

4/6

G GiMR-GM
(16)

REVUE FRANÇAISE DE GÉOTECHNIQUE

AVEC LA PARTICIPATION DES COMITÉS FRANÇAIS DE
MÉCANIQUE DES SOLS
MÉCANIQUE DES ROCHES
GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR

N° 45

130 F

4^e TRIMESTRE 1988

Presses de l'école nationale des
Ponts et chaussées

REVUE FRANÇAISE DE GÉOTECHNIQUE

N° 45
OCTOBRE 1988

sommaire

- Reconnaissance par diagraphies des fractures recoupées par un forage
F.H. Cornet 5
- Caractérisation des gisements d'hydrocarbures fracturés en utilisant l'outil de
diagraphie acoustique EVA (R) 21
P.C. Arditty, F. Mathieu, Ph. Staron
- Une diagraphie de perméabilité par méthode acoustique 37
P. Morlier, N.E. Bounoua, F. Lebreton
- Variation du coefficient d'emmaganisement de l'aquifère stratifié de la Plaine de
Salonique (Grèce) 51
J. Meladiotis, C. Demiris
- Application combinée de l'analyse structurale, de la géostatistique et de la théorie
des blocs clés à l'étude des problèmes de stabilité et de confortement des travaux
miniers 59
M. Vinches

ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES FORMATION CONTINUE

Sessions de formation Géotechnique, matériaux structures Routes, ouvrages d'art

| | | |
|---|--|--------------------------|
| Entretien des routes | 24 au 27 octobre | Paris |
| Battage dans les sols | 25 au 27 octobre | Paris |
| Les matériaux nouveaux pour la précontrainte et le renforcement d'ouvrages d'art | 25 et 26 octobre | Paris |
| Météorologie routière : prévisions et informations | 15 au 17 novembre | Paris |
| Géotechnique des tunnels | 15 au 17 novembre | Paris |
| Géotextiles - géomembranes | 22 au 24 novembre | Paris |
| Infrastructures et sécurité | 22 au 24 novembre | Paris |
| Vivre avec les carrières souterraines | 29 novembre au 1 ^{er} décembre | Région ouest de Paris |
| Géotechnique routière tropicale | 29 novembre au 1 ^{er} décembre | Paris |
| Effet des actions dynamiques sur les ouvrages du génie civil (séismes, vent, choc de bateau...) | 29 novembre au 2 décembre | Paris |
| Hydrogéologie | 6 au 8 décembre | Paris |
| Couches de roulement : choix et évolution des techniques | 13 au 15 décembre | Paris |
| Journées d'études : | | |
| Production de granulats et automatisation des carrières | 29 novembre | Aix-en-Pro- vence |
| Conception et construction des grands ouvrages | 7 et 8 décembre | Paris |

Pour toute information, s'adresser à l'E.N.P.C./D.F.C.A.I., 28, rue des Saints-Pères, 75007 PARIS. Tél. : 16 (1) 42.60.34.13. (Christine Rose).

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 débitmétrics et thermométrics obtenues 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 débitmétrics et thermométrics 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 débitmétrics et thermométrics.

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-phylliteuse verdâtre ou de cataclasite noire. A certaines fractures sont associés des sulfures (chalcopyrite 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⁻, SO₄⁻, 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.

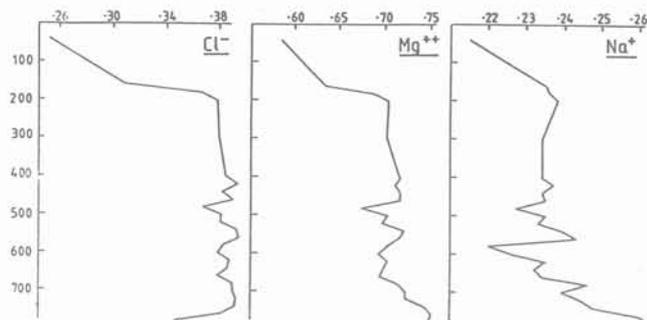


Fig. 1. — Variations avec la profondeur (exprimée en mètres) de la teneur en Cl^- , Mg^{++} et Na^+ (exprimées en milligrammes par litres) de l'eau du forage (d'après Bidaux, 1987).

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 millième 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-

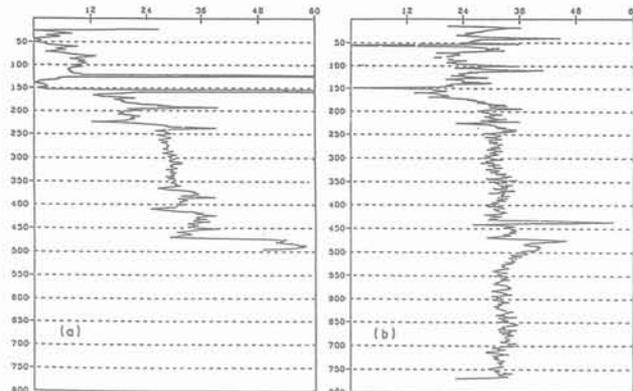


Fig. 2. — Diagraphies thermiques (d'après Jolivet, 1986) : variations avec la profondeur du gradient géothermique moyen (en degrés Celsius par kilomètre) calculé sur une longueur de 5 m avec une mesure tous les 25 cm. a) diagraphie obtenue un mois après la fin du forage; b) diagraphie obtenue neuf mois 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 présentés 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 (Latérog et pendagemétrie de SCHLUMBERGER), d'autre part, avec la sonde MOSNIER spécialement développée pour ce programme.

Le latérog 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

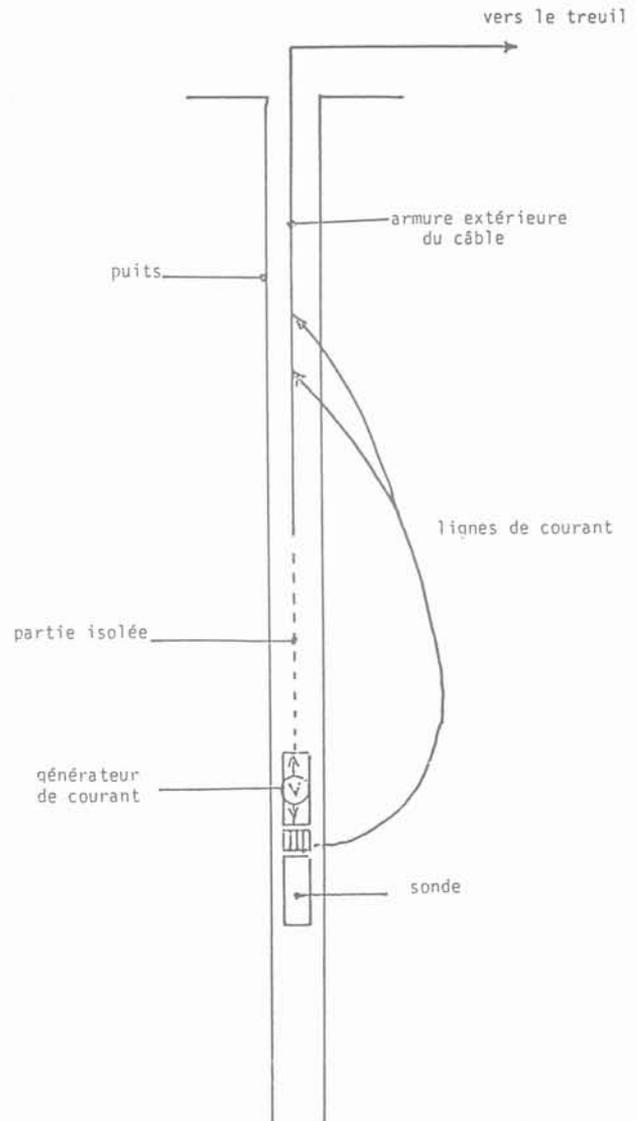


Fig. 3. — Schéma de fonctionnement de la sonde électrique Mosnier.

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-

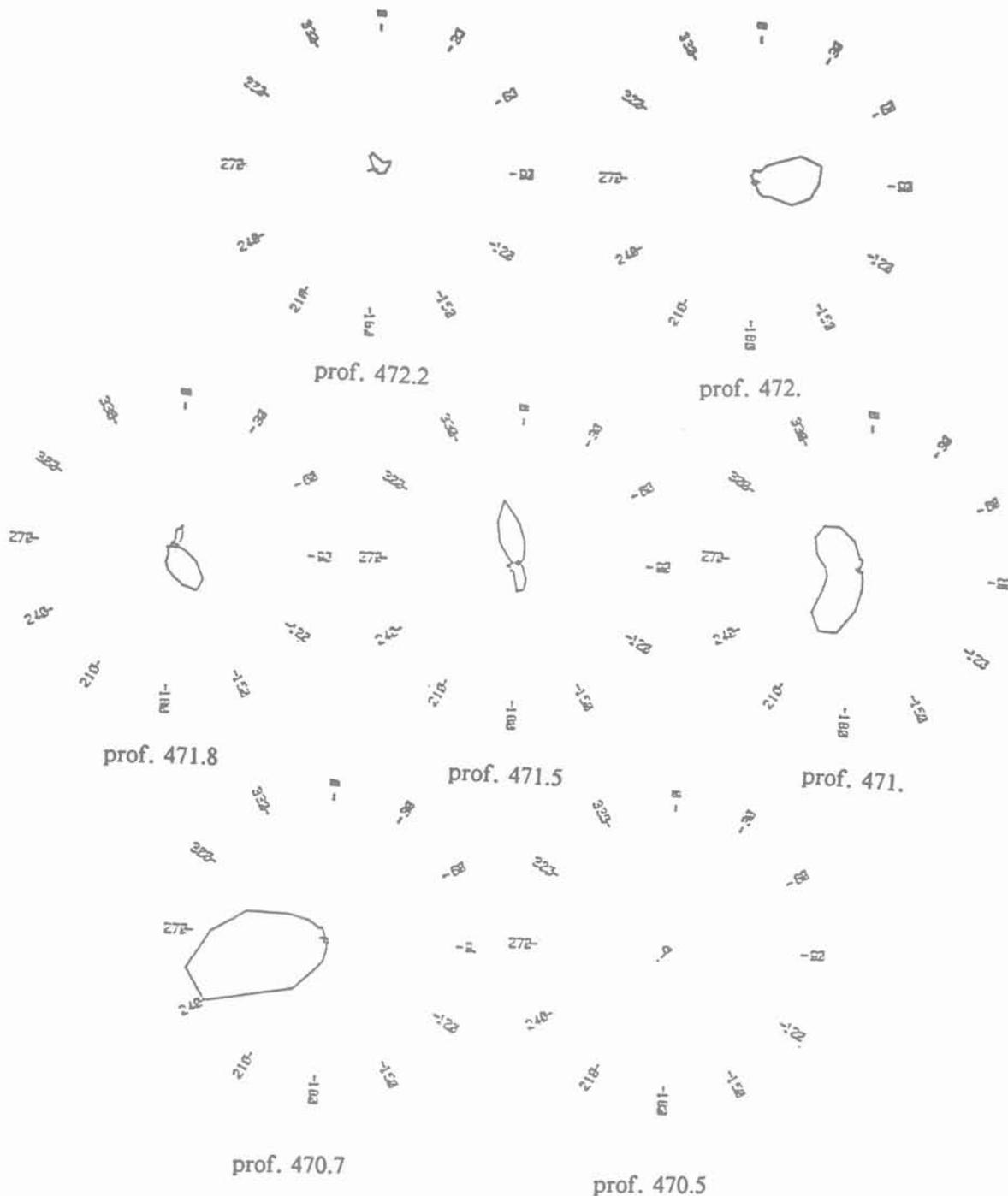


Fig. 4. — Exemple de diagramme polaire des variations azimuthales normées de l'intensité électrique mesurées entre 472 et 470 m.

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

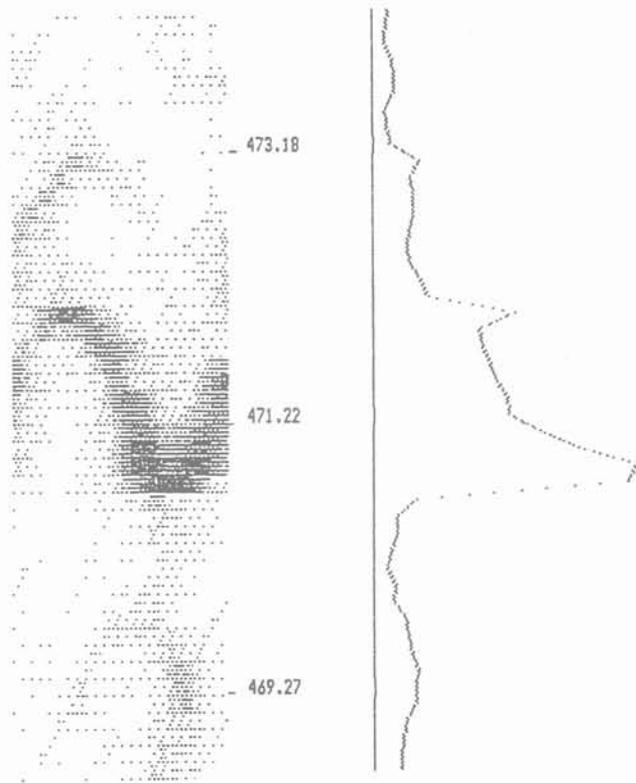


Fig. 5. — Image électrique du forage entre 472 et 470 m. La courbe de droite représente le logarithme de l'intensité totale du courant injecté.

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_i est l'amplitude de la ième 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).

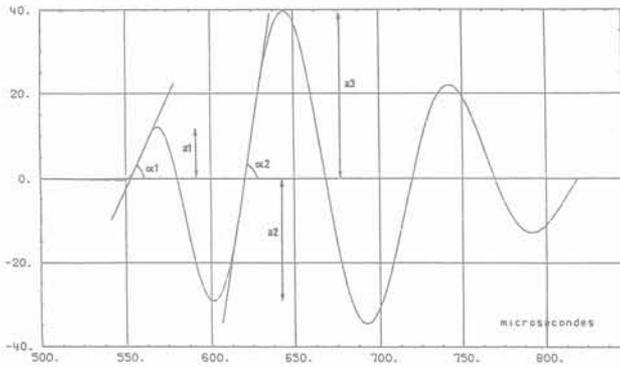


Fig. 6. — Définition de l'indice I_c utilisé pour le Darcilog (d'après Conche, 1986). Cet indice est défini soit par un rapport d'amplitudes $(a_2 + a_3)/a_1$, soit par un rapport de pentes $(tg\alpha_2/tg\alpha_1)$.

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 :

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

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 thermomètres.

