d'eau, et à la présence de sulfures, et des teneurs anormalement faibles en Na⁺ et K⁺ à 580 m qui seraient dues à la présence de granite altéré.

L'analyse comparée des différentes courbes de variation de composition avec la profondeur a amené BIDAUX à conclure à l'existence de circulations d'eau, assurée à 480 m, très probables à 540 m et entre 660 et 680 m.

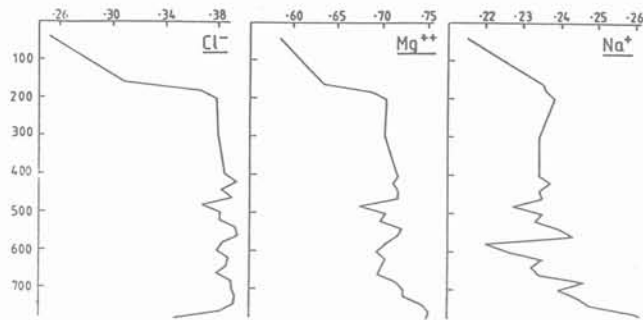


Fig. 1. — Variations avec la profondeur (exprimée en mètres) de la teneur en Cl^- , Mg^{++} et Na^+ (exprimées en milligrammes par litres) de l'eau du forage (d'après Bidaux, 1987).

Fig. 1. — Variation with depth of various ions contents in the water filling the well. Depth is expressed in meters; ion contents are expressed in milligrams per liter (after Bidaux, 1987).

En outre des possibilités de circulation naturelle sont proposées à 200 m, entre 260 m et 280 m, à 360 m et à 380 m et peut être aussi entre 609 m et 610 m ainsi qu'à 720 m.

4. DIAGRAPHIES THERMIQUES DU FORAGE AU REPOS

Une diagraphie thermique a été réalisée 45 jours après la fin du forage, période pendant laquelle le puits est resté au repos (JOLIVET, 1984). Le tubage était encore en place dans les 170 m superficiels. Ce dernier, du fait des nombreuses discontinuités qu'il présentait, a endommagé la liaison sonde thermique-câble au cours de la descente de la sonde de sorte que le gradient géothermique n'a pu être mesuré au-delà de 500 m.

Au cours de cette diagraphie la température a été mesurée avec une thermistance unique ayant une constante de temps inférieure à la seconde, une sensibilité supérieure au millièrme de degré et une fidélité de l'ordre du centième de degré.

Différents traitements numériques peuvent être appliqués à ces mesures de température (JOLIVET, 1984). Nous montrons sur la figure 2.a les variations avec la profondeur du gradient moyen calculé sur une base de 5 mètres. On remarque qu'il est à peu près égal à $30^\circ/\text{km}$ entre 250 m et 375 m mais qu'il a tendance à augmenter avec la profondeur. Les faits les plus marquants sont cependant les anomalies positives ou négatives, observées à 192 m, de 220 à 240 m, à 364 m, à 410 m et surtout l'anomalie de 473 m jusqu'à 490 m. Cette anomalie correspond à une augmentation notable du gradient qui atteint $55^\circ/\text{km}$; la température du forage à 490 m de profondeur était de 24° .

Cette diagraphie a été reprise en 1985 après que le tubage ait été retiré de la partie supérieure du forage, neuf mois après des essais d'injection réalisés, le pre-

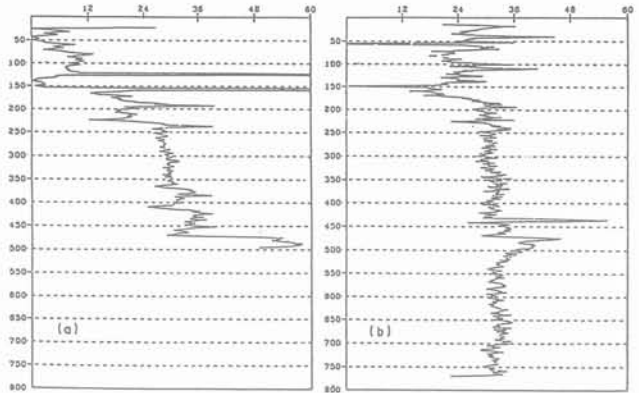


Fig. 2. — Diagraphies thermiques (d'après Jolivet, 1986) : variations avec la profondeur du gradient géothermique moyen (en degrés Celsius par kilomètre) calculé sur une longueur de 5 m avec une mesure tous les 25 cm. a) diagraphie obtenue un mois après la fin du forage; b) diagraphie obtenue neuf mois après qu'une stimulation hydraulique ait eu lieu à 441 m.

Fig. 2. — Thermal log of the well at rest (after Jolivet, 1986), i.e. variation with depth of the mean geothermal gradient (expressed in degree celsius per kilometer) computed for a 5m base with temperature measurements every 25 cm. a) log of the well as observed one month after drilling, b) log of the well as observed nine months after a hydraulic stimulation was performed at 441 m.

mier à 317 m avec des débits très faibles ($3 \text{ m}^3/\text{h}$), le second à 441 m à des débits élevés ($1.2 \text{ m}^3/\text{min}$). Les variations avec la profondeur du gradient moyen calculé sur une base de 5 m sont présentées sur la figure 2.b.

On remarque que la partie supérieure du forage (jusqu'à 200 m) est très perturbée mais que le gradient moyen devient beaucoup plus régulier en-dessous si ce n'est pour deux accidents majeurs à 441 m et 473 m. Les fortes anomalies positives observées en 1984 à 190 m et 225 m ont nettement diminué. Il apparaît donc que les essais d'injection à 441 m ont perturbé de façon significative le gradient thermique de ce forage et par conséquent que les anomalies observées sont liées à des circulations d'eau et non à des variations de conductivité thermique.

L'anomalie positive détectée à 473 m est sensible jusqu'à 550 m de profondeur ce qui indique qu'il existait à cette cote, avant le forage, un flux d'eau ascendant relativement important. Ce flux est pratiquement entièrement capté par les fractures développées à 441 m ce qui entraîne une diminution des anomalies observées à 225 m et 190 m.

L'absence d'anomalie en dessous de 550 m suggère que s'il existe des écoulements naturels d'eau dans le réseau de fractures recoupé en-dessous de cette cote, les vitesses d'écoulement y sont suffisamment faibles pour que l'eau soit en équilibre thermique avec l'encaissant.

Ces résultats confirment donc ceux des diagraphies géochimiques pour ce qui est d'un écoulement d'eau à 480 m mais permettent de conclure que s'il y a écoulement à 540 m et aux environs de 670 m, comme

le suggèrent les diagraphies géochimiques, les vitesses y sont très faibles.

Le gradient moyen mesuré entre 175 m et 772 m s'établit à 32.5°/km valeur qui est pratiquement la même que celle mesurée dans le forage INAG III-4 entre 180 m et 250 m de profondeur.

5. DIAGRAPHIES ÉLECTRIQUES

Un certain nombre de diagraphies électriques ont été réalisées, d'une part selon les méthodes classiques de l'industrie pétrolière (Latéolog et pendagemétrie de SCHLUMBERGER), d'autre part, avec la sonde MOSNIER spécialement développée pour ce programme.

Le latéolog mesure les variations de résistivité électrique pour des « tubes » de roche coaxiaux au forage et dont l'épaisseur est une fonction de la distance entre les électrodes. La pendagemétrie correspond à des mesures de résistivité électrique dans quatre azimuts différents au moyen de patins, disposés aux extrémités de deux diamètres perpendiculaires entre eux, frottant contre la paroi. Par corrélation entre les résultats obtenus pour chacun des patins, il est possible de calculer le pendage de la structure conductrice recoupée par le forage en supposant que celle-ci soit plane. Cette diagraphie est couplée à celle de la détermination de la géométrie du forage (azimut et pendage de l'axe du forage, variations de diamètre dans deux directions perpendiculaires entre elles).

Ces diagraphies sont classiques et ne seront pas discutées plus avant. Notons simplement que les résultats obtenus avec ces deux techniques sont tout à fait comparables à ceux de la diagraphie électrique MOSNIER quant à la détermination des profondeurs des fractures recoupées par le forage mais que la diagraphie MOSNIER s'est révélée beaucoup plus précise pour la détermination des pendages et azimuts des fractures.

Le principe de la diagraphie électrique MOSNIER (MOSNIER, 1981) utilisée pour cartographier les fractures consiste à mesurer la différence de conductivité électrique entre la matrice rocheuse (résistante) et le matériau qui remplit la fracture (plus conducteur du fait de sa teneur élevée en eau). Une carte de l'impédance électrique de la paroi du forage est obtenue en mesurant l'impédance à la fois en fonction de l'azimut et de la profondeur. Cette diagraphie est comparable à la pendagemétrie de SCHLUMBERGER mais la sonde MOSNIER permet une « cartographie » de la totalité de la paroi du forage contrairement à la pendagemétrie qui ne fournit ces informations que pour les secteurs balayés par les 4 patins.

Une sonde de 26 électrodes (2 de garde et 24 de mesures) a été construite (voir fig. 3). Le courant est injecté dans le terrain par la sonde, l'électrode de recueil étant l'armature métallique externe du câble de diagraphie. Pour obliger les lignes de courant issues des électrodes de mesures à pénétrer dans le terrain, au lieu de se refermer immédiatement sur le câble, une certaine longueur de ce dernier, juste au-dessus de la sonde, est isolée par une gaine. Les deux électrodes

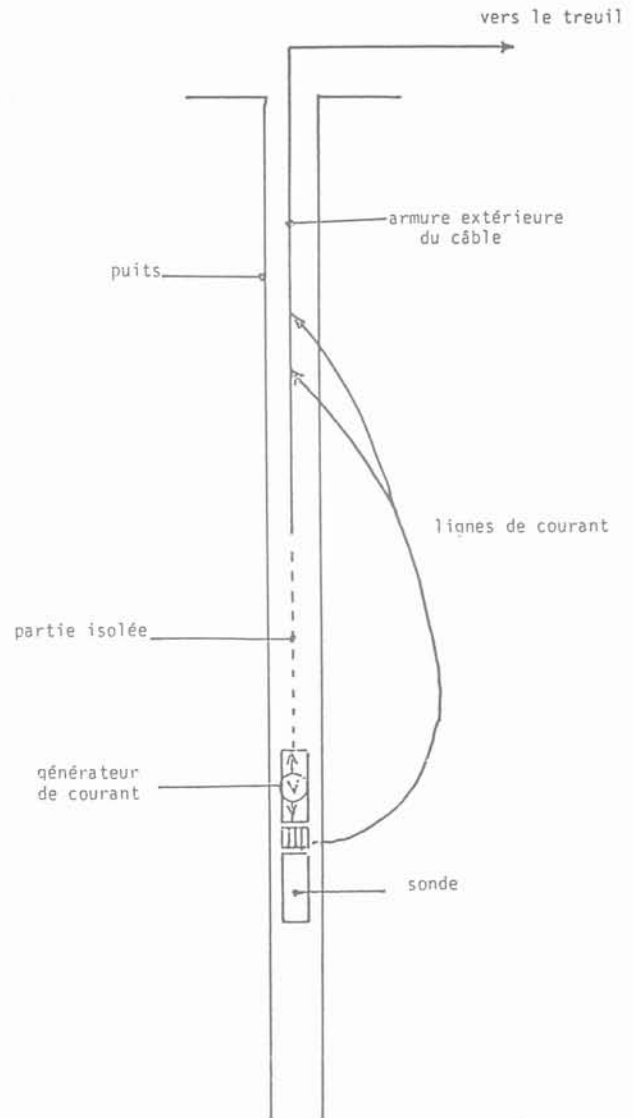


Fig. 3. — Schéma de fonctionnement de la sonde électrique Mosnier.

Fig. 3. — Schematic diagram of Mosnier's electrical sonde.

de garde, disposées de part et d'autre des 24 électrodes de mesures, permettent d'assurer que les lignes de courant au niveau des électrodes de mesures sont parfaitement normales à la paroi du forage. Les électrodes de mesures permettent de déterminer l'intensité du courant qui pénètre dans la formation dans tous les azimuts (une électrode de mesure tous les 15°), l'orientation de la sonde étant repérée par rapport au Nord magnétique.

Un exemple de résultat obtenu entre les cotes 472 m et 470 m est présenté sur la figure 4. On a représenté les amplitudes de l'intensité du courant mesuré pour les 24 électrodes sur des diagrammes polaires.

On remarque plus particulièrement l'apparition d'un conducteur dans la direction n 70° E à 471.9 m. Ce conducteur se dédouble ensuite pour des cotes décroissantes puis réapparaît solitaire à 470.7 m dans la direc-

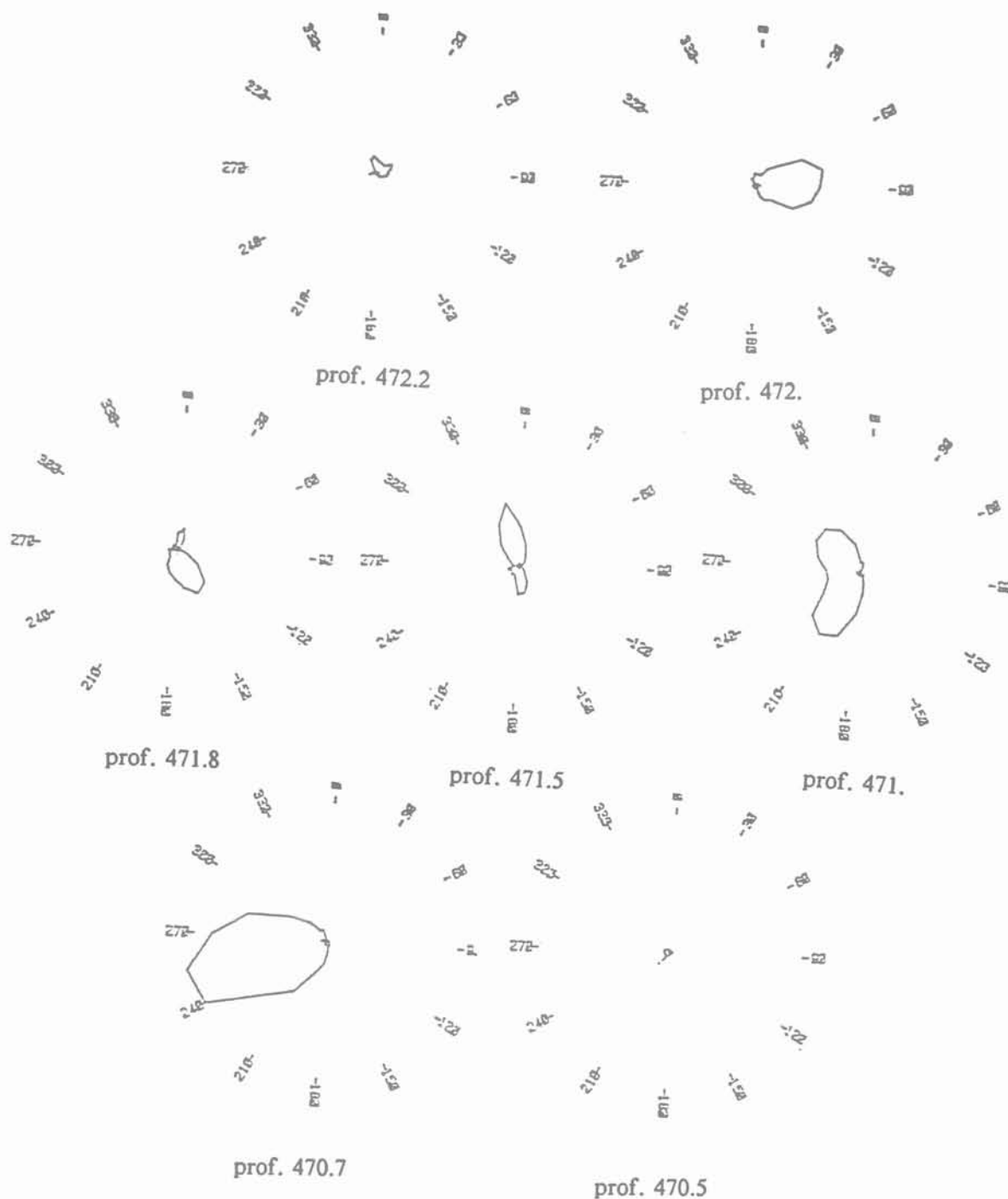


Fig. 4. — Exemple de diagramme polaire des variations azimuthales normées de l'intensité électrique mesurées entre 472 et 470 m.

Fig. 4. — Polar diagram of azimuthal variations of electrical intensity (normalized with respect to the maximum value measured in the well) as observed with Mosnier's electrical tool between 472 m and 470 m.

tion N 250° E et disparaît pour les cotes supérieures. Ces résultats permettent d'identifier une fracture dans la direction N 160° E $\pm$ 7° et de pendage 85° (fracture sub-v verticale). Elle correspond à la cote où était apparue l'anomalie thermique significative décrite ci-dessus.