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

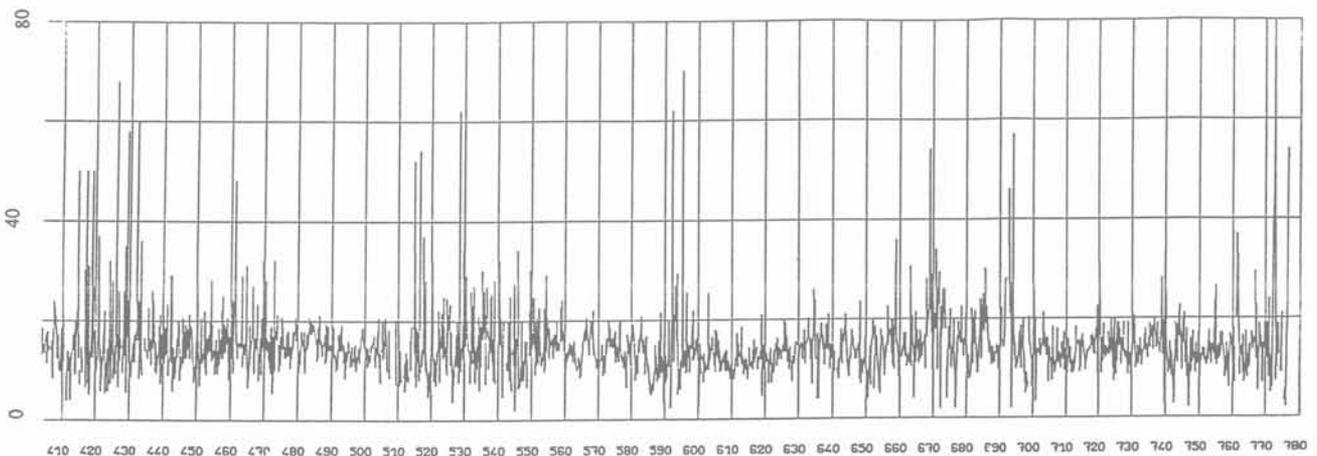


Fig. 7. — Darcilog du forage INAG III-8 avant toute stimulation hydraulique.

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

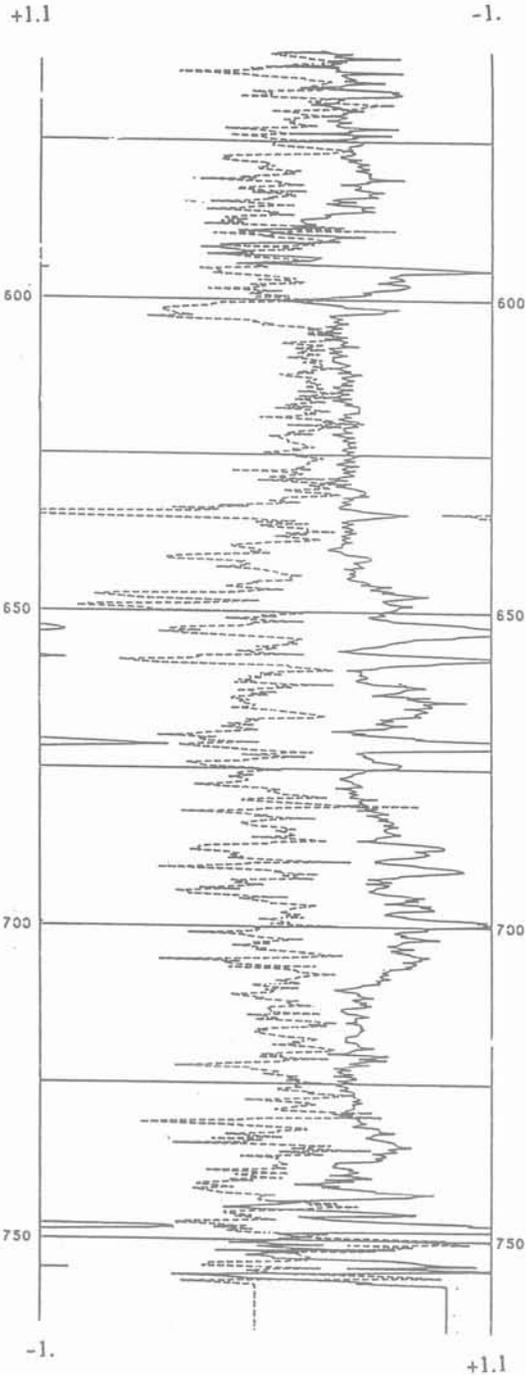


Fig. 8. — Diagraphies d'atténuation des ondes S (courbe en pointillés à gauche, variations entre + 1.1 (à gauche) et - 1) et des ondes de Stoneley (courbe en trait plein à droite, variation entre - 1 (à gauche) et + 1.1). L'atténuation est ici simplement représentée par les rapports d'amplitude du même 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 débitmétriques et thermométriques 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. DÉBITMÉTRIQUES ET THERMOMÉTRIQUES

Afin de préciser les zones les plus conductrices hydrauliquement, des débitmétriques et thermométriques 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.

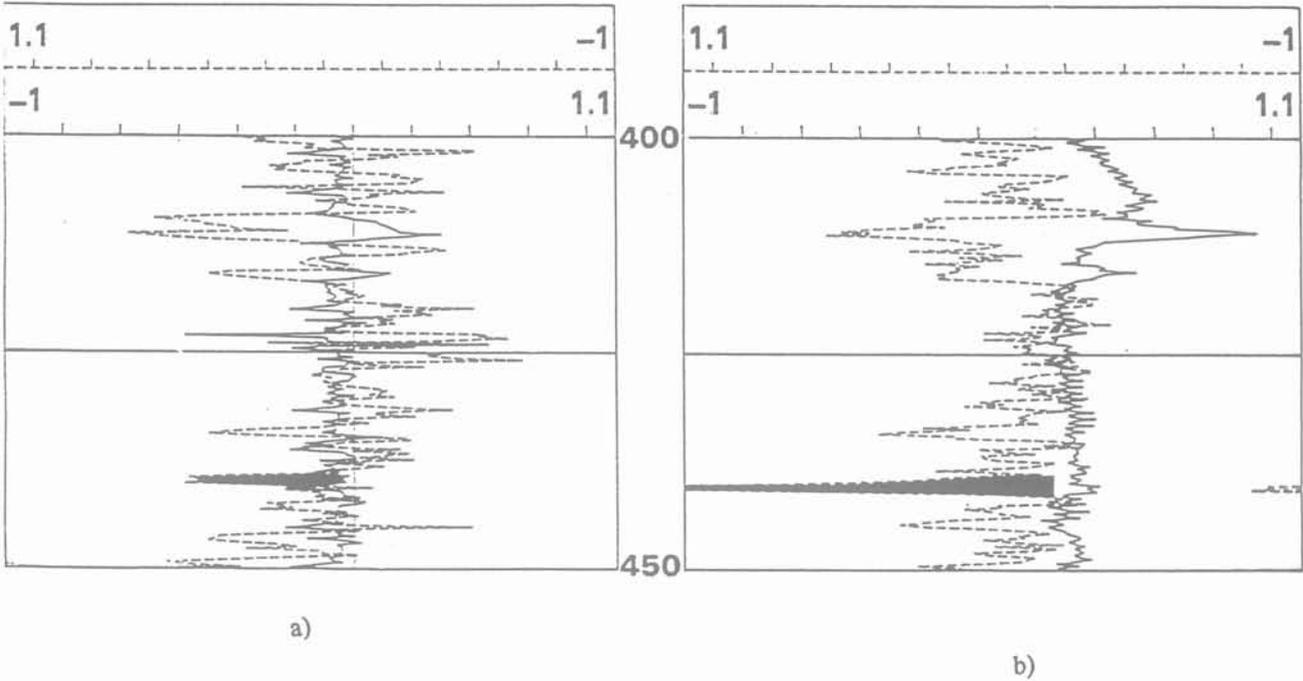


Fig. 9. — Diagraphies d'atténuation des ondes S et des ondes de Stoneley (d'après Mathieu et Arditty, 1986).
a) diagraphies réalisées avant la stimulation hydraulique à 441 m ; b) diagraphies réalisées après la stimulation hydraulique à 441 m.

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 pompages. 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

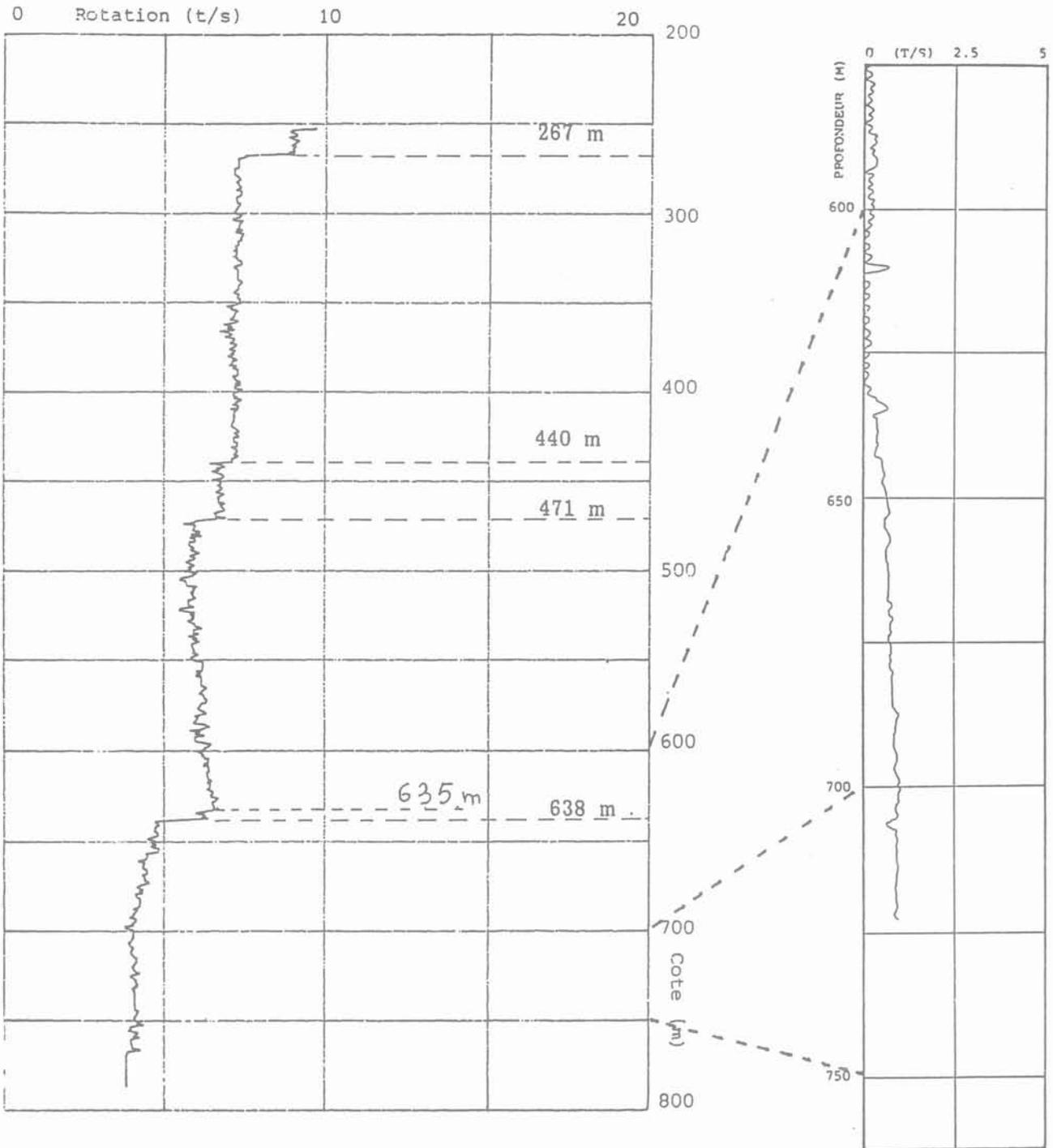


Fig. 10. — Débitmétrie du forage placé a) en condition d'injection b) en condition de production. L'axe horizontal représente les variations de vitesse de rotation du micro-moulinet (exprimées en tours par seconde).

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 diagraphie, 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 diagraphie 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

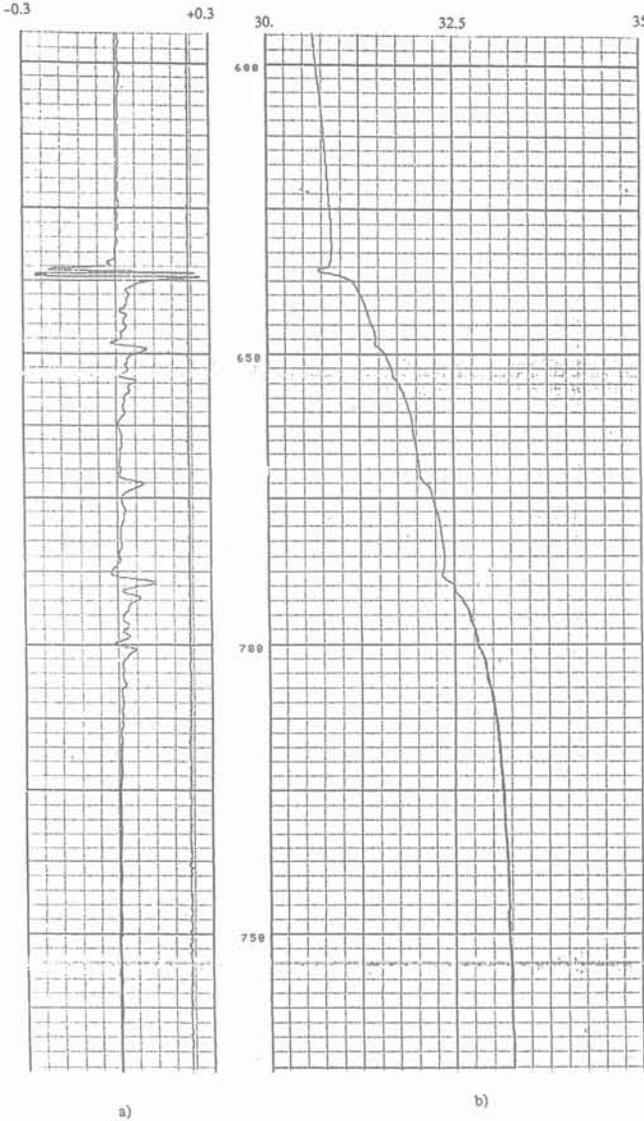


Fig. 11. — Thermométrie du forage placé en condition de production ; a) gradient géothermique (exprimé en degré celsius pour 10 mètres) ; b) température (degrés Celsius).

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 $5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 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.

TABLEAU II. — Confrontation des résultats obtenus dans le forage INAG III-8. Nous avons reporté toutes les cotes pour lesquelles la diagraphie correspondante est supposée indiquer une fracture. Z est un simple indicateur d'échelle de profondeur (en mètres).

TABLEAU II. — Results obtained in the granitic well INAG III-8. For each log, depths are indicated for which natural fractures are supposed to occur. On the extreme left, Z is only a depth scale.

| Z | cuttings | géo-chimie | température | laterolog | darcilog | Atténu-ation ondes S | Atténuation ondes de Stoneley | micro-moulinet | | Tempé-rature production |
|-----|---------------------------|--------------------|-----------------------|--|-----------------------------------|--|--|--------------------------|-------------------|---|
| | | | | | | | | injection | production | |
| 50 | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | |
| 150 | 156 163 | | 150 | | | 141 157 | | | | |
| 200 | 189 222-223 228 | 200 | 192 220 240 | 221-225 | | 170 192 206-207 222 ; 226 | 165 170 180 ; 185-88 192 221-226 | | | |
| 250 | | 260 280 | | | | 247 267 | | 267 | | |
| 300 | | | | | | 290 305 | | | | |
| 350 | 359 361 | 360 380 | 364 | 361-363 375-376 | | | 367 | | | |
| 400 | | | 410 | | 414 ; 17 ; 19 426 ; 429 432 | | 411 | | | |
| 450 | | | 440 | | | 440 | | 440 | | |
| 500 | 474 487 | 480 | 473 | | 461 | | 472 | 472 | | |
| 550 | | | | 503-506 | | | 505 | | | |
| 600 | 550 557 590 612 | 540 609-610 | | | 515 ; 516 528 | 592-595 | 595 | | | |
| 650 | 644 657 | 660-680 | | 652 ; 656 662 671 ; 73 ; 74 ; 75 ; 77 689 690 ; 95 ; 96 700 ; 702 ; 705 ; 709 710 720 | 669 | 635 648 ; 649 658 | 652 ; 657 664 671 ; 675 686 | 635 656 673 687 | 635 647 687 | 635 648 653 671 687 691 ; 699 700 |
| 700 | 704 724 | 720 | | | 692 ; 694 | 706 | 706 | | | |
| 750 | | | | 744-749 | | | 735 742 ; 747 755 | | | |
| 800 | | | | | 772 | | | | | |

Pour la diagraphie 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 débitmétrics 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 diagraphie thermique lorsque le forage était en condition de production n'apparaissent pas sur les diagraphies 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 diagraphie 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 diagraphie d'atténuation des ondes de STONELEY : si cette diagraphie 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 diagraphie électrique, aucune des diagraphies utilisées n'aura permis de caractériser de façon satisfaisante les propriétés hydrauliques des fractures. Cependant, en couplant les diagraphies 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 diagraphies, 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 diagraphies 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 débitmétrics.

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 diagraphies classiques et seules les débitmétrics 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 diagraphies 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 diagraphie 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.

POUDRES ET GRAINS

Congrès international sur la micromécanique des milieux pulvérulents organisé par l'Association pour l'étude de la micromécanique des milieux granulaires.

du 4 au 8 septembre 1989, à Clermont-Ferrand (France).

Le congrès se propose de regrouper les connaissances destinées à l'étude qualitative et quantitative du comportement mécanique d'un milieu formé de grains. Dans ce but, il réunira des scientifiques et des industriels spécialistes :

- de mécanique des sols, béton frais ;
- des céramiques, métaux frittés, produits agricoles et tous matériaux utilisés en poudre (galénique, carbone, etc.).

La micromécanique des milieux granulaires s'attache à expliquer et à prévoir le comportement mécanique global de tels milieux à partir de l'étude de leur structure et des phénomènes physiques qui régissent le comportement au niveau des grains.

Thèmes : géométrie (exacte et moyenne) — propriétés mécaniques — solutions des problèmes mécaniques pour l'ensemble des grains sans hypothèse de milieu continu équivalent — milieu continu équivalent — relation entre l'approche fondamentale et les problèmes pratiques.

Langues ; Français et Anglais

Les communications seront rassemblées par thèmes et feront l'objet d'une présentation orale.

Adresser un résumé de 300 à 500 mots en Français ou en Anglais à :

R. GOURVES — C.U.S.T. — Laboratoire de Génie civil — Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand II — Rue des Meuniers — 63170 Aubière (France) — Tél. 73.26.41.10.

caractérisation des gisements d'hydrocarbures fracturés en utilisant l'outil de diagrapie acoustique EVA (R) *

characterization of fractured hydrocarbon reservoirs
using the EVA (R) acoustic logging tool

P.C. ARDITTY, F. MATHIEU, Ph. STARON

Société Nationale Elf-Aquitaine **

Rev. Franç. Géotech. n° 45, p.p. 21-35 (octobre 1988)

Résumé

Une large expérience acquise en diagrapies acoustiques, associée aux résultats d'une recherche théorique, ont permis de développer une nouvelle méthode de caractérisation de gisements fissurés. La méthode est fondée sur l'utilisation de l'atténuation de l'onde de cisaillement (S) et de l'onde de Stoneley, deux paramètres obtenus à partir du traitement du train complet des ondes acoustiques.

La combinaison des deux paramètres permet de localiser les fractures individuelles et les zones fracturées. La propagation des ondes S et des ondes de Stoneley est fondée sur deux mécanismes physiques différents. Grâce à cela, l'utilisation combinée des deux paramètres peut aider à distinguer entre les fractures individuelles de grande ouverture et les zones fracturées conductrices (atténuation de l'onde de Stoneley) d'une part, et d'autre part les fractures individuelles d'ouverture moins importante, ou colmatées (atténuation de l'onde S). De plus nous pouvons utiliser EVA aussi bien en trou tubé qu'en trou ouvert en particulier pour l'étude de la fracturation. La méthode a été essayée avec succès sur le champ de gaz de Gaviota. L'acquisition et le traitement EVA (R) sur trois puits, ouverts ou tubés, ont aidé à localiser, ou se sont avérés la seule façon, de localiser les zones fracturées, qui, après perforation et traitements à l'acide, ont donné lieu à une production de gaz très satisfaisante.

Abstract

A new method for fractured reservoirs characterization has been developed, from a wide experience in acoustic logging and results of theoretical research. The method is based on the use of Shear (S) wave and Stoneley wave attenuation, two parameters obtained from the processing of full waveform acoustic data.

The combination of both parameters allows to locate individual fractures and fractured zones. The propagation of S-waves and Stoneley waves is based on two different physical mechanisms. Due to this, the combined use of both parameters can help discriminate between individual fractures of large aperture and conductive fractured zones (Stoneley wave attenuation), on the one hand, and individual fractures of lesser aperture, or mostly sealed (S-wave attenuation), on the other hand. Thanks to our ability to process full waveform data acquired through casing with the EVA tool, and to the fact that S-waves are the same with or without casing, fracture localization is possible in cased holes. The method was successfully tested on the Gaviota gas field, offshore Spain. Full waveform data acquisition and processing with EVA (R) for three wells, open or cased, helped locate or was the only way to locate fractured zones, which, after perforation and acid jobs, yielded a very satisfactory gas production.

* EVA (R) Évaluation des vitesses et des atténuations. Marque déposée par Elf-Aquitaine.

** Tour Elf, Cedex 45, 92078 Paris-La-Défense.

1. INTRODUCTION

Il est bien connu que de nombreux gisements d'hydrocarbures sont fracturés. La plupart des gisements fracturés sont dans des couches carbonatées, d'autres sont des gisements gréseux. Dans tous les cas, il est extrêmement important d'identifier les fractures pour optimiser la production d'huile et de gaz. Les réservoirs fracturés ont souvent une matrice de très faibles porosité et perméabilité. Dans ces cas-là, ce sont les fractures qui contribuent essentiellement à la production d'hydrocarbures, car la perméabilité des fractures est très élevée par rapport à la perméabilité de la matrice.

C'est pourquoi, si l'on veut pouvoir produire ces gisements, il est essentiel d'avoir la meilleure connaissance possible de la localisation des fractures et de leur caractérisation. En particulier, la contribution des fractures à la production est directement liée à leur ouverture, au fait qu'elles sont ouvertes ou bien colmatées.

Un effort important a été fait et ceci dans de nombreux puits, avec notre outil EVA, pour trouver une solution à ces questions en utilisant la technique des diagraphies acoustiques à train d'ondes complet. Il se trouve que les résultats sont très encourageants.

Dans le présent article, nous décrivons l'outil EVA, les techniques de détection et d'analyse des fractures que nous avons mises au point à partir d'environ 20 exemples différents, et nous présenterons l'étude d'un cas où le succès obtenu a été particulièrement intéressant.

2. DESCRIPTION DE L'OUTIL ACOUSTIQUE EVA, ACQUISITION DES DONNÉES ET TRAITEMENT

EVA est un outil de diagraphie acoustique à train d'ondes complet multi-émetteurs et multi-récepteurs (fig. 1) (ARDITTY et al., 1984). La diversité des espacements (distances entre émetteur et récepteur) permet à la fois l'analyse de la cimentation (faibles espacements) et la pénétration dans la zone vierge de la formation (espacements importants), ainsi qu'une bonne séparation des ondes. Sur la figure 2, on peut facilement voir les ondes P, S et de Stoneley. Certaines de ses caractéristiques principales sont une numérisation en surface, à virgule flottante instantanée de 12 bits, une large bande de fréquences (1-25 kHz) et une structure flexible, ce qui permet d'enregistrer des diagraphies dans des puits très déviés et tubés. Un gamma-ray combiné permet aussi d'effectuer des corrélations avec d'autres diagraphies (fig. 3).

L'acquisition des données se fait à un rythme élevé (près de vingt traces de 2 500 échantillons chaque, par seconde). Les couples émetteur-récepteur (E-R) sont sollicités en séquentiel si bien qu'un seul signal est enregistré à la fois.

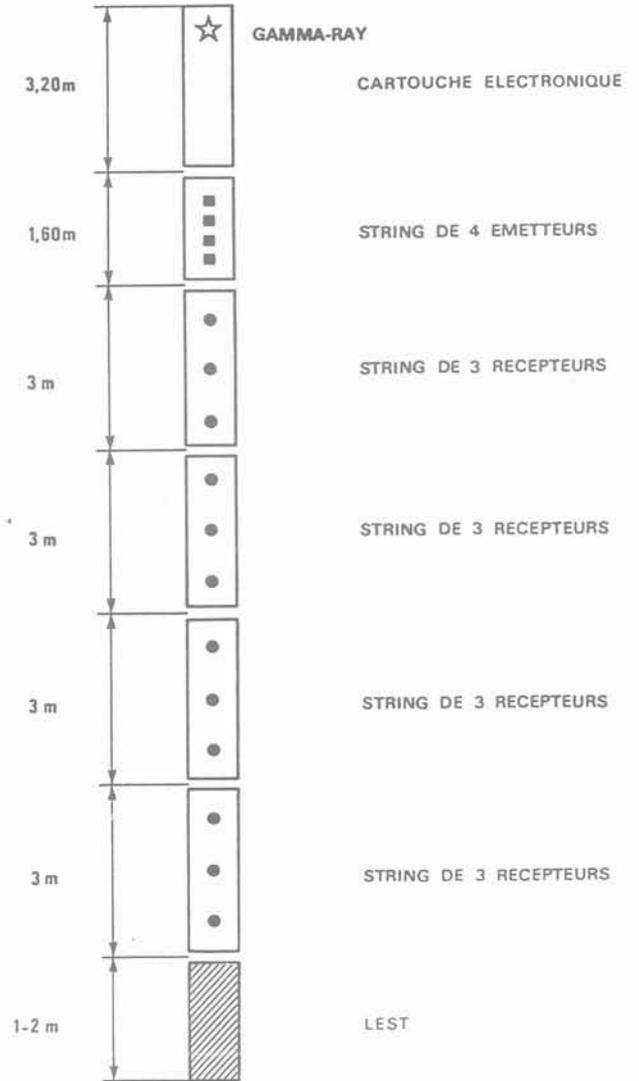


Fig. 1. — Diagramme schématique de l'outil.
Fig. 1. — Tool schematic Diagram.

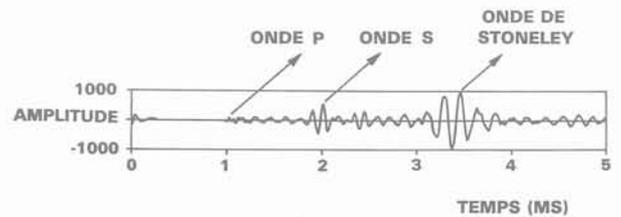


Fig. 2. — Exemple d'un trajet enregistré. Les trois types d'ondes (P, S, Stoneley) sont visibles.
Fig. 2. — Example of a recorded trace. The 3 types of waves (P, S, Stoneley) are visible.

La séquence type de déclenchement est obtenue avec 48 couples ER ayant un espacement qui augmente régulièrement (4 émetteurs × 12 récepteurs). La procédure d'acquisition répète une séquence donnée tandis que l'outil progresse vers le haut. La figure 4 montre l'alignement des ondes sur trois séquences standard

| | |
|------------------------------------|---------------------------|
| NOMBRE D'EMETTEURS | 4 (MAGNETOSTRICTIFS) |
| NOMBRE DE RECEPTEURS | 12 (RECEPTEURS CERAMIQUE) |
| OFFSET MINIMUM | 1 m |
| OFFSET MAXIMUM | 12,75 m. |
| PAS D'ECHANTILLONNAGE | 5 µ sec. |
| VITESSE D'ENREGISTREMENT | |
| MIN. | 2 m/minute |
| MAX. | 20 m/minute |
| BANDE DE FREQUENCE | 1 kHz - 25 kHz |
| AUTRE LOG ENREGISTRE SIMULTANEMENT | GAMMA-RAY |
| LONGUEUR TOTALE | 18 m |
| POIDS TOTAL | 300 kg |
| DIAMETRE DE L'OUTIL | 0. 1m (4") |
| LIMITE DE TEMPERATURE (Provisoire) | 125°C |

Fig. 3. — Caractéristiques d'EVA.
Fig. 3. — EVA characteristics.

successives dans une même lithologie (vitesse de l'onde = espacement/temps). Une section iso-espacement ou iso-offset est obtenue en prenant le même couple ER, et donc le même espacement, dans chaque séquence, pendant que l'outil progresse vers le haut. La succession des traces obtenues de cette façon constitue une illustration des changements de lithologie le long du puits (fig. 5). Le traitement informatique bénéficie de la multiplicité des offsets pour éliminer des artefacts de diagraphies soniques classiques comme les sauts de cycle, et il donne des images des couches à différentes profondeurs d'investigation (casing et cimentation, zones envahies, formation vierge ou limites des couches dans des puits fortement déviés).

Les paramètres classiques traités sont les lenteurs, amplitudes et périodes de 3 types d'ondes (P, S, Stoneley) : fig. 6.

La combinaison d'un schéma d'acquisition spécialement mis au point et d'un traitement adapté permet de compenser les irrégularités des parois du puits : une valeur de lenteur donnée, pour une profondeur donnée, est la moyenne des échantillons de lenteur obtenue à partir de deux émetteurs et un récepteur commun et de deux récepteurs et un émetteur commun.

Les courbes d'amplitude et de période sont plus lisses que les courbes de lenteur car elles prennent en compte la partie de la formation située entre l'émetteur et le récepteur, qui varie de 1 à 12,75 mètres. Ces dernières, par contre, ont une résolution bien meilleure car un point traité ne représente qu'une épaisseur de formation de 25 cm.

Cependant, la résolution de la diagraphie d'amplitude peut être ramenée au standard de la lenteur (25 cm) en calculant un log e d'atténuation. Dans un tel log, on obtient un point de mesure en effectuant le rapport des amplitudes à un récepteur proche, et un récepteur plus éloigné, distants de 25 cm.

Le calcul de l'atténuation est fondé sur la relation suivante :

$$A = \frac{C e^{-(az + b)}}{z^n}$$

où A est l'amplitude de l'onde à un récepteur donné, C un coefficient constant, z la distance entre le récepteur et la référence.

L'atténuation est définie par a, b et n : « a » est l'atténuation intrinsèque, celle que nous voulons finalement obtenir, « b » est un coefficient de couplage dépendant de l'atténuation juste devant l'émetteur ou le récepteur ; « n » représente la dispersion géométrique, et on l'estime à partir d'une combinaison de considérations théoriques et de l'expérience. En s'appuyant sur les hypothèses que les couplages à l'émetteur et au récepteur sont sensiblement égaux, un schéma de compensation permet d'éliminer le couplage et de calculer l'atténuation intrinsèque (a).

3. DÉTECTION DES FRACTURES DANS LES FORMATIONS CRISTALLINES. MÉTHODOLOGIE

A ce jour, de nombreux articles ont été publiés pour montrer que les diagraphies acoustiques à train d'ondes complet sont sensibles aux zones fracturées dans les formations cristallines (PAILLET, 1980 ; DAVISON et al., 1982 ; ARDITTY et al., 1985 ; CORNET et al., 1987). Dans ce type de situation, la lithologie et les rayons du puits sont relativement constants. PAILLET (1980), DAVISON et al. (1980), ARDITTY et al. (1985), ont mis en lumière la corrélation entre la décroissance de l'amplitude de l'onde de Stoneley et la présence de zones fracturées, comme cela était prouvé par des carottes et d'autres diagraphies.