Un deuxième type de présentation des résultats consiste à associer à chaque groupe de 24 valeurs de l'intensité $i(z)$, 24 carrés dont la noirceur dépend de l'intensité émise par l'électrode correspondante. Une nouvelle

ligne est tracée pour la cote $z + \Delta z$, où Δz est l'incrément de profondeur entre deux scrutations azimuthales et ainsi de suite. On obtient ainsi une cartographie électrique de la paroi du forage. Un exemple de résultat est présenté sur la figure 5 où apparaît nettement la fracture à 471 m. Cette cartographie du forage est obtenue en temps réel sur le terrain.

Cette diagraphie a été réalisée sur la hauteur totale du forage et il serait fastidieux d'énumérer ici l'ensemble

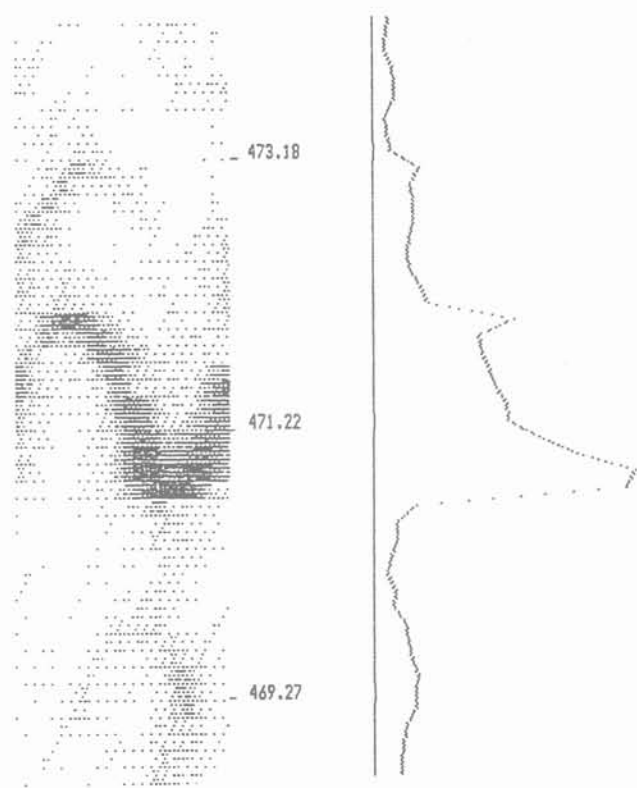


Fig. 5. — Image électrique du forage entre 472 et 470 m. La courbe de droite représente le logarithme de l'intensité totale du courant injecté.

Fig. 5. — Electrical image of the well between 472 and 470 m. The right hand curve represents the logarithm of the total injected electrical intensity.

des fractures mises en évidence (plus d'une centaine). Seule une approche statistique de ces résultats peut permettre d'obtenir une représentation de la fracturation naturelle ainsi observée. Cet aspect ne sera pas développé ici.

Soulignons que seules les fractures conductrices d'électricité sont mises en évidence avec cette méthode, et que toutes celles qui sont recimentées ne peuvent pas être cartographiées de la sorte. Afin d'identifier les niveaux les plus significatifs du point de vue de ces mesures électriques, nous avons relevé toutes les cotes où la résistance mesurée avec le laterolog LLD de SCHLUMBERGER était inférieure à 100 ohms (voir tableau 2).

6. DIAGRAPHIES ACOUSTIQUES

Les diagraphies acoustiques consistent à mesurer la manière dont évolue avec la profondeur la propagation des ondes mécaniques haute fréquence (généralement dans le domaine de la vingtaine ou de la trentaine de kilohertz pour les ondes P) au voisinage du forage.

Le principe est le suivant (voir par exemple ROSENBAUM, 1974; PAILLET and WHITE, 1982): une source émet une onde de compression dans le fluide qui remplit le forage. Cette onde induit dans la roche des ondes de volume P et S, des ondes de surface

pseudo Rayleigh et pseudo Stoneley) qui se propagent à, ou au voisinage de l'interface fluide-solide et des ondes de compression dans le fluide. Les ondes de volume et les ondes de surface induisent à leur tour des ondes de compression dans le fluide, de sorte qu'elles peuvent être détectées par des capteurs de pression placés dans le fluide (hydrophones).

A condition de disposer de moyens d'acquisition de données suffisamment rapides pour être compatibles avec le domaine de fréquence des signaux observés, il est possible d'enregistrer la totalité du train d'ondes. De tels enregistrements permettent de déterminer les temps d'arrivée des différents types d'onde ainsi que l'atténuation qui leur est associée, si l'on dispose de deux ou plusieurs récepteurs.

De nombreux travaux théoriques ont été centrés sur l'étude de la propagation des ondes haute fréquence dans et au voisinage d'un forage rempli de fluide, creusés dans des matériaux poreux et/ou fracturés, saturés par un ou plusieurs fluides (voir par exemple ROSENBAUM 1974; CHENG and TOKSÖZ, 1981; PAILLET and WHITE, 1982; WHITE 1983; MATHIEU and TOKSÖZ, 1984; BEYDOUN et al., 1985; RASALOFOSAON, 1987; HARDIN et al., 1987).

Il n'est pas de notre propos de mener ici une étude détaillée, théorique, de ce problème. Nous nous contenterons de préciser que toutes ces études font ressortir le fait que l'atténuation des différentes ondes observées, en accord avec la théorie de BIOT (1956), dépend notamment du mouvement du, ou des fluides(s) dans le réseau de pores et donc de la perméabilité du milieu.

LEBRETON et al. (1978) et CONCHE et al. (1986) semblent convaincus que l'onde P est la plus appropriée pour étudier la perméabilité du milieu. PAILLET and WHITE (1982), RASALOFOSAON (1987), parmi d'autres, ont montré que l'atténuation des ondes P était beaucoup moins sensible à la perméabilité du milieu que celle des ondes S ou que celle des ondes de STONELEY. Ces auteurs préconisent d'étudier l'atténuation des ondes de STONELEY, toujours bien marquées, pour extraire une information quantitative concernant la conductivité hydraulique des fractures plutôt que l'atténuation des ondes S du fait, pour ces dernières, des arrivées quasi-simultanées des ondes pseudo RAYLEIGH pour certains milieux.

MATHIEU et TOKSÖZ (1984) ont étudié les relations qui existent entre l'atténuation des ondes de STONELEY et l'épaisseur hydraulique d'une fracture recoupant le forage perpendiculairement à son axe. HARDIN et al. (1987) présentent, pour un massif granitique, une comparaison entre des mesures directes de perméabilité effectuées en isolant une portion de forage entre obturateurs et les valeurs de conductivité hydraulique déduites des logs d'atténuation des ondes de STONELEY. Les résultats qu'ils présentent suggèrent qu'il est effectivement possible d'apprécier la conductivité hydraulique des fractures à partir des diagraphies d'atténuation des ondes de STONELEY.

6.1. Darcilog

Dans le cadre des études menées au Mayet de Montagne, nous avons tout d'abord fait réaliser une

diagraphie sonore par la société SCHLUMBERGER, selon les normes prescrites par F. LEBRETON, pour obtenir un Darcilog du forage III-8 (distance émetteur-premier récepteur égale à 90 cm (3 pieds) et distance premier récepteur — deuxième récepteur égale à 60 cm (2 pieds), acquisition numérique à un pas d'échantillonnage de 4 microseconde avec une dynamique de l'ordre de 40 db). Le Darcilog correspond aux variations avec la profondeur de l'indice I_c défini (LEBRETON et al., 1978) par le rapport $A_2 + A_3/A_1$, où A_1 est l'amplitude de la 1^{ère} arche du signal associé à l'onde P avec $i = 1, 2, 3$. Cet indice est aussi parfois défini par un rapport de pentes (voir CONCHE, 1986 et fig. 6).

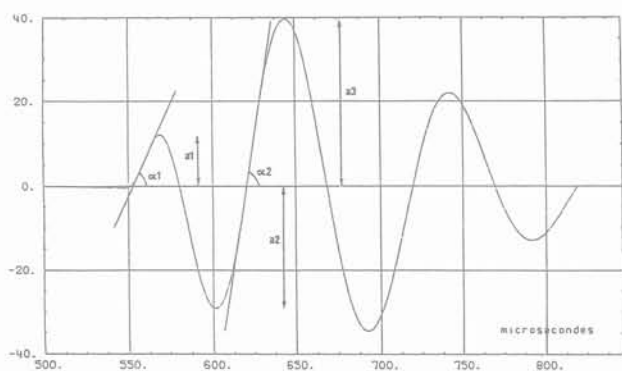


Fig. 6. — Définition de l'indice I_c utilisé pour le Darcilog (d'après Conche, 1986). Cet indice est défini soit par un rapport d'amplitudes $(a_2 + a_3)/a_1$, soit par un rapport de pentes $(tg\alpha_2/tg\alpha_1)$.