Un mécanisme plus simple (MATHIEU et TOKSOZ, 1984, 1987) relie l'ouverture de la fracture à l'atténuation des ondes de Stoneley. Si l'on dispose des données d'atténuation, il devient alors possible d'estimer quantitativement les ouvertures des fractures (ARDITTY et al., 1985). Dans un cas isolé, où l'on disposait à la fois des données d'atténuation et des données de perméabilité de la fracture calculées à partir des résultats d'un essai de production sous packer, (DAVISON et al., 1982), on a constaté une bonne concordance entre les ouvertures de fractures obtenues des deux façons (MATHIEU et TOKSOZ, 1984, 1987).

Ceci établit donc le fait que l'atténuation des ondes de Stoneley peut être considérée comme une bonne indication de présence de fractures ouvertes.

L'outil EVA a été descendu dans deux puits profonds de 800 mètres dans des formations cristallines du centre de la France, et les données ont été traitées comme expliqué précédemment. La comparaison d'une section iso-offset et des diagraphies de résistivité dans le puits A (fig. 7) montre clairement que les trois ondes sans distinction (P, S et Stoneley) subissent une très importante atténuation dans les zones conductrices associées aux fractures dans ce type de formation. Une analyse plus précise peut être effectuée sur les résultats d'atténuation après traitement, en les comparant aux indicateurs de fractures. Les pics d'atténuation ne ressortent pas clairement de l'allure générale de la courbe et celle-ci

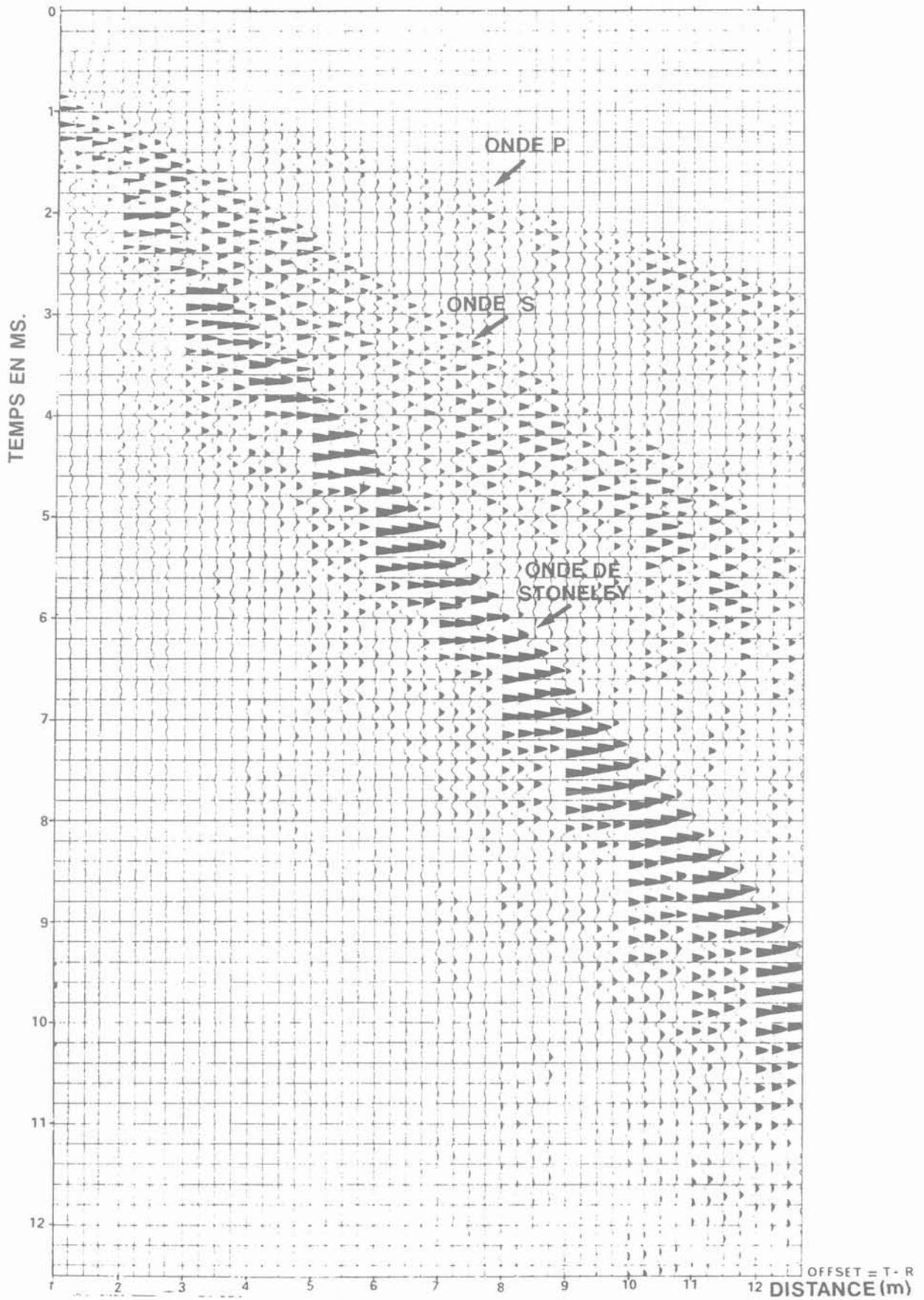


Fig. 4. — Séquence standard à 48 traces.
Fig. 4. — Standard 48-trace sequence.

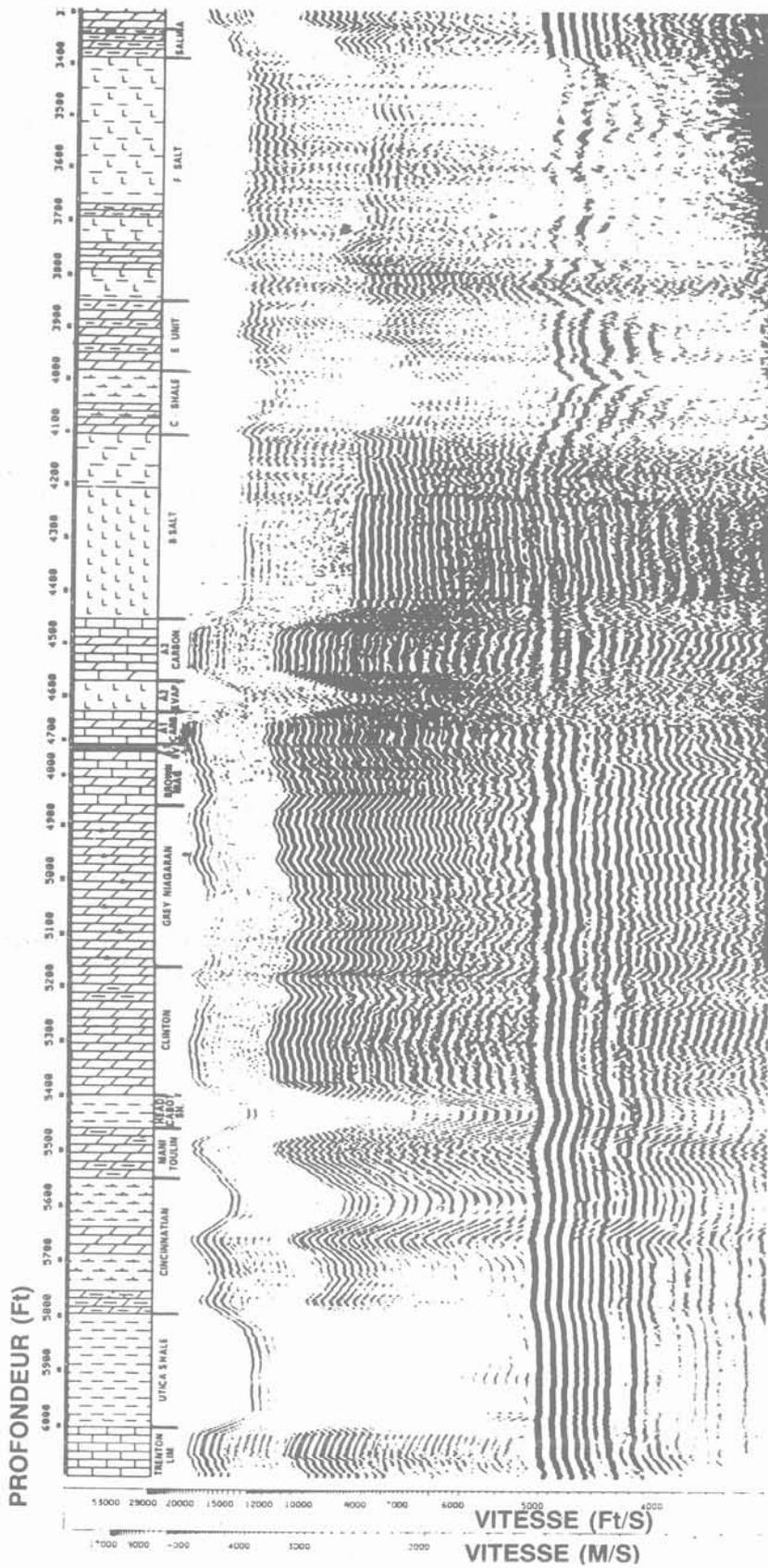


Fig. 5. — Comparaison entre lithologie et enregistrements EVA (offset 12.75 m).
 Fig. 5. — Comparison between lithology and EVA recordings (offset 12.75 m).

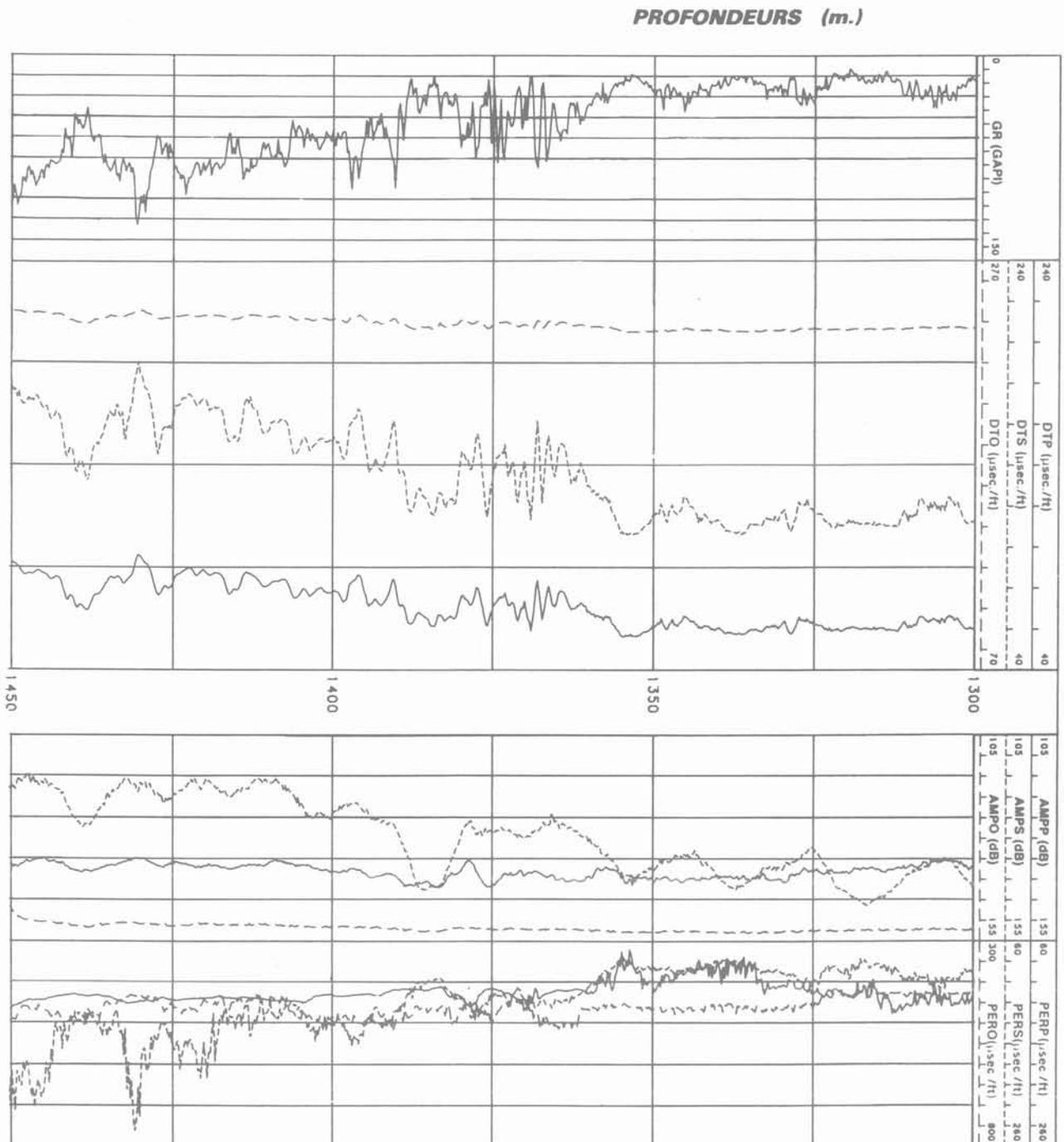


Fig. 6. — Résultats d'EVA après traitement.
Fig. 6. — EVA processing results.

est trop erratique pour être facilement exploitée. Cette observation combinée à notre expérience relative à des lithologies plus complexes où l'atténuation de l'onde P dépend beaucoup des variations de la lithologie, nous conduit à ne pas retenir ce facteur comme un indicateur de fractures.

A l'inverse, l'atténuation des ondes S et de Stoneley sont toujours corrélables avec des indicateurs de fractures (fig. 8). L'atténuation des ondes de Stoneley, aux

profondeurs de 478 m, 649 m, 782 m, 804-807 m, et 819 m se produit seulement quand la preuve de la conductivité est apportée par des mesures au débitmètre, ou une invasion d'eau en cours de forage — la variation notée à 220 m se trouvait au-dessus du plan d'eau.

D'après les cas ci-dessus, ces variations indiquent des fractures ouvertes ou des zones fracturées perméables. A noter que les ondes S aussi sont atténuées au niveau

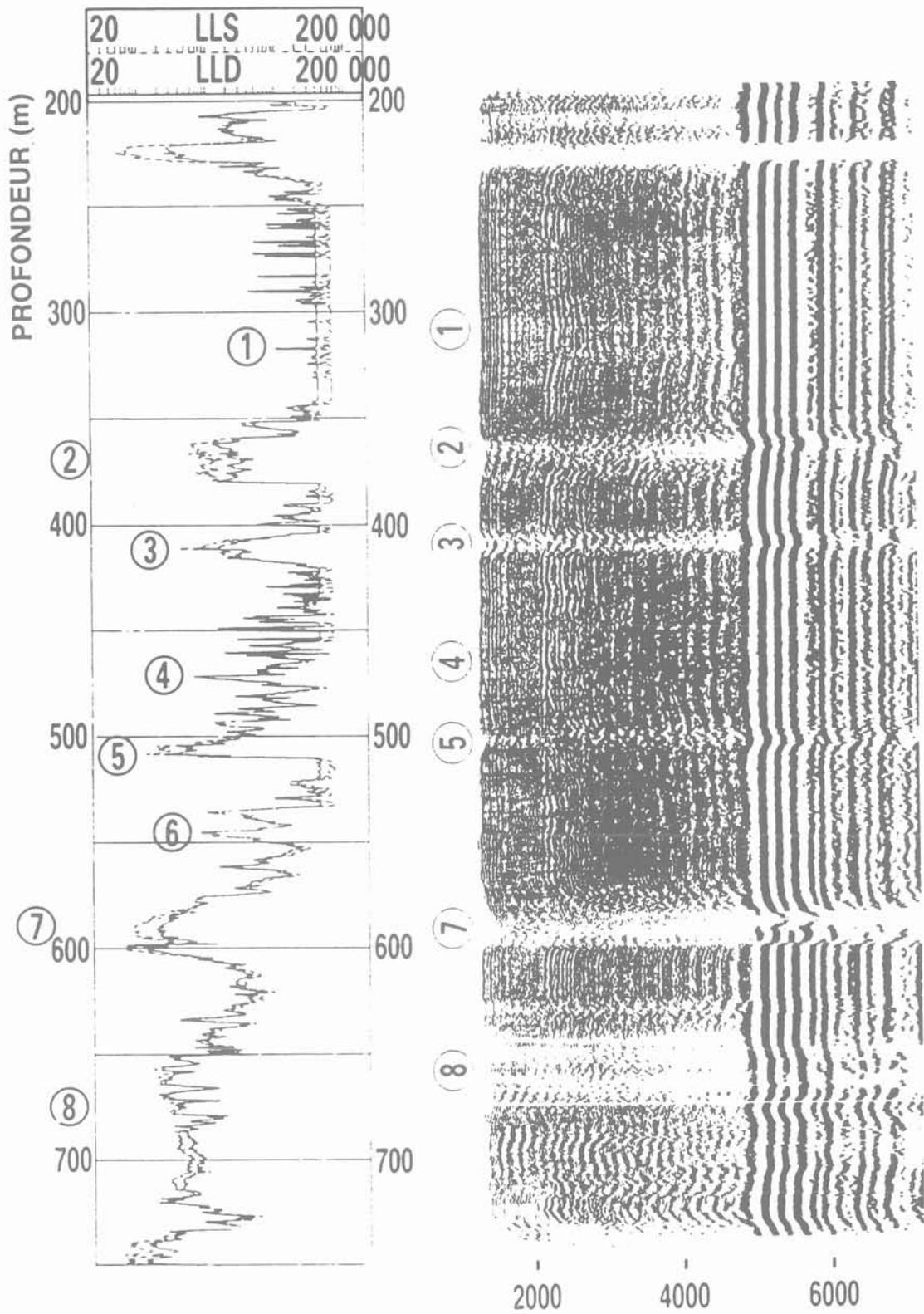


Fig. 7. — Section iso-offset comparée à des diagraphies de résistivité dans le granit (puits A).
 Fig. 7. — Iso-offset section versus resistivity logs in granite (well A).

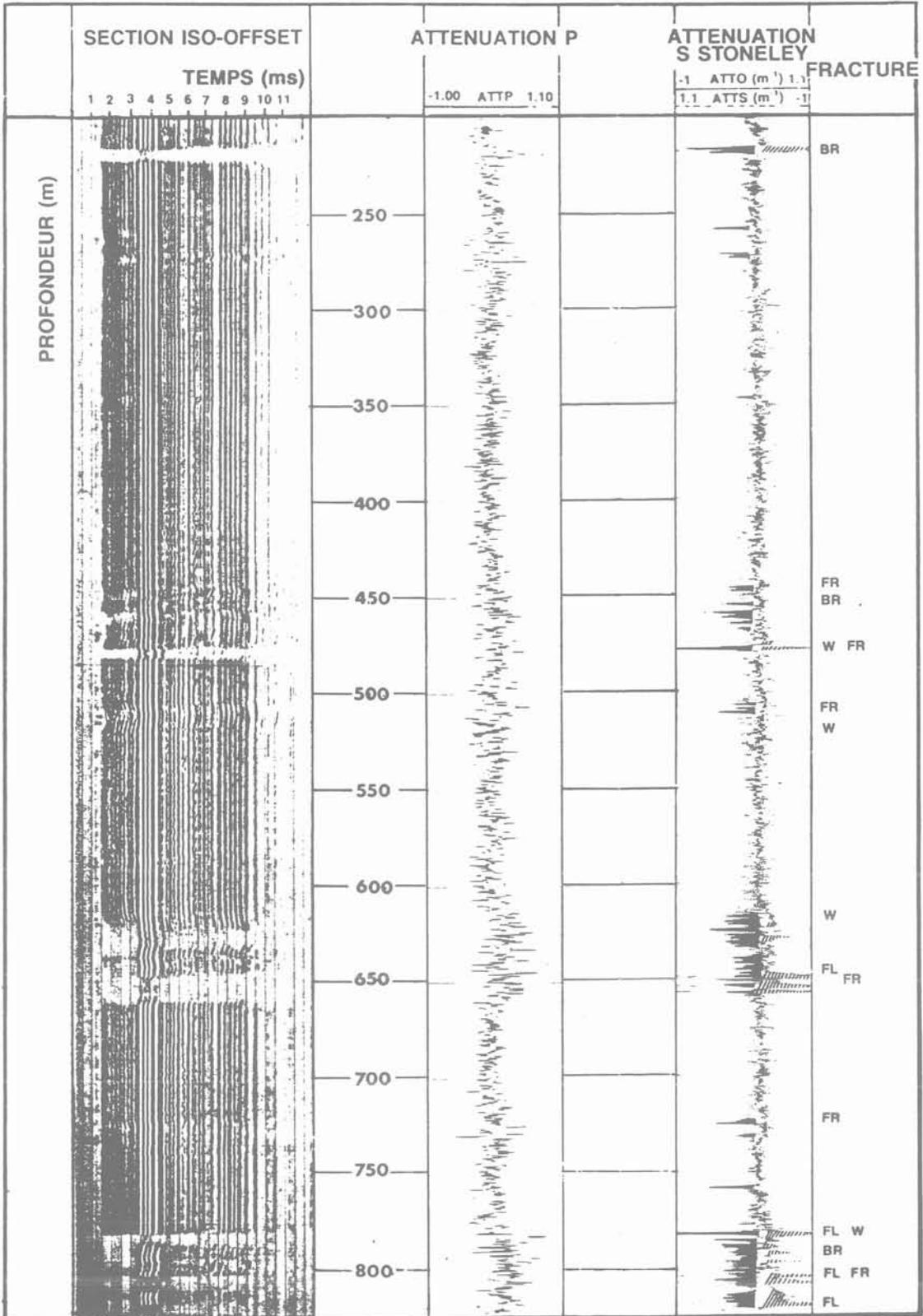


Fig. 8. — Détection de fractures avec EVA dans du granit (puits B).

Fig. 8. — Fracture detection with EVA in granite (well B).

de ces zones. De plus elles sont aussi atténuées en face de zones où les ondes de Stoneley ne le sont pas. En fait, les ondes S devraient physiquement disparaître

en se propageant à travers un modèle simplifié d'une couche fluide fine située entre les deux couches d'une formation élastique (fig. 9).

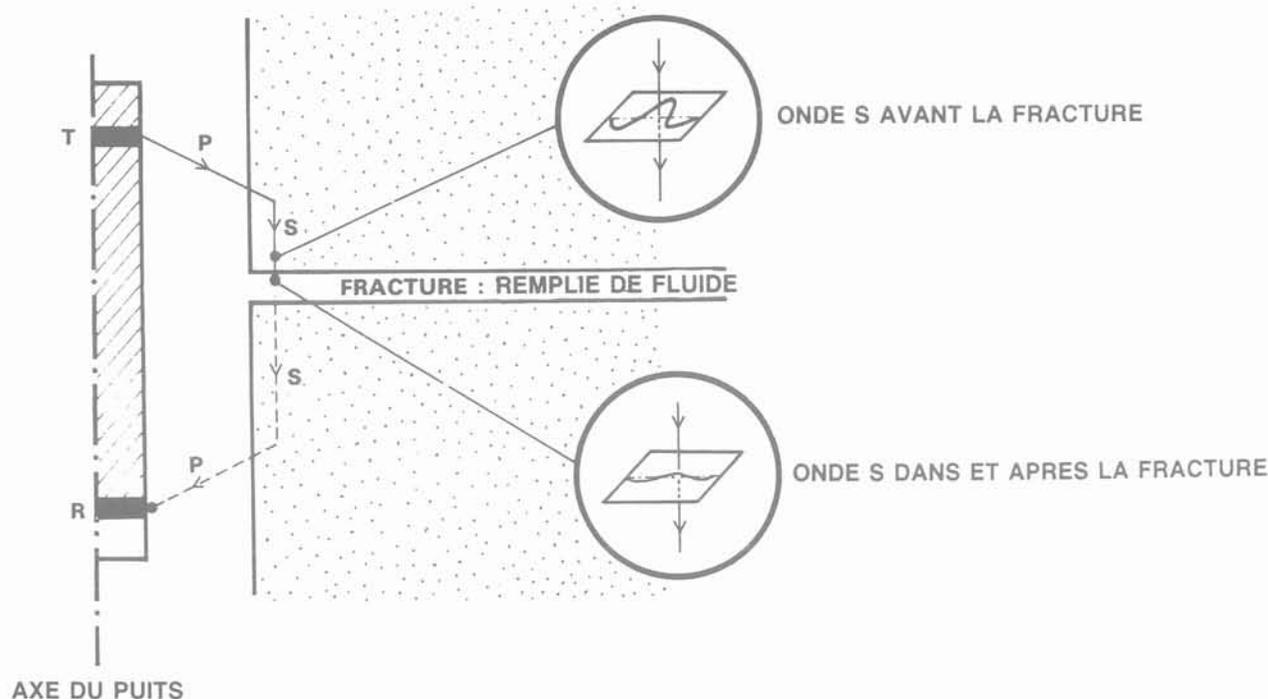


Fig. 9. — Modèle physique simple pour la propagation d'une onde S à travers une fracture.

Fig. 9. — Simple physical model for the propagation of an S wave through a fracture.

C'est pourquoi nous pensons que les ondes S qui se propagent à travers des fractures très faiblement ouvertes, par exemple des fractures pratiquement remplies de calcite, peuvent être très fortement atténuées, tandis que les ondes de Stoneley ne subissent pas d'atténuation. Les ondes S sont ainsi un bon indicateur de fractures, ouvertes ou presque fermées, de zones fracturées dont la conductivité pourrait être activée par des moyens appropriés, comme la fracturation hydraulique (CORNÉT et al., 1987).

Cette analyse des ondes acoustiques obtenues avec EVA dans des formations cristallines nous amène à conclure que le meilleur indicateur d'une fracturation est la combinaison des ondes S et des ondes de Stoneley.

4. DÉTECTION DES FRACTURES DANS UN GISEMENT CARBONATÉ A GAZ : UN CAS PRATIQUE

4.1. Description du champ de gaz

Le champ de gaz de Gaviota est situé dans l'Océan Atlantique au large de l'Espagne. Le gisement est dans le crétacé supérieur, essentiellement dans une formation carbonatée. La zone a une structure tectonique complexe et les données sismiques de surface sont de mauvaise qualité.

4.2. Détection des fractures dans les puits Gaviota 5, 6 et 7

Dans le cas de Gaviota 5, le problème de la détection des fractures était devenu très important car la porosité de la matrice était très faible. La meilleure façon de produire le gaz trouvé était de le faire à travers les fractures.

Il était donc essentiel de les localiser avec précision pour effectuer les perforations et acidifier. Dans ce premier puits, on a enregistré certaines diagraphies classiques (fig. 10), qui ont montré une zone supérieure fortement fracturée, la zone A. Cependant rien ne fut détecté dans la partie inférieure du puits où les ingénieurs de production souhaitaient perforer.

Un passage d'EVA fut effectué après ces diagraphies et la section iso-offset montra la fracturation de la zone supérieure (la zone A), plus quelques zones atténuées, moins importantes, plus bas dans le puits, que nous avons interprétées comme étant fracturées (fig. 11).

Après traitement complet des données, nous avons obtenu des atténuations des ondes S et de Stoneley qui sont caractéristiques de fracturation, comme cela a été expliqué dans les paragraphes précédents.

Cependant, avant d'interpréter ces données, nous avons d'abord examiné la lithologie, car la fracturation pouvait avoir un effet sur l'atténuation des ondes S et de Stoneley, analogue à celui d'un changement de lithologie (passage d'un calcaire à un calcaire argileux, par exemple).

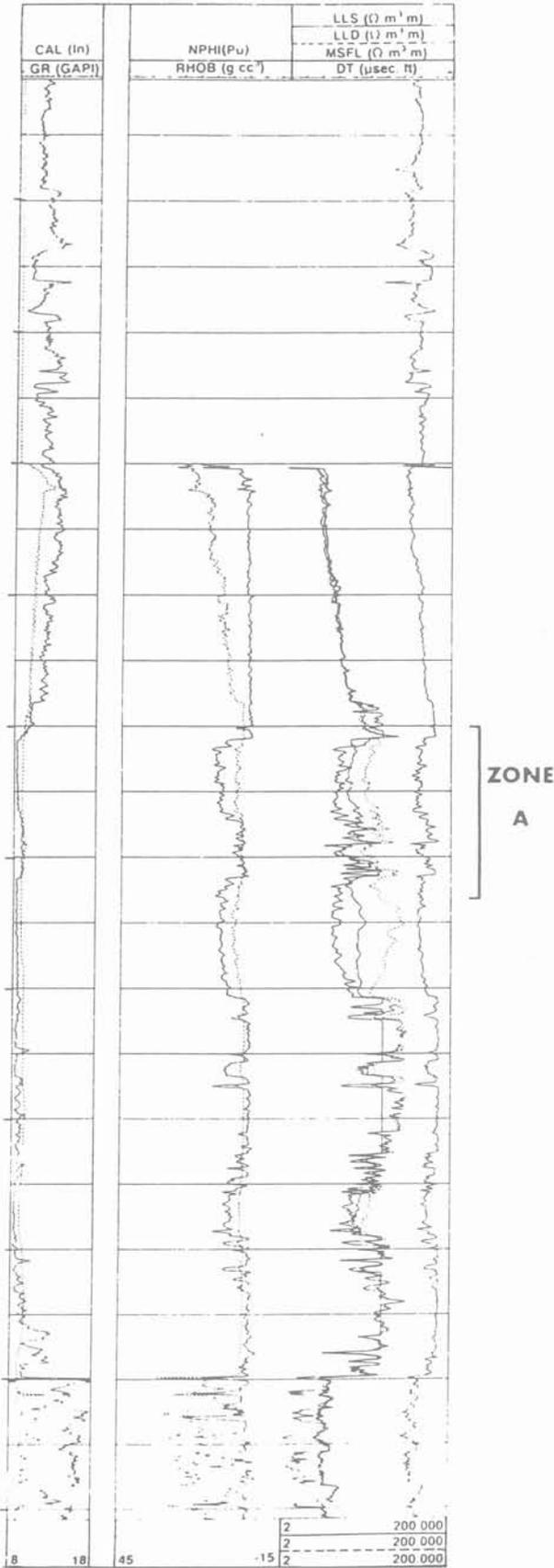


Fig. 10. — Diagraphies conventionnelles pour Gaviota 5.
Fig. 10. — Conventional logs for Gaviota 5.