Fig. 6. — Definition of the the I_c index used in Darcilog (after Conche, 1986). I_c is defined either as the amplitude ratio $(a_2 + a_3)/a_1$ or as the slope ratio $tg\alpha_2/tg\alpha_1$.

L'indice I_c dépend de l'atténuation du signal et donc aussi de la perméabilité du milieu. D'après DUCOMTE et CONRAD (1984), la relation suivante serait vérifiée :

$$I_c = \alpha \log (k/\mu) + \beta \quad (1)$$

ou :

α et β sont des constantes caractéristiques de la sonde acoustique ;

μ est la viscosité du fluide dans la roche ;

k_v est la composante verticale de la perméabilité du milieu (si le forage est vertical).

On remarquera ainsi que d'après la relation (1) la perméabilité verticale d'une fracture horizontale dans un massif granitique étant nulle, l'indice I_c devrait être insensible aux fractures horizontales.

Les résultats obtenus, présentés sur la figure 7, sont discutés plus précisément dans la section 8 lors de leur confrontation avec les résultats des autres diagraphies et plus particulièrement ceux des débitmètres et thermométries.

6.2. Sonde EVA

Indépendamment de ce travail, la Société Elf Aquitaine (Département sismique de puits) a réalisé pour son compte un certain nombre de diagraphies acoustiques dans le forage III-8 à l'aide de la sonde EVA (MATHIEU et ARDITTY, 1986). La sonde EVA (Evaluation des Vitesses et Atténuations) est équipée de cinq émetteurs (dans le domaine 3 — 25 KHz) distants l'un de l'autre de 0,25 m et de douze récepteurs distants l'un de l'autre de 1 m, permettant de travailler avec des distances émetteur-récepteur variant de 1 m à 13 m.

Le signal complet, reçu par tous les récepteurs, était enregistré numériquement avec un pas d'échantillonnage de 5 micro secondes et 12 bits par échantillon (soit une dynamique de 72 db). Cette acquisition permet de connaître le temps d'arrivée et l'amplitude des différents types d'ondes sur les différents récepteurs.

A partir des amplitudes des ondes S et de celles des ondes de STONELEY, MATHIEU et ARDITTY ont calculé des diagraphies de rapports d'amplitude pour deux récepteurs distant l'un de l'autre de 1 m (voir

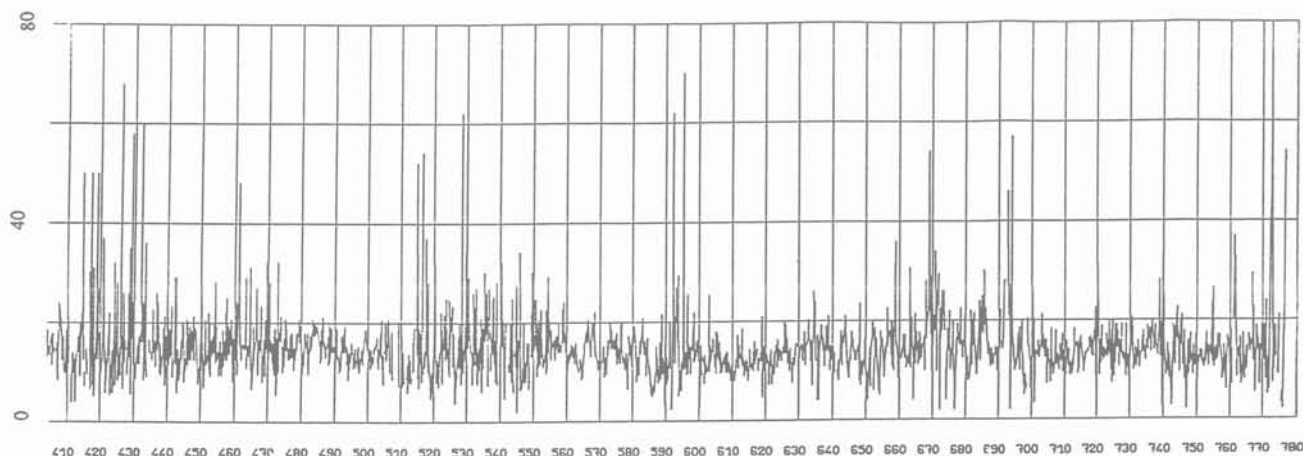


Fig. 7. — Darcilog du forage INAG III-8 avant toute stimulation hydraulique.

Fig. 7. — Darcilog of well INAG III-8 before any hydraulic stimulation.

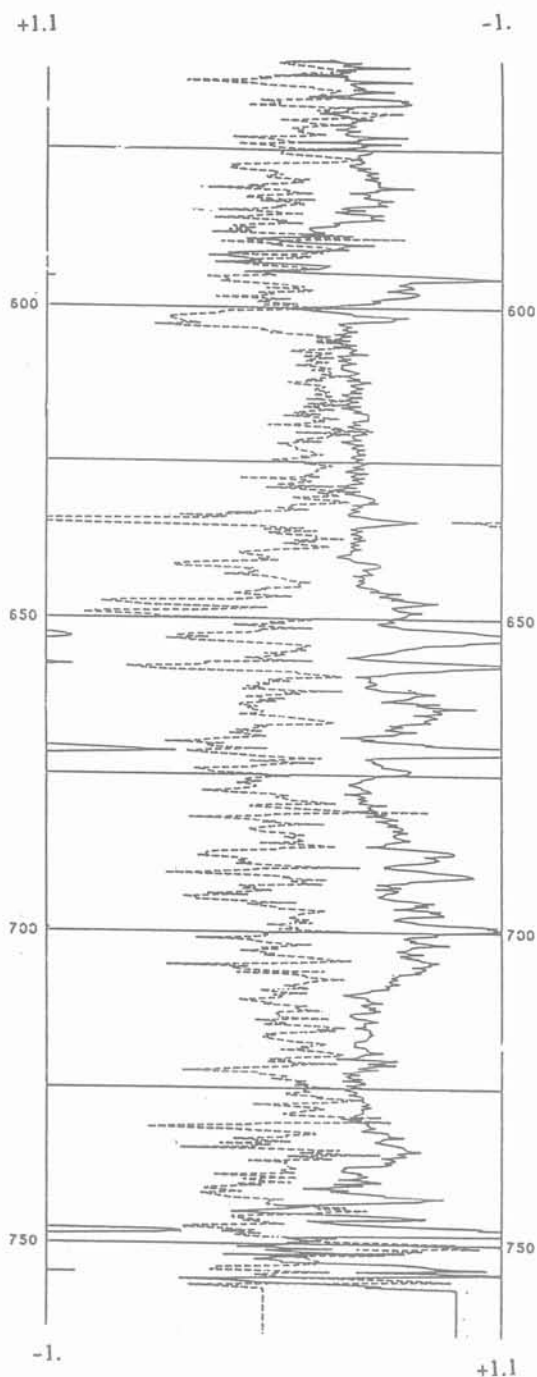


Fig. 8. — Diagraphies d'atténuation des ondes S (courbe en pointillés à gauche, variations entre + 1.1 (à gauche) et - 1) et des ondes de Stoneley (courbe en trait plein à droite, variation entre - 1 (à gauche) et + 1.1). L'atténuation est ici simplement représentée par les rapports d'amplitude du même signal vu sur deux récepteurs distants l'un de l'autre de 1 m, d'après MATHIEU et ARDITTY, 1986.

Fig. 8. — Log of S wave and Stoneley wave attenuation (after Mathieu and Arditty, 1980). S wave attenuation (dotted curve on the left) varies between + 1.1 (on the left) to - 1; Stoneley wave attenuation (curve on the right) varies between - 1.0 (on the left) and + 1.1. Attenuation (adimensional) is computed as the ratio between amplitudes of the signal as observed on two sensors distant from each other by one meter.

fig. 8) ce qui permet d'obtenir des diagraphies caractéristiques de l'atténuation dans le terrain pour ces types d'onde.