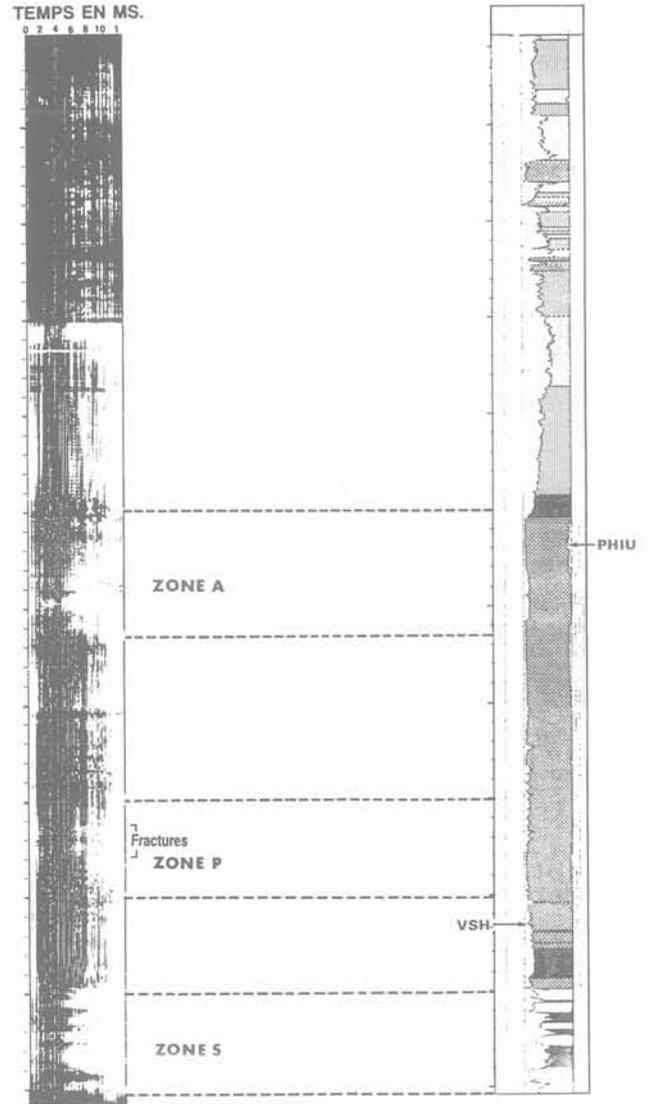


Fig. 11. — Section iso-offset et colonne lithologique tirée d'EVA pour Gaviota 5.

Fig. 11. — Iso-offset section and lithologic column from EVA for Gaviota 5.

En utilisant essentiellement l'amplitude, la période et la vitesse des ondes P, S et de Stoneley, nous avons obtenu une colonne lithologique pour ce puits, qui nous a permis de faire la différence entre variations lithologiques et fractures (fig. 11). La colonne lithologique est limitée par la courbe Vsh d'un côté, et la courbe PHIU (porosité vraie) de l'autre. La comparaison de la colonne lithologique (fig. 11) avec la diagraphie ATTO-ATTS (fig. 12) a montré les effets que nous venons de mentionner (les échelles de profondeur sont les mêmes), dans la zone S où les courbes ATTS et ATTO comportent des pics qui correspondent à des zones argileuses et non pas à des fractures.

Une fois ceci fait, les courbes ATTO/ATTS ont pu être interprétées en toute sécurité et les fractures ont été identifiées par les pics d'atténuation des ondes de cisaillement (fig. 12).

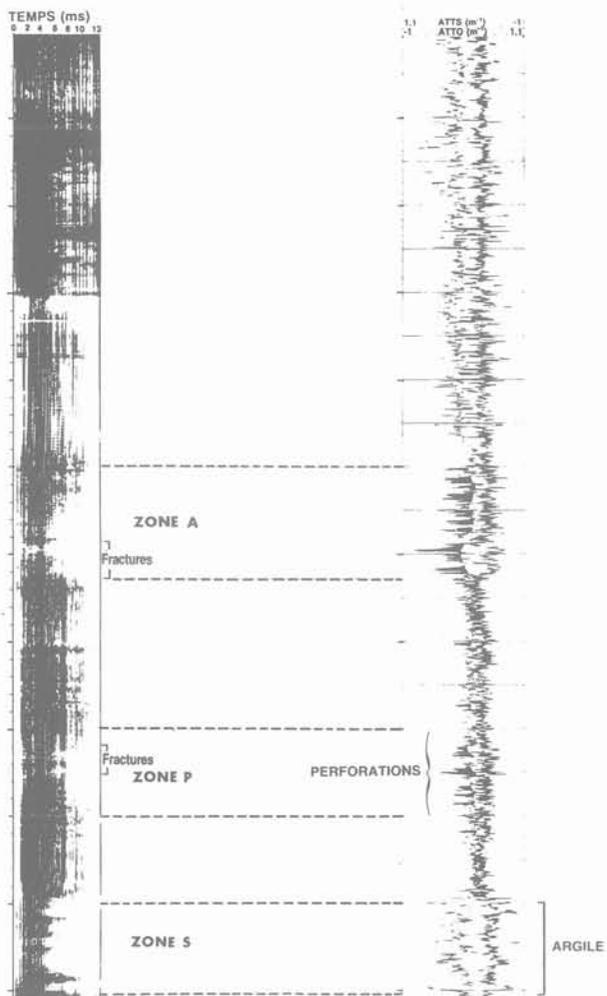


Fig. 12. — Section iso-offset et diagraphe de fracturation pour Gaviota 5, avec indication des zones perforées.
 Fig. 12. — Iso-offset section and fracturation log for Gaviota 5 with indication of perforated zone.

Les courbes ATTS et ATTO comportaient un pic dans la zone A. Ceci signifiait que nous étions en présence d'une fracture (hydrauliquement conductive).

Seules les courbes ATTS comportaient des pics correspondant à des fractures dans la zone P. Ceci signifiait que les fractures étaient probablement colmatées. Cependant nous verrons qu'après acidification, elles produiront du gaz.

Les ingénieurs de production ayant décidé de faire produire la partie inférieure du gisement, des perforations ont été effectuées dans la zone P (fig. 12). Après acidification, l'AOFP (potentiel absolu d'écoulement trou ouvert) à la pression initiale était de $5,2 \times 10^6$ Nm³/jour, (192×10^6 SCFD). Ceci était bien la preuve que ce puits était effectivement fracturé là où les perforations avaient été effectuées.

Un deuxième puits : Gaviota 6, fut foré deux mois plus tard et on s'attendait à ce qu'il soit « facile à forer ». Mais en fait, à cause de son importante déviation et de problèmes inattendus en cours de forage, il fut tubé avant toute opération de diagraphe en trou ouvert.

L'opérateur décida alors de descendre un outil EVA, et tous les espoirs reposaient sur cet enregistrement. La diagraphe à rayons gamma (GR) fut effectuée derrière le tubage et se corréla en fait avec la diagraphe EVA/GR, si bien que les profondeurs purent être vérifiées.

Après l'acquisition des données dans ce trou dévié et tubé, un traitement complet fut effectué. Les données étaient de très bonne qualité.

On appliqua à Gaviota 6 la même procédure qu'à Gaviota 5. On trouvera sur la figure 13, la section iso-offset et la colonne lithologique présentées de la même façon que pour Gaviota 5.

Sur la section, on peut faire quelques observations directes :

— il y a une zone atténuée importante (zone E), ainsi que d'autres zones avec une certaine atténuation (zones B, C).

A partir des résultats quantitatifs, nous avons clairement identifié la fracturation. A l'inverse de Gaviota 5, les ingénieurs de gisement ne voulaient pas produire la zone C, zone la plus fracturée du puits, parce que trop basse et trop proche du contact gaz/eau. Dans Gaviota 6, ils souhaitaient produire la partie haute du gisement.

Des perforations ont été décidées et effectuées sélectivement à 4 profondeurs différentes autour de la zone B : P1, P2, P3, P4 (fig. 14), chaque zone étant centrée sur le pic ATTS et couvrant quelques mètres. Une fois encore, une acidification fut effectuée et l'AOFP à la pression initiale fut de 6×10^6 Nm³/jour (soit : 213×10^6 SCFD).

Après ces deux résultats, on enregistra aussi sur le troisième puits, Gaviota 7, une diagraphe EVA (d'autres diagraphe furent effectuées en trou ouvert, mais pour gagner du temps EVA fut enregistré derrière tubage). Les résultats finaux sont donnés figure 15.

Une fois de plus, la section iso-offset nous a permis de déceler certaines zones fracturées (H, I, J), mais il fallut attendre les résultats complets du traitement pour identifier clairement les différentes fractures. Alors que les zones poreuses étaient détectées à la fois par les diagraphe classiques et par EVA, seul EVA pouvait voir les fractures. Sur ce troisième puits, les perforations P1, P2 et P3 ont été effectuées en face des zones poreuses et des fractures. La zone poreuse se voit sur la section iso-offset (zone G) grâce à la faible diminution de la vitesse P, qui n'apparaît pas dans le cas des fractures.

Ces puits ont un AOFP, à pression initiale de 80×10^6 Nm³/jour soit 2857.10^6 SCFD.

Ces trois puits ont été complétés avec un liner de complétion de 5" 1/2 et avec ce type de complétion, il a été possible d'atteindre un débit de 2×10^6 Nm³/jour avec un seul puits.

La conclusion concernant ce cas pratique fut la suivante : les plans initiaux prévoyaient de développer le champ de Gaviota avec 6 puits producteurs. En fin de compte, grâce à l'excellent débit de Gaviota 5, 6 et 7, il n'est plus envisagé de forer de nouveaux puits dans le proche avenir.

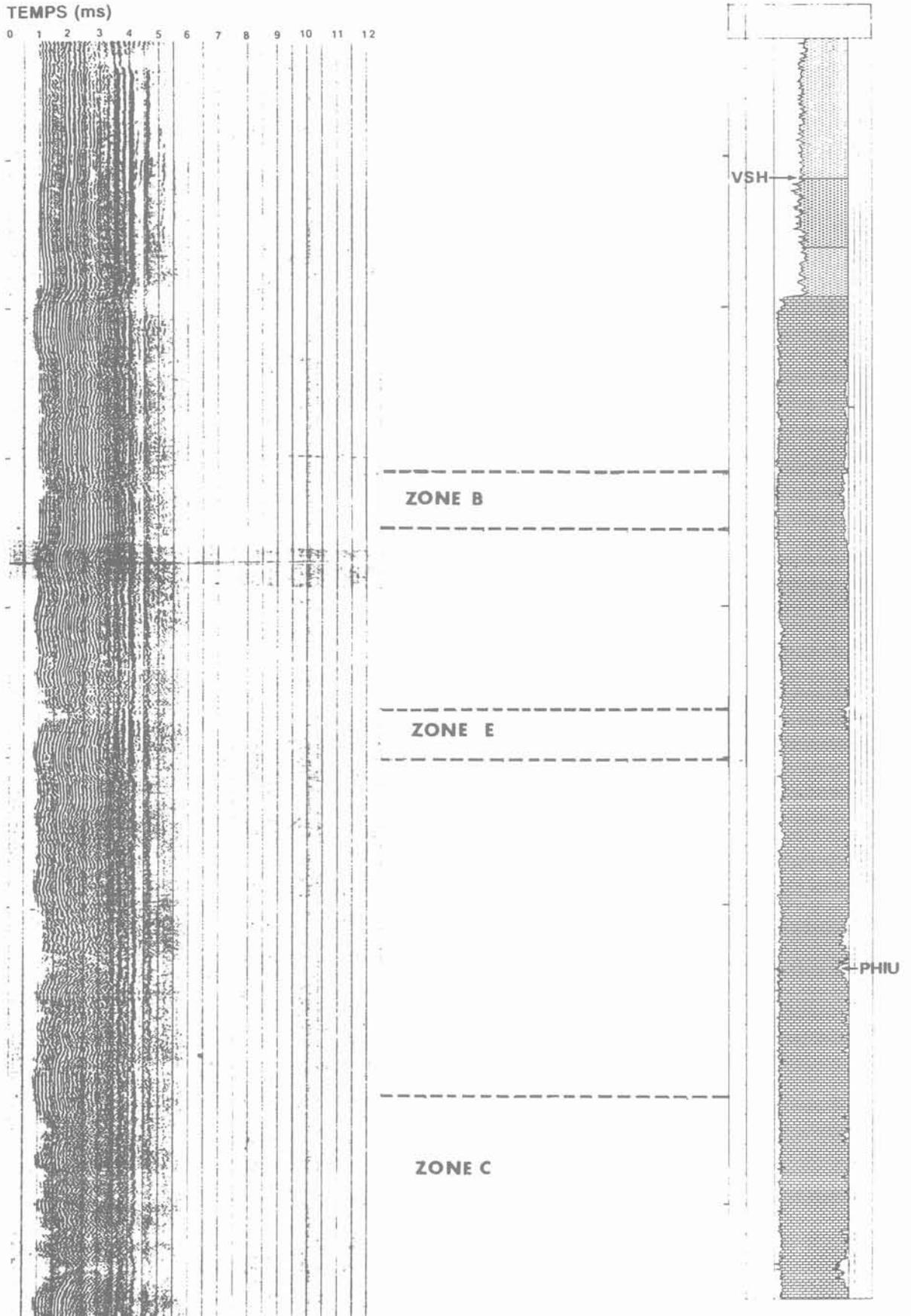


Fig. 13. — Section iso-offset et lithologie tirée d'EVA pour Gaviota 6.

Fig. 13. — Iso-offset section and lithology from EVA for Gaviota 6.

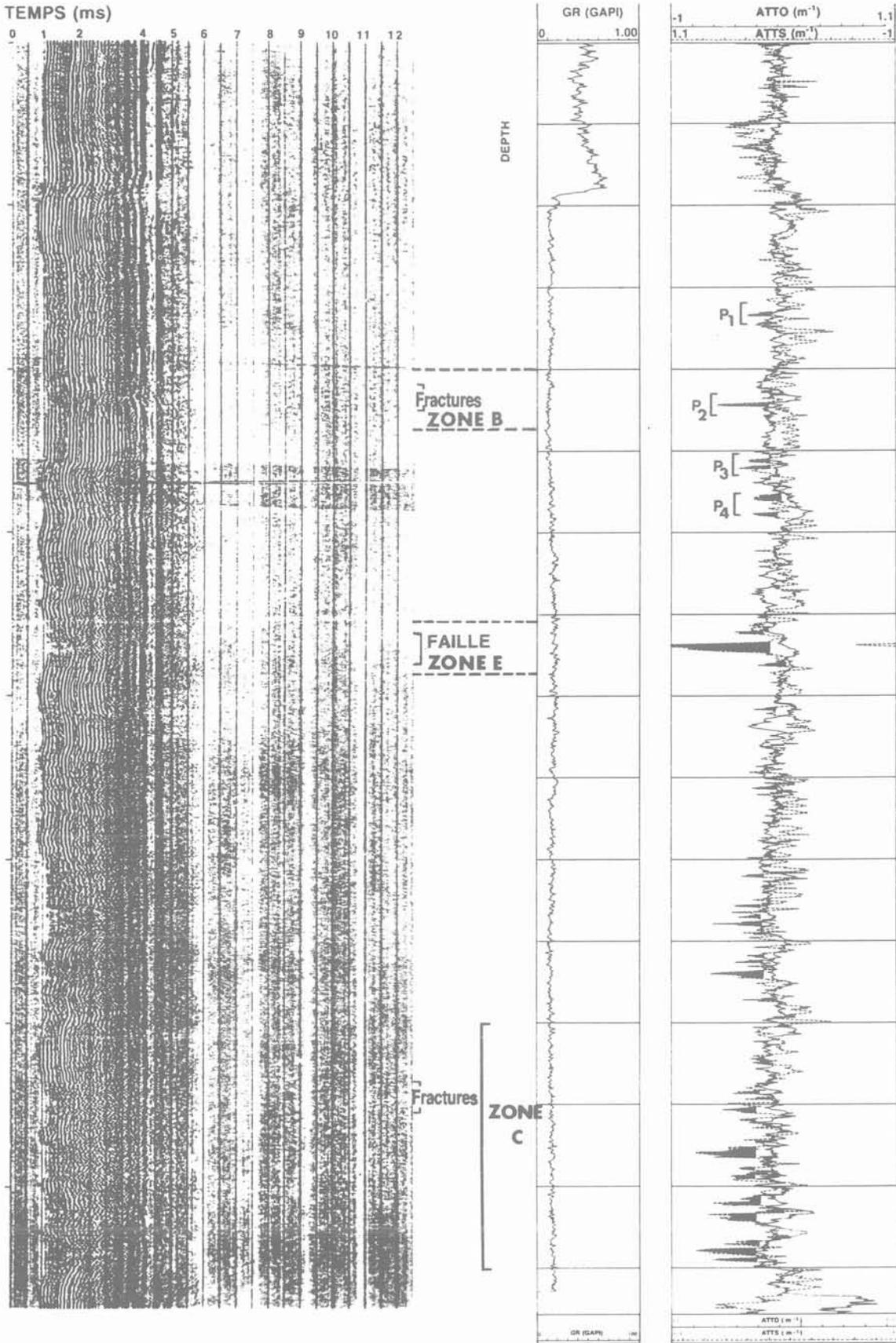


Fig. 14. — Diagraphie de fracturation et section-offset pour Gaviota 6, avec indication des zones perforées.