HARDIN et al. (1987) et MATHIEU et ARDITTY proposent des solutions pour extraire de ces diagraphies d'atténuation des valeurs de perméabilité. Toutefois nous préférons nous en tenir aux résultats bruts et comparer les cotes des zones déclarées très perméables à partir de ces diagraphies à celles déduites des résultats des débitmétries et thermométries réalisées lorsque le forage était en condition d'injection ou de production.

Afin de mettre en évidence les zones induisant les plus fortes atténuations pour les ondes S et pour les ondes de STONELEY, nous avons défini un seuil en fonction du niveau de bruit et donnons dans le tableau 2 les cotes pour lesquelles l'atténuation (en fait le rapport d'amplitude) mesurée atteint des valeurs au moins trois fois supérieures à ce seuil. On remarque que les seules cotes qui aient été mises en évidence communément par ces deux diagraphies sont : 170 m, 192 m, 221 — 223 m, 657.5 m, et 706.5 m.

Ces résultats correspondent à une diagraphie enregistrée en 1984 c'est-à-dire avant les essais d'injection d'eau réalisés à 317 m et 441 m. Par comparaison avec des diagraphies du même type réalisées après ces essais d'injection (voir fig. 9) on remarque que la stimulation hydraulique à 441 m a entraîné une très forte atténuation des ondes S mais n'a quasiment pas modifié l'atténuation des ondes de STONELEY. Avant fracturation hydraulique, une fissure préexistante sub-horizontale peu marquée avait été identifiée sur la diagraphie électrique MOSNIER à 441 m. Après fracturation hydraulique, une empreinte orientée du forage a révélé trois fractures sub-horizontales et une fracture verticale. Nous avons ainsi une démonstration expérimentale simple que toutes les fractures ne sont pas détectées par les diagraphies d'atténuation des ondes de STONELEY mais que, peut-être par combinaison avec les diagraphies d'atténuation des autres ondes, il est possible d'identifier tous les niveaux hydrauliquement conducteurs. Nous reviendrons sur cette proposition lors de la confrontation des différents résultats.

7. DÉBITMÉTRIES ET THERMOMÉTRIES

Afin de préciser les zones les plus conductrices hydrauliquement, des débitmétries et thermométries ont été effectuées durant des essais d'injection et de production d'eau.

7.1. Débitmétrie en condition d'injection

Un train de tiges se terminant à 251 m de profondeur par un obturateur gonflable placé entre ce train de tiges et la paroi du forage, a permis de réaliser en dessous de cette cote une injection d'eau. Le débit d'injection a été égal à 21 m³/h durant les six premières minutes de l'essai puis a été maintenu égal à 30.5 m³/h. La pression en tête de puits a crû progressivement de 3.4 MPa au début de la débitmétrie à 4.1 MPa à la fin de cette dernière.

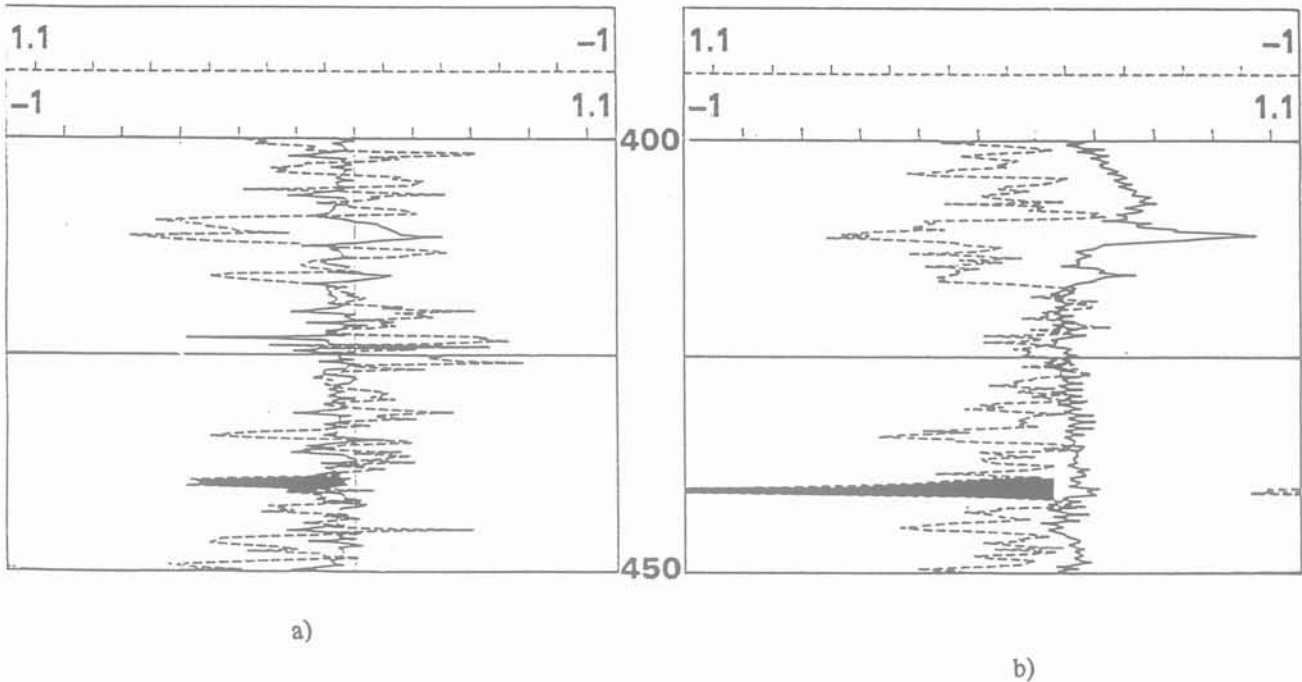


Fig. 9. — Diagraphies d'atténuation des ondes S et des ondes de Stoneley (d'après Mathieu et Arditty, 1986).
a) diagraphies réalisées avant la stimulation hydraulique à 441 m ; b) diagraphies réalisées après la stimulation hydraulique à 441 m.

Fig. 9. — Log of S wave and Stoneley wave attenuation observed, a) before and b) after a hydraulic stimulation at 441 m (after Mathieu and Arditty, 1986).

La mesure des variations avec la profondeur du débit d'écoulement dans le forage a été réalisée en mesurant la vitesse de rotation d'un micro-moulinet pour une vitesse moyenne de remontée de l'appareil de 20.8 m/min.

Des calibrations ont montré qu'en l'absence de tout écoulement dans le forage, la vitesse de rotation du micro-moulinet est linéairement dépendante de la vitesse de remontée de l'outil. En outre, lorsque le micro-moulinet se déplace dans un flux descendant constant, la droite d'étalonnage vitesse de rotation — vitesse de remontée subit une simple translation ce qui montre bien que l'accroissement de vitesse de rotation du micro-moulinet est proportionnelle au débit injecté.

Les variations de vitesse de rotation avec la profondeur sont présentées sur la figure 10.a. On y remarque plus particulièrement les cotes 267, 441 m, 472 m, 633 m et 638 m pour lesquelles des variations de débit bien marquées sont observées ainsi qu'une décroissance régulière du débit de 638 à 700 m.

En fait l'anomalie observée à 638 m ne correspond pas à un écoulement dans une fracture mais à la variation du débit d'injection destinée à corriger les dérives de

l'unité de pompes. Comme cela a été mentionné ci-dessus le débit d'injection est passé de 21 m³/h à 30.4 m³/h.

Il serait souhaitable d'extraire de ces résultats des informations quantitatives concernant l'impédance hydraulique des fractures. Nous évaluerons cette grandeur par le rapport entre, d'une part la différence qui existe

entre la pression dans le forage à cette cote et la pression interstitielle à l'infini dans le massif à la même cote et, d'autre part, le débit injecté dans la fracture.

Si l'on en juge par la profondeur des niveaux d'eau dans les différents forages réalisés sur ce site, la pression interstitielle dans le milieu avant toute injection est égale à la pression hydrostatique (le niveau d'eau se trouve à une profondeur variant de 3 à 6 m de la surface du sol selon les forages). La différence entre la pression dans le forage à la cote de la fracture et la pression dans le massif à cette profondeur est donc égale à la pression d'injection en tête du forage.

Cependant, la débitmétrie a été effectuée en condition non stationnaire. Elle a débuté 2 à 3 heures après le démarrage du pompage alors que la stationnarité des conditions d'écoulement n'aurait été atteinte que 3 à 4 jours après le début du pompage ainsi que cela a été observé lors d'essais ultérieurs. Aussi ces mesures d'impédance ne sont elles qu'indicatives qualitativement des fractures les plus perméables.

De plus, il a été observé que la réponse du forage au changement de débit d'injection intervenu dans la débitmétrie n'est pas linéaire. En effet la vitesse de rotation du micro-moulinet lors des essais de calibration entre 350 et 400 m de profondeur, réalisés avant la diagraphie avec un débit d'injection inférieur à 30 m³/h, atteignait 7.8 tours/sec mais elle n'était que de 7.2 tours/sec dans le même intervalle lorsque la débitmétrie a été réalisée à un débit d'injection de 30.4 m³/h. Ce résultat indique que la différence de débit d'injection a été entièrement accommodée par l'écoulement à 268 m. Cette observation trouve sa justification dans le

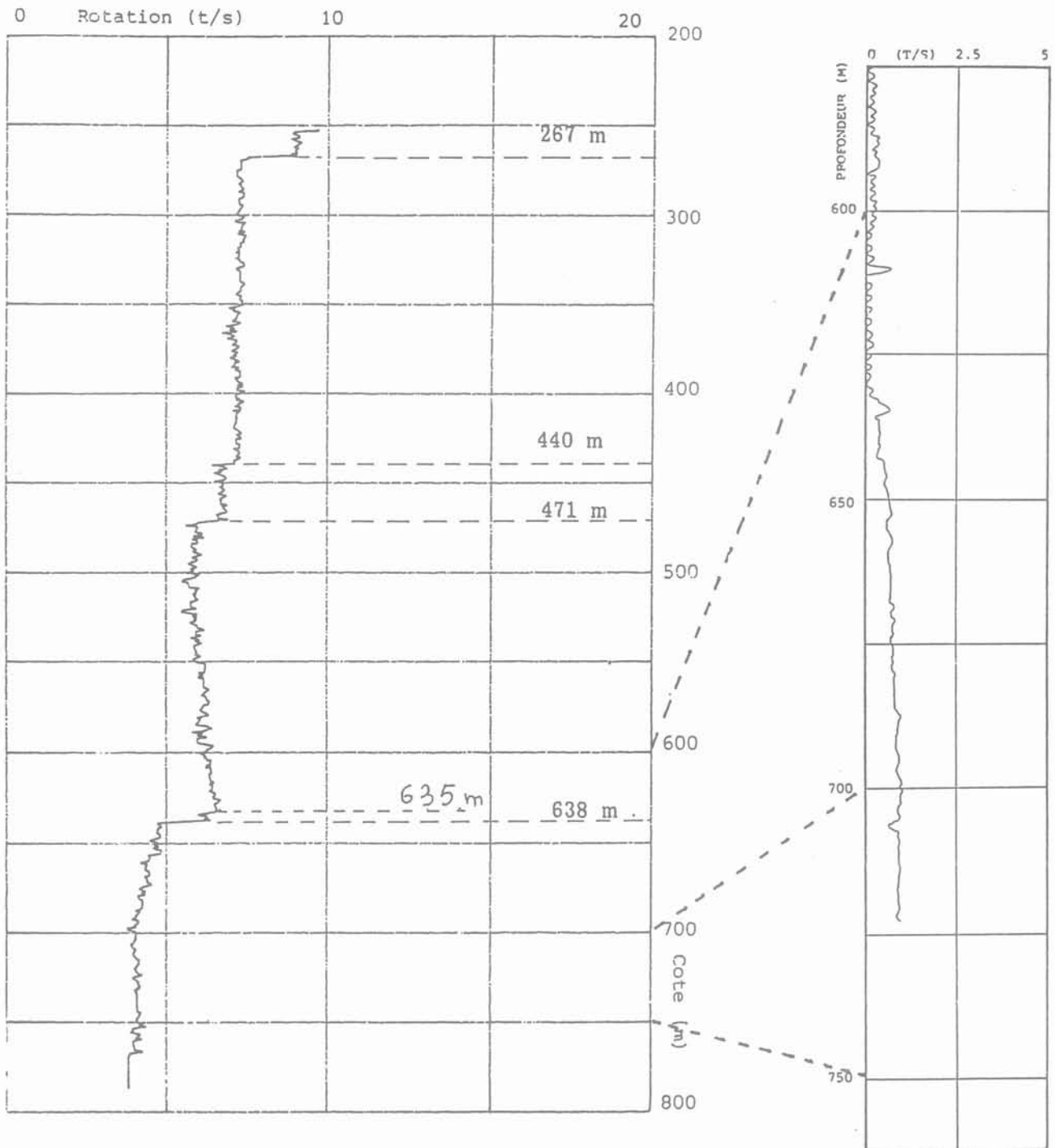


Fig. 10. — Débitmétrie du forage placé a) en condition d'injection b) en condition de production. L'axe horizontal représente les variations de vitesse de rotation du micro-moulinet (exprimées en tours par seconde).

Fig. 10. — Spinnerlog (flow meter) of the well under a) injection conditions and b) production conditions. Horizontal axis represents the variations of rotation velocity of a micro propeller (expressed in rotation per second).

fait qu'à cette profondeur la pression dans le forage lors de la débitmétrie (6.8 MPa) était à peu près égale au poids des terrains (7.0 MPa) et supérieure à la contrainte principale minimum (5.6 MPa) alors qu'elle n'était que de 5.3 MPa lors des essais de calibration. Ceci laisse supposer que l'augmentation de pression de 1.5 MPa a permis d'ouvrir une ou plusieurs fractures à 268 m de profondeur ce qui a induit une diminution

d'impédance hydraulique de la paroi du forage à cette cote. Cette proposition est confirmée par l'observation, sur la diagraphie électrique MOSNIER réalisée avant la débitmétrie, d'une fracture sub-horizontale à 268 m de profondeur.

On remarque que l'ouverture de cette fracture à sa dimension finale n'est pas instantanée étant donné

l'augmentation de débit observée à 638 m simultanément à l'accroissement du débit d'injection en tête de puits. Au cours des cinq minutes qui ont suivi cette augmentation du débit d'injection (c'est-à-dire lorsque le micro-moulinet s'est déplacé de la cote 633 m à la cote 525 m) la fracture à 268 m a vu son impédance hydraulique chuter du fait de son ouverture progressive ce qui a induit une diminution de débit injecté dans le forage en dessous de cette cote, d'où la diminution apparente de débit d'écoulement dans le forage lorsque le micro-moulinet s'est déplacé de 635 m à 525 m.

Ces résultats montrent qu'il est extrêmement malaisé de déduire de cette débitmétrie des valeurs significatives pour l'impédance hydraulique des fractures. On peut cependant, pour chacune des fractures où intervient une perte d'eau, évaluer le changement de vitesse de rotation du micro-moulinet. Les résultats sont fournis dans le tableau 1. Ainsi que cela a été montré lors des

Du fait qu'il y a eu un changement de débit d'injection en cours de mesure, la somme des débits injectés dans les différentes fractures n'est pas égale au débit injecté en tête de puits à la fin ou au début des essais.

7.2. Débitmétrie et thermométrie en condition de production

Afin de préciser les zones hydrauliquement connectées au réseau de fractures naturelles, nous avons injecté de l'eau à 60 m³/h dans le forage III-9 situé à 100 m de III-8 et réalisé, dans III-8, une thermométrie et une débitmétrie lorsque ce forage a produit un débit détectable avec le micro-moulinet.

TABLEAU 1. — *Evaluation des impédances hydrauliques des fractures mises en évidence par la débitmétrie pour le forage INAG III-8*

TABLEAU 1. — *Evaluation of hydraulic impedance of fractures from the spinnerlay run during injection*

Profondeur (en m)	Variation de vitesses de rotation tour/seconde	Débit injecté m ³ /h	Impédance hydraulique MPa/m ³ /h
268	1,8	8,6	0,5
440	0,5	2,4	1,7
473	1,0	4,8	0,9
635	0,5	2,3	1,6
656	0,35	1,6	2,1
673	0,25	1,1	3,1
687	0,20	0,9	3,8
765	1,4	6,3	0,5

calibrations, la différence de vitesse de rotation du micro-moulinet, observée entre la situation où il se déplace à une vitesse V dans le forage lorsqu'aucun écoulement n'y intervient et la situation où un débit d'injection Q existe dans le forage pour la même vitesse de remontée V de l'outil, est proportionnelle à ce débit Q . Ce facteur de proportionnalité η a été évalué à partir des mesures de vitesse de rotation effectuées au-dessus de 265 m lors de la diagraphe, c'est-à-dire avant toute perte dans des fractures mais pour un même rapport entre le diamètre de la sonde et celui du forage ($\eta = 4,8 \text{ m}^3/\text{h}$ pour une vitesse de rotation de 1 tour par seconde). En dessous de 550 m, le diamètre du forage est égal à 159 mm et le facteur de proportionnalité devient $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ pour une vitesse de rotation de 1 tour par seconde.