Fig. 14. — Fracturation log and iso-offset section for Gaviota 6 with indications of perforated zones.

RESULTATS COMPLETS DE GAVIOTA 7

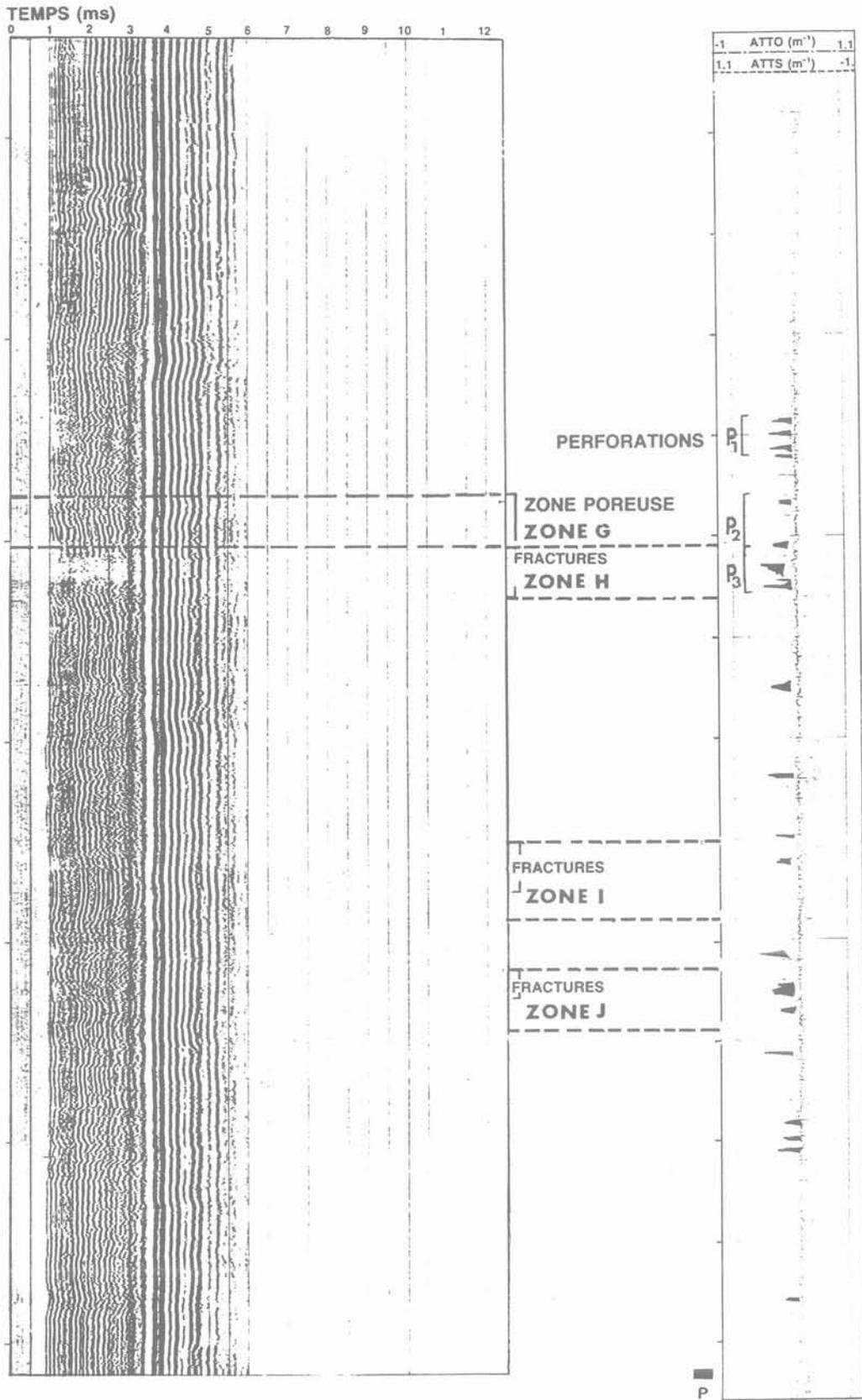


Fig. 15. — Résultats complets pour Gaviota 7.
 Fig. 15. — Complete results for Gaviota 7.

Ainsi, notre expérience acquise à partir de trois puits, sur ce champ espagnol, montre que la combinaison des ondes de cisaillement et de Stoneley est une méthode efficace pour détecter les fractures et, en trou ouvert, pour « quantifier » ces fractures. Par quantifier, nous entendons faire la différence entre fractures ouvertes et fractures plus ou moins colmatées.

- L'augmentation de l'atténuation de l'onde de cisaillement est un indicateur de fractures, ouvertes ou colmatées.
- L'augmentation de l'atténuation de l'onde de Stoneley est une indication de la présence de fractures ouvertes (après que l'on ait clairement identifié la lithologie).

5. CONCLUSION

Les résultats d'une expérience importante sur les diagraphies acoustiques, combinés à une recherche théorique, nous ont amenés à développer une nouvelle méthode pour caractériser les gisements fracturés, tant en trous ouverts que tubés.

Grâce à un ensemble adapté de traitement, dérivé de la sismique, les données de bonne qualité enregistrées avec l'outil EVA peuvent être transformées en 12 log acoustiques correspondants au 12 paramètres acoustiques. Parmi eux, les courbes de l'atténuation de l'onde S et de l'onde de Stoneley sont le fondement de notre méthode de détection de fractures.

L'atténuation de l'onde S indique la présence de fractures individuelles, ouvertes ou fortement bouchées. L'atténuation de l'onde de Stoneley se produit quand la zone correspondante est perméable, ce qui, dans le cas d'un gisement fracturé, peut indiquer la présence de fractures individuelles d'une ouverture significative, ou celle de zones fracturées conductrices comportant plusieurs fractures ouvertes, mais de moindre ouverture.

La combinaison des deux paramètres peut en conséquence être utilisée pour localiser des fractures individuelles ou des zones fracturées et pour évaluer leur contribution potentielle à la production d'hydrocarbures, en utilisant l'onde de Stoneley. Il faut souligner l'importance de l'atténuation de l'onde S, car des fractures colmatées peuvent être activées après une stimulation appropriée du gisement si elles sont interconnectées avec le réseau de fractures. Ce dernier paramètre permet de détecter les fractures même en trou tubé.

Cependant, les ondes S et les ondes de Stoneley sont sensibles aussi aux variations de lithologie et à celles du diamètre du trou. Dans les gisements complexes, il est, en conséquence, nécessaire d'effectuer une analyse détaillée de la lithologie qui permettra de faire la distinction entre les différents effets. En trous tubés, quand il n'est pas possible d'enregistrer d'autres diagraphies, EVA peut permettre d'effectuer une telle analyse lithologique, en utilisant tous les paramètres acoustiques.

Les opérations effectuées avec EVA dans trois puits du champ de Gaviota, au large de l'Espagne, ont fourni l'occasion d'essayer la méthode avec succès, la détection des fractures avec EVA, que ce soit en trou ouvert ou derrière le tubage, ayant conduit à une production très satisfaisante du champ.

Dans l'avenir, les progrès de la recherche et encore plus d'expérience pratique, pourraient nous permettre d'évaluer la conductivité aux fluides dans des gisements complexes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants à REPSOL EXPLORACION S.A. (HISPANOIL) opérateurs du champ de gaz de Gaviota et à EAIPSA (ELF-AQUITAINE DE INVESTIGACIONES PETROLIFERAS S.A.), OCEAN-SPAIN OIL COMPANY et MURPHY-SPAIN OIL COMPANY, ses partenaires pour l'autorisation qu'ils ont donnée de publier les données EVA acquises dans les puits Gaviota 5, Gaviota 6 et Gaviota 7.

Les auteurs remercient ELF-AQUITAINE pour leur permission de publier le présent travail.

RÉFÉRENCES

- ARDITTY P.C., ARENS G. et STARON Ph. (1984), *Amélioration de l'évaluation des propriétés des formations, grâce au traitement et à l'interprétation des enregistrements de l'outil EVA*. Présenté au 54^e congrès annuel de la S.E.G., Atlanta.
- ARDITTY P.C., ARENS G. et MATHIEU F. (1985), *Étude des fractures et de la perméabilité à partir du signal complet des données acoustiques dans les formations cristallines*. Présenté au 55^e congrès annuel de la S.E.G., Washington D.C.
- CORNET F.H., JOLIVET J., MOSNIER J. (1987), *Identification et caractérisation hydraulique des fractures recoupées par un forage*, Annales du 6^e congrès sur la mécanique des roches, Montréal, Thème 1, pp. 61-66, Balkema, Rotterdam.
- DAVISON C.C., KEYS W.S., PAILLET F.L. (1982), *Utilisation des diagraphies géophysiques de puits et des tests hydrologiques pour caractériser les roches cristallines en vue du stockage de déchets nucléaires*. Établissement de recherches nucléaires de Whiteshell, Manitoba et Laboratoire nucléaire de Chalk River, Ontario, Canada. Rapport technique ONW1-418.
- MATHIEU F. et TOKSÖZ M.N. (1984), *Application des diagraphies acoustiques à signal complet à l'estimation de la perméabilité des gisements*. Présenté au 54^e congrès annuel de la S.E.G., Atlanta.
- MATHIEU F. et TOKSÖZ M.N. (1984), *Détermination de la perméabilité des fractures au moyen des diagraphies acoustiques*. Proposé au Log Analyst.
- PAILLET F.L. (1980), *Propagation acoustique au voisinage de fractures qui recoupent un puits rempli de fluides*, S.P.W.L.A., 21 Symp. DD.

GÉOMÉCANIQUE DES ROCHES PROFONDES

Le Groupement Scientifique Géomécanique des Roches Profondes (Agence Nationale de Gestion des Déchets Radioactifs, Compagnie Française des Pétroles TOTAL, ELF Aquitaine, Institut Français du Pétrole et CNRS) lance un appel d'offres sur les thèmes :

Lois rhéologiques pour les grandes échelles de temps. Méthodologie

La reconstitution des mécanismes ayant conduit à la formation des structures géologiques actuelles (notamment sédimentaires) ou la prévision de l'évolution d'ensembles géologiques sur des périodes plus courtes (1 million d'années) exige une bonne connaissance des lois rhéologiques adaptées aux périodes indiquées. L'appel d'offres concerne les méthodes permettant de définir la nature de ces lois, les paramètres qui les caractérisent, et leur validation.

Apparition de bandes de cisaillement dans les roches

La notion de bifurcation sous forme d'apparition de bande de cisaillement paraît apporter des résultats utiles pour les matériaux élastoplastiques. Est-il possible de transposer ce type de notion à des matériaux dont le style de comportement est élasto fragile, sous chargement compressif. L'appel d'offres concerne l'état de l'art, les aspects théoriques et expérimentaux du problème.

Conditions de prélèvement d'échantillons argileux en forage

Le prélèvement d'échantillons de roches profondes (notamment argilites, marnes...) par carottage peut s'accompagner de modifications irréversibles d'origine physique, mécanique ou chimique. Il peut en résulter une appréciation inexacte des propriétés de ces échantillons préjudiciable au calcul des ouvrages souterrains. L'appel d'offres concerne la compréhension des mécanismes pouvant altérer les propriétés des carottes liées au prélèvement ou aux procédures de traitement et de conservation.

Les réponses doivent parvenir avant le 1^{er} décembre 1988 à :

GS Géomécanique des Roches Profondes, c/o P. BEREST, L.M.S., Ecole Polytechnique, 91128 PALAISEAU CEDEX.

Le texte complet de l'appel d'offres peut être obtenu à la même adresse.

une diagraphie de perméabilité par méthode acoustique

permeability log with an acoustical method

1^{re} Partie :

P. MORLIER et N.E. BOUNOUA

Laboratoire de Génie Civil de l'Université de Bordeaux I* (UA 867 du C.N.R.S.)

2^e Partie :

F. LEBRETON

Géodéveloppement **

Rev. Franç. Géotech. n° 45, p.p. 37-50 (octobre 1988)

Résumé

Les auteurs présentent une diagraphie de perméabilité fondée sur une signature du signal acoustique, l'indice I_c mesuré sur les premières arrivées d'ondes longitudinales.

Les bases physiques de cette diagraphie sont explicitées dans une première partie puis on montre quelques exemples de forages où la diagraphie de I_c et ses dérivés se sont avérés favorablement utiles.

Abstract

A log of permeability is presented in this paper; this log is based upon a signing of the acoustic signal, called index I_c , which is measured on the first arrival of compressional waves.

Physical principles of this log are given in a first part; then different examples show that the I_c log and other derived logs are essential tools for the knowledge of reservoir rocks.

* 33405 Talence Cedex.

** 16, rue Pétrarque, 75116 Paris.

1^{re} PARTIE

L'absorption sélective des hautes fréquences d'une impulsion acoustique est attribuée de façon principale, dans la gamme des fréquences utilisées en diagraphie, à la mobilité du fluide dans les pores de la roche — théorie de BIOT —. Sa mesure exige une analyse de FOURIER dont la mise en œuvre est difficile en diagraphie acoustique en raison de la relative étroitesse des bandes passantes des transducteurs utilisés pour l'émission et la réception des ondes et parce que l'onde de compression n'est pure que sur un temps assez court. Aussi s'est-on fréquemment attaché à la définition des signatures robustes et simples du signal temporel : l'indice de forme I_c de LEBRETON (1) et le temps de montée de GLADWIN et STACEY (2) seront évoqués dans cet article ; des études récentes ont montré que, à lithologie constante, il existe une relation linéaire entre ces deux indices et l'inverse de la constante de dissipation spécifique Q de la roche.