Pour les fractures observées au-dessus de 765 m de profondeur, le débit injecté dans ces fractures est obtenu simplement en multipliant la différence entre les vitesses de rotation observées de part et d'autre de la fracture par le facteur de proportionnalité η . L'impédance hydraulique est alors évaluée en divisant la pression d'injection en tête de puits par ce débit. Le débit injecté globalement dans les fractures qui recoupent le forage en dessous de 765 m (cote du début de la débitmétrie) a été évalué en soustrayant à la vitesse de rotation observée la valeur correspondant à la vitesse de remontée de l'outil lorsque le forage est au repos.

Les mesures ont été effectuées entre 730 m et 510 m pour la débitmétrie (avec une vitesse de remontée de 11 m/min.) et entre 773 m et 450 m pour la thermométrie. Il est à souligner qu'un tubage était présent dans le forage jusqu'à 525 m de profondeur, cote où un obturateur gonflable était supposé obstruer l'annulaire mais qui, du fait de son non gonflement, laissait en réalité l'eau s'écouler à l'extérieur du tubage.

La débitmétrie (voir fig. 10.b) permet de déduire que l'écoulement entre 635 m et 525 m est constant si ce n'est peut être une très faible venue d'eau vers 580 m (variation de vitesse de rotation du micro-moulinet légèrement inférieure à 0,2 t/sec.). Des venues d'eau sont notées à 635 m (la plus importante), 647,5 m et 687,5 m. Ces trois niveaux produisent ensemble un débit induisant une variation de vitesse de rotation d'environ 0,9 t/sec. Aucune calibration du micro-moulinet n'a malheureusement été effectuée lors de ces mesures de sorte qu'il n'est pas possible d'évaluer les débits correspondants.

La thermométrie (voir fig. 11) met bien en évidence les niveaux où interviennent des venues d'eau, la diagraphe de gradient thermique fournissant un piqué des cotes plus précis. On relève ainsi entre 510 m et 770 m les cotes 635 m, 648 m, 653 m, 671 m, 687,5 m, 691 m, 699 m et 700 m. Aucune venue d'eau n'est identifiée vers 580 m ce qui suggère que la faible

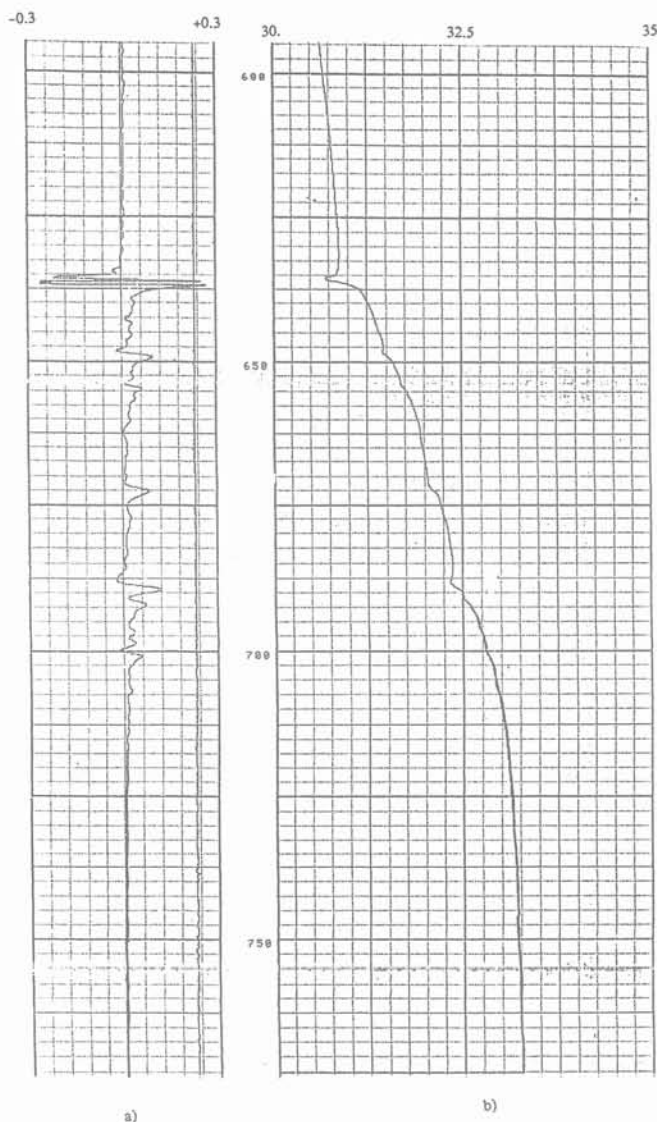


Fig. 11. — Thermométrie du forage placé en condition de production ; a) gradient géothermique (exprimé en degré celsius pour 10 mètres) ; b) température (degrés Celsius).

Fig. 11. — Thermal log of the well under production conditions. a) Geothermal gradient (expressed in degree celsius per 10 meters) ; b) temperature (degree celsius).

variation de vitesse de rotation observée à cette cote lors de la débitmétrie a une autre cause. Celle-ci pourrait être la petite variation de vitesse de remontée du micro-moulinet intervenue à cette cote (de l'ordre de 0.5 m/min.).

Aucune venue d'eau notable n'est observée entre 700 m et 770 m, cote du début de la diagraphe. Cependant l'absence de gradient thermique mesuré entre 770 m et 755 m suggère une forte venue d'eau en-dessous de 770 m.

Enfin on relève une forte anomalie thermique à 473 m à l'intérieur du tubage, signe d'une venue d'eau importante dans l'annulaire à cette profondeur.

Ces résultats sont donc en accord avec la débitmétrie réalisée lorsque le forage était en condition d'injection. Cependant vis-à-vis des débitmétries on remarque la bien meilleure précision des diagraphies thermiques pour identifier les cotes où interviennent les venues d'eau. Un travail est en cours pour essayer de déduire de ces anomalies thermiques le débit d'écoulement dans la fracture correspondante.

8. CONFRONTATION DES RÉSULTATS

Une confrontation des résultats obtenus avec les diverses diagraphies réalisées est présentée dans le tableau 2. Pour l'analyse des cuttings nous avons reporté toutes les cotes identifiées comme des zones de fractures ouvertes ou cimentées. Pour la géochimie des eaux, seules les cotes identifiées par BIDAUX (1987) comme lieu de venues d'eau possibles ont été indiquées. Pour les diagraphies thermiques du forage au repos, nous avons regroupé les mesures effectuées avant et après les essais de fracturation hydraulique à 441 m. Nous avons reporté toutes les cotes pour lesquelles le gradient s'écartait de plus de 5° C/100 m par rapport à la valeur moyenne. Pour les diagraphies électriques nous avons considéré le laterolog SCHLUMBERGER et avons retenu toutes les cotes où des résistances inférieures ou égales à 100 ohms avaient été mesurées. En ce qui concerne le Darcilog, nous avons retenu toutes les cotes où l'indice I_d dépasse la valeur 20 (rappelons que plus l'indice I_d , adimensionnel, est élevé plus le milieu est supposé perméable). La valeur maximum de 40 a été atteinte à 672 m. Pour les diagraphies d'atténuation des ondes S et d'atténuation des ondes de STONELEY nous avons retenu, comme pour les diagraphies précédentes, un seuil arbitraire mais suffisamment élevé pour mettre en évidence les cotes où des valeurs extrêmes apparaissent.

Ainsi, bien que ces différents seuils soient arbitraires, ils permettent, en précisant les cotes où les valeurs extrêmes sont observées, d'identifier la (ou les) diagraphe(s) susceptible(s) de mettre en évidence les zones de fracture les plus significatives du point de vue des écoulements forcés dans le massif.

D'après le tableau 2, il apparaît que si les diagraphies électriques permettent de bien déterminer au niveau du forage la géométrie des fractures dans lesquelles interviennent des écoulements (log MOSNIER), elles ne permettent absolument pas de prévoir les zones les plus hydrauliquement perméables. En effet, les cotes où la résistance électrique mesurée est très faible ne coïncident pas généralement avec les cotes où de forts écoulements sont intervenus. Ainsi, la fracture à 473 m qui joue un rôle majeur en ce qui concerne l'écoulement dans le massif, comme nous l'avons vu avec les diverses diagraphies thermiques et la diagraphe de géochimie des eaux, n'apparaît pas sur les diagraphies électriques comme un élément de grande importance même si elle est bien identifiée. Cette remarque est également valable pour les fractures à 635 m et à 268 m.

Pour la diagraphe de géochimie des eaux, du fait de la distance entre les points d'échantillonnage, on peut considérer que les cotes 267 m, 471 m et 673 m mises en évidence sur les débitmètres correspondent à des fractures où interviennent des circulations naturelles. Toutefois les cotes 360 — 380 m, 540 m, 609 — 610 m, 720 m identifiées par la géochimie ne correspondent à aucun écoulement notoire lors des essais d'injection ou de production. Réciproquement les cotes 635 m, 648 m, 653 m, 691 m, 699 — 700 m, identifiées sur la diagraphe thermique lorsque le forage était en condition de production n'apparaissent pas sur les diagrammes chimiques. Ce résultat montre ainsi que toutes les fractures perméables connectées au réseau de fractures naturelles ne sont pas nécessairement le siège d'écoulement naturel détectable. On peut également conclure que les perturbations chimiques de l'eau du forage ne sont pas uniquement causées par des venues d'eau mais résultent parfois de variations de composition chimique de la matrice rocheuse (cote 540 m par exemple).

Pour le Darcilog, il est certain que la valeur la plus élevée de l'indice I_c coïncide pour l'intervalle de profondeur considéré, à la zone d'impédance hydraulique la plus faible. Toutefois on relève de très nombreuses cotes où l'indice I_c est élevé mais pour lesquelles aucun écoulement d'eau n'a été mis en évidence (414 à 432 m, 515 m, 516 m, 528 m, 592 à 615 m). Enfin la fracture à 472 m qui est l'une des plus significatives du point de vue hydraulique, n'a pas été identifiée avec le Darcilog.

La diagraphe d'atténuation des ondes S a bien mis en évidence les cotes 267 m, 441 m, 635 m qui correspondent aux cotes où cette atténuation atteint des valeurs extrêmes. Toutefois, avec le seuil arbitraire choisi pour faire ressortir les valeurs élevées, la fracture à 472 m n'a pas été identifiée. Sur les sept zones perméables détectées lorsque le forage était en injection, quatre ont été identifiées mais trois sont passées inaperçues. Par contre de nombreuses autres cotes ont été soulignées qui n'ont pas donné lieu à des écoulements détectables. Des conclusions comparables sont tirées de la diagraphe d'atténuation des ondes de STONELEY : si cette diagraphe a bien fait ressortir la fracture à 472 m, elle n'a pas permis d'identifier les cotes 267 m, 441 m, 635 m et 647 m. De même elle a atteint des valeurs élevées dans des zones où aucun écoulement n'a été décelé.

9. CONCLUSION

Il apparaît ainsi que si la détermination du pendage et de l'azimut des fractures recoupant un forage en milieu granitique se fait bien par diagraphe électrique, aucune des diagrammes utilisées n'aura permis de caractériser de façon satisfaisante les propriétés hydrauliques des fractures. Cependant, en couplant les diagrammes d'atténuation des ondes S et celles d'atténuation des ondes de STONELEY, toutes les fractures significatives ont été identifiées mais d'autres zones sans importance pour les écoulements forcés dans le massif ont également été soulignées. Avec ces deux diagrammes, il n'a pas été

possible de préciser parmi l'ensemble des fractures individualisées celles qui sont les plus conductrices du point de vue hydraulique.

L'observation la plus marquante qui ressort de ces divers résultats est le contraste entre le grand nombre de fractures mises en évidence par les diverses diagrammes et par l'étude détaillée des cuttings et le petit nombre de niveaux d'écoulement d'eau détectés, que ce soit lorsque le forage était en condition d'injection ou lorsqu'il était en condition de production. Il est même apparu lors des études menées sur le forage III-9 que des niveaux identifiés comme producteurs d'eau lors de la réalisation du forage se sont révélés être sans importance lors des débitmètres.

Ainsi, pour déterminer les niveaux d'écoulement les plus significatifs dans le massif il ne suffit pas de mettre en évidence les fractures les plus conductrices au niveau du forage, il est aussi nécessaire de connaître l'interconnection de ces fractures dans le massif. Ce point paraît beaucoup plus délicat à explorer avec les diagrammes classiques et seules les débitmètres ont permis de fournir des informations à ce sujet pour les essais du Mayet de Montagne.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le Ministère de la Recherche et de la Technologie (fonds de la Recherche — secteur génie civil), l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, le Centre National de la Recherche Scientifique (INSU et PIRSEM) et la Commission de Communautés Européennes (DG XII — Géothermie). Je tiens à remercier la société Elf Aquitaine et plus particulièrement P. Arditty et F. Mathieu qui m'ont communiqué leurs résultats obtenus avec la sonde EVA.

BIBLIOGRAPHIE

- BATCHELOR A.S. (1984), *Hot Dry Rock Geothermal Exploitation in the United Kingdom*. Modern Geology, vol. 9, nb.1, p.1-43, Gordon and Breach Science Publishers.
- BEYDOUN W.B., CHENG C.H. and TOKSÖZ M.N. (1985), *Detection of open fractures with vertical seismic profiling*. Journal Geophys. Res., vol. 90, nb. B6, pp. 4557-4566.
- BIDAUX P. (1987), *Contribution à l'étude des circulations profondes en milieu fissuré peu perméable, identification à partir de mesures hydrochimiques le long de forages*. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier, spécialisé Géologie.
- BIOT M.A. (1956), *Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid*. Jour Acoustic Soc. Am., vol. 28, pp. 168-191.
- CHENG C.H. and M.N. TOKSÖZ. (1981), *Elastic wave propagation in a fluid filled borehole and synthetic acoustic logs*. Geophysics, vol. 46, pp. 1042-1053.
- CONCHE B. (1986), *Apport des diagrammes acoustiques dans l'identification de la fracturation en forage : modélisation, étude de cas concrets*. Mémoire de diplôme d'ingénieur Géophysicien de Strasbourg.

- CORNET F.H. et JULIEN Ph. (1987), *Stress determination from hydraulic tests data and focal mechanisms of induced seismicity*. Soumis pour publication à Int. Jour. Rock Mech. Min. Sc.
- COUTURIE J.P., BINON M. et CARMIER F. (1984), *Rapport géologique sur le forage INAG III-8; Rapport « Mayet de Montagne »*. F.H. Cornet, Inst. de Phys. du Globe de Paris.
- DUCOMTE C. et CONRAD R. (1984), *Application d'une diagraphe de perméabilité « Sealdex et Exaflo »*. 9^e colloque international de diagraphies, Paris, Soc. Av. Int. Diagraphies.
- HARDIN E.L., CHENG C.H., PAILLET F.L. and MENDELSON J.D. (1987), *Fracture characterization by means of attenuation and generation of tube waves in fractured crystalline rock at Mirror Lake, New Hampshire*. Jour. Geophys. Res., vol. 92, nb B8, pp. 7989-8006.
- JOLIVET J. (1985), *Etude thermique du sondage III-8, Rapport Mayet de Montagne 1/10/83 — 1/7/87*. F.H. Cornet, Institut de Physique du Globe de Paris.
- LEBRETON F., SARDA J.P., TROQUEME E. et MORLIER P. (1978). *Logging tests in porous media to evaluate the influence of their permeability on acoustic waveforms*. 19th S.P.W.L.A. Logging Symp.; El Paso.
- MATHIEU F. and TOKSÖZ M.N. (1984), *Application of full waveform acoustic logging data to the estimation of reservoir permeability*. Paper BHG 15; 54th S.E.G. meeting, Atlanta.
- MATHIEU F. et ARDITY P. (1986), *Rapport interne Elf-Aquitaine*. Département sismique de puits, Paris-La Défense.
- MOSNIER J. (1982), *Détection électrique des fractures naturelles ou artificielles dans un forage*. Annales Géophys., vol. 38, pp. 537-540.
- PAILLET F.L. and WHITE J.E. (1982), *Acoustic modes of propagation in the borehole and their relationship to rock properties*. Geophysics, vol. 47, pp. 1215-1228.
- PEYREL J.Y. (1972), *Pétrologie des granites rouges du N.E. du Massif Central français*. Thèse 3^e cycle, Univ. Clermont-Ferrand II, 152 P.
- RASALOFOSAON P. (1987), *Propagation des ondes acoustiques dans les milieux poreux. Effets d'interface*. Thèse de Docteur es-sciences. Univ. Paris VII.
- ROSENBAUM J.H. (1974), *Synthetic microseismogram: logging in porous formation*. Geophys. vol. 39, pp. 14-32.
- WHITE J.E. (1983), *Underground sound*, 252 pp., Elsevier, Amsterdam.