Nous avons cherché à exploiter une méthode de diagraphie robuste, en nous refusant d'imaginer de nouveaux outils et en utilisant donc des sondes usuelles, mais résolument acoustique puisque la propagation d'ondes est une des façons les plus pratiques de créer un déplacement relatif du fluide occupant les vides de la roche réservoir par rapport au squelette solide, c'est-à-dire une percolation, et la théorie de BIOT (3) met bien en évidence, sur des roches théoriques, cet aspect.

D'autre part, on sait que dans un train d'ondes de sonde acoustique, composé successivement d'ondes longitudinales, transversales, de surface (STONELEY)... non séparées, il est assez difficile d'attribuer une nature mécanique à telle ou telle partie du signal ; l'idée fut donc de travailler sur le début du signal où l'on est sûr d'être en présence d'ondes longitudinales ; l'inconvénient est le faible rapport signal sur bruit qui est un obstacle à la bonne qualité des signatures recherchées.

1. ATTÉNUATION DES ONDES ET SES MESURES

La figure 1 représente l'évolution d'une impulsion acoustique au fur et à mesure de sa propagation dans un milieu dissipatif ; son amplitude diminue exponentiellement et elle devient de plus en plus étalée : elle s'appauvrit en hautes fréquences.

L'amplitude de l'onde — plane — $A(x, f)$, à une distance x , f étant la fréquence, peut s'écrire sous la forme :

$$A(x, f) = A(x_0, f) e^{-\alpha(x - x_0)}$$

où $A(x_0, f)$ est l'amplitude à l'origine x_0 ; α est le coefficient d'atténuation, fonction croissante de f .

Pour une bande fréquentielle limitée, l'absorption relative de l'énergie ($\Delta E/E$) est sensiblement constante quelque soit la fréquence :

$$\frac{\Delta E}{E} = 2\pi/Q$$

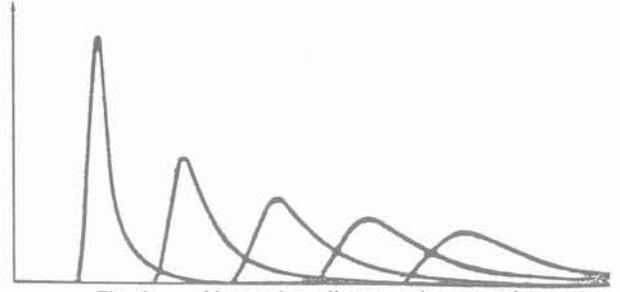


Fig. 1. — Absorption d'une onde acoustique par un milieu dissipatif.

Fig. 1. — Absorption of an acoustic wave in a dissipative medium.

où Q , facteur de Qualité, est aussi appelé constante de dissipation spécifique.

Il est facile de montrer que Q et α sont alors reliés par

$$\alpha = \frac{\pi f}{Q V}$$

où V est la vitesse de l'onde considérée.

1.1. Indice de forme

L'appauvrissement d'un signal de sonde acoustique classique en hautes fréquences peut se caractériser simplement par l'amplitude comparée de la première alternance par rapport au niveau moyen du signal ; c'est le sens de l'indice I_c défini par LEBRETON (fig. 2).

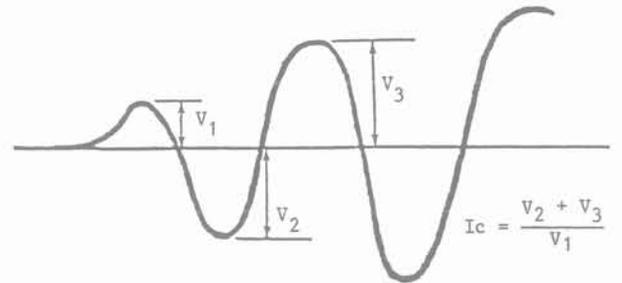


Fig. 2. — Définition de l'indice de forme I_c (F. LEBRETON et al.).

Fig. 2. — Definition of Index I_c .

L'intérêt de cet indice est qu'il est indépendant du niveau général du signal dont on sait par ailleurs qu'il est notablement affaibli par la présence de cake (dépôt de boue à la paroi du forage) ; cet indice a également l'avantage d'être mesurable sur une sonde à un seul récepteur ; sur une sonde normale, l'évolution de l'indice est, par contre, entachée d'erreurs par le bruit de fond, la linéarité des amplificateurs, l'interférence d'ondes non longitudinales sur les deuxième et troisième arches du signal.

L'étude numérique de ZHANG et al. (4) a montré (fig. 3) que, tout étant égal par ailleurs, en particulier l'impédance acoustique de la roche testée, l'indice I_c varie linéairement avec $1/Q$.

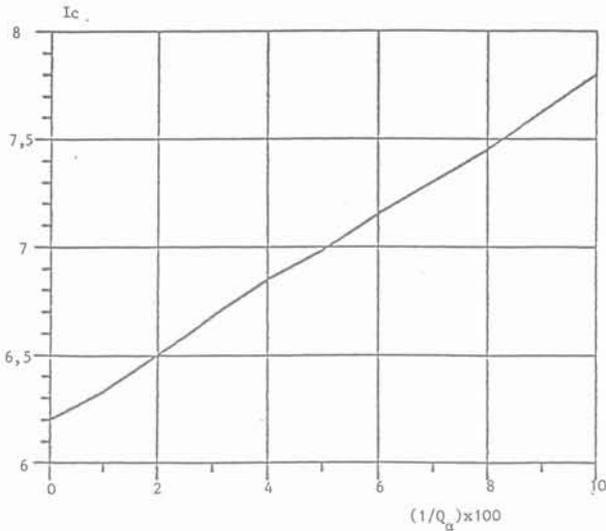


Fig. 3. — Relation entre l'indice de forme I_c et la constante de dissipation Q, d'après ZHANG et al.
 Fig. 3. — Relation between Index I_c and the quality factor Q, after ZHANG and al.

1.2. Temps de montée

Le même appauvrissement se traduit aussi simplement par un étalement progressif de la première arche du signal : GLADWIN et STACEY ont défini un temps de montée τ (fig. 4) de façon rigoureuse ; ils ont également

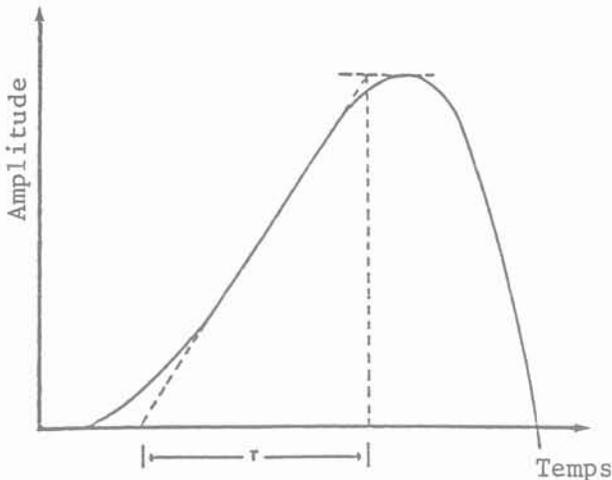


Fig. 4. — Définition du temps de montée (GLADWIN et al.).

Fig. 4. — Definition of rise time after GLADWIN and al.

montré que τ varie linéairement avec le rapport t/Q (t: temps de propagation) :

$$\tau = \tau_0 + C t/Q$$

où la constante C dépend essentiellement du type de source.

Cette étude a été reprise en France récemment au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées par COTE et al. (5).

Indice I_c et Temps de montée τ sont donc deux méthodes simples d'appréciation de l'atténuation des premières ondes acoustiques ; leur mesure peut être quasiment normalisée ; on a vu au sujet de I_c, et c'est la même chose pour τ, un certain nombre de raisons d'erreurs : niveau de bruit, pas d'échantillonnage, dynamique d'enregistrement pour l'essentiel.

Pour en finir sur ce point, on peut dire un mot de la profondeur d'investigation de telles diagraphies : des études effectuées sur un forage artificiel ont montré (1) que celle-ci peut être estimée à une demie longueur d'onde (environ dix centimètres).

2. MÉCANISMES PHYSIQUES DE L'ATTÉNUATION

Un certain nombre de mécanismes élémentaires peuvent expliquer l'atténuation des ondes de masse dans une roche, poreuse et saturée :

- a. le frottement solide,
- b. l'anélasticité de la matrice solide,
- c. la diffraction de l'onde autour des grains,
- d. la présence de bulles dans le fluide,
- e. la relaxation visqueuse du fluide interstitiel,
- f. le couplage fluide-solide de la théorie de BIOT,
- g. le squirt ou squish flow, sorte de jaillissement du fluide au passage de l'onde mis en évidence par BOURBIE [6].

L'importance de chacun de ces mécanismes dépend de la pression effective sur la roche (a par exemple), de la pression du fluide (d ou e), de la température, de la fréquence, de la structure de la roche, c'est-à-dire de l'agencement de l'espace poreux d'où découle la perméabilité.

On imagine donc facilement qu'il est tentant de proposer des corrélations entre la perméabilité et l'atténuation des ondes de masse mais que la complexité de la structure des roches n'arrange pas les choses.

Nous avons effectué des études de laboratoire (7) tentant de mettre en évidence ces corrélations sur des grès pétroliers à la pression ordinaire ; les résultats ont été les suivants :

Si l'on définit deux paramètres sans dimension :

$$X = \frac{k f}{\mu \phi^3}$$

- k : perméabilité,
- f : fréquence de l'onde,
- μ : viscosité du fluide mouillant,
- φ : porosité,

et

$$Y = \frac{\alpha}{S}$$

- α : atténuation (Neper/m),
- S : surface spécifique de la roche (m⁻¹),

alors que X varie sur six décades, Y suit une loi en $X^{1/3}$ (fig. 5).

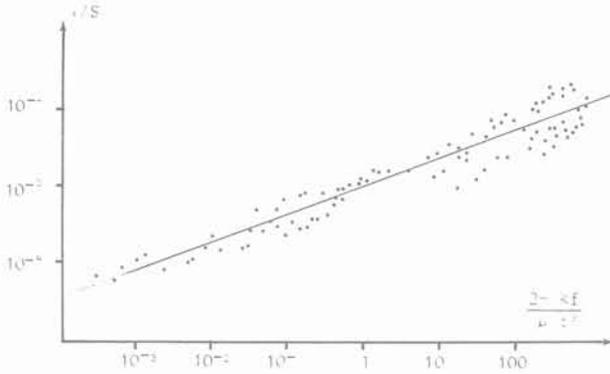


Fig. 5. — Atténuation α des ondes P dans la roche en fonction de la fréquence f de la perméabilité k (7).
Fig. 5. — Attenuation α of P waves in rock versus a dimensionless combination including frequency f and permeability k .

Ces résultats montrent la complexité du rôle de la structure de la roche et qu'il sera donc difficile de faire de l'atténuation une « mesure » de la perméabilité ; par contre, il sera possible que, sur un réservoir donné, limité, l'évolution de la structure autorise de très bonnes corrélations entre α et k .

3. INDICE DE FORME ET PERMÉABILITÉ

Une justification de la pertinence possible d'une corrélation indice de forme-perméabilité dont on comprend maintenant les raisons et les limites a été fournie par une campagne de mesures sur un forage artificiel pratiqué dans des bétons poreux (1) : la porosité, constante, et la perméabilité y furent soigneusement et directement mesurées ; l'indice I_c fut relevé sur les mêmes volumes de quelques dm^3 tout au long du forage, avec plusieurs types de sondes ; une corrélation, excellente au sens des diagraphies ($r = 0,74$) fut obtenue (fig. 6) entre I_c et k :

$$I_c = \alpha \text{Log } k + \beta,$$

α et β étant deux constantes.

A la lumière de cette expérience et de campagnes ultérieures, on peut dire qu'une étude statistique de

l'incide I_c dans un réservoir a de fortes chances de mettre en évidence les zones perméables et même de donner une bonne évaluation de la perméabilité si celle-ci est de même nature sur tout le réservoir.

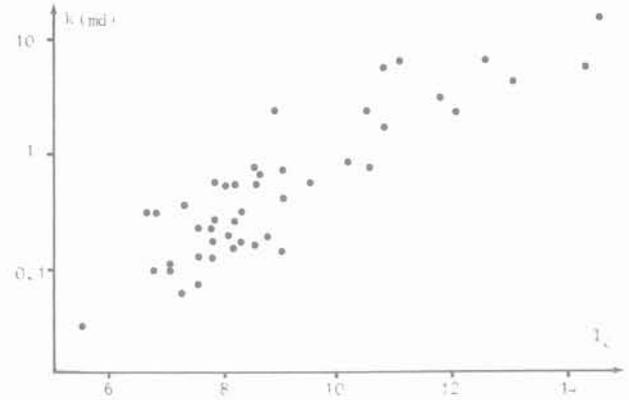


Fig. 6. — Relation perméabilité k -indice I_c (1).
Fig. 6. — Permeability k versus Index I_c .

BIBLIOGRAPHIE

1. LEBRETON F., MORLIER P. (1983), *Une diagraphie de perméabilité par méthode acoustique*, Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur n° 26-27, Paris, 1983.
2. GLADWIN M.T., STACEY F.D. (1974), *Anelastic degradation of acoustic pulses in rock*, Phys. Earth Planet. Inter., 8, 332-336, 1974.
3. BIOT M.A. (1956), *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid I. lower frequency range; II. higher frequency range*, J. Acoust. Soc. Am., 28, 1956 a : 168-178, 1956 b : 179-191.
4. ZHANG J. et CHENG C.H. (1984), *Numerical studies of body wave amplitude in full waveform acoustic logs*, Neuvième Colloque International de Diagraphies, oct. 1984.
5. COTE Ph., CAMPILLO M. (1985), *Propagation en milieux fissurés. Mesures in-situ du facteur de qualité et des vitesses sismiques*, Rapport A.T.P. 1985.
6. BOURBIE T., COUSSY D. (1986), *Acoustique des milieux poreux*, Edition Technip, 1986.
7. MORLIER P., SARDA J.P. (1971), *Atténuation des ondes élastiques dans les roches poreuses saturées*, A.R.T.E.P., 1971.

2^e PARTIE

L'étude théorique a fait apparaître les propriétés du rapport I_c (ou de tout indice dérivé de celui-ci) pour la mesure de la mobilité (k/μ) du fluide dans le terrain traversé par le signal. L'analyse de l'évolution diagraphique de la perméabilité (Darcilog)* est développée ci-après.

1. CARACTÉRISTIQUES DE L'INDICE I_c

1.1. Aucune loi de composition des mesures directes de perméabilité faites sur échantillons prélevés sur un plus gros volume de milieu poreux naturel ne permet de retrouver à coup sûr la mesure directe de perméabilité initialement faite sur ce gros volume.

Il en résulte que, pour qu'elle ait une signification, toute mesure directe ou indirecte de perméabilité sur un milieu poreux doit être faite sur un volume et selon une direction déterminés.

Dans un forage la mesure de I_c est faite à partir d'un ensemble Émetteur-Récepteur (É-R) : son volume d'investigation est celui qui est donné par l'outil dont l'écart E-R est de 3 à 5 fois la longueur d'onde du signal émis (1) (2).

Comme les transducteurs des sondes acoustiques actuelles ne présentent pas de symétrie axiale de révolution, ils doivent être excentrés judicieusement dans les forages (3).

Il faut noter que cette mesure acoustique est effectuée in-situ dans un milieu continu, semi-infini puisque limité seulement par un secteur de cylindre du puits. En revanche, les mesures acoustiques ou d'écoulement de fluide sur carottes sont influencées par des limites géométriques imposées dans toutes les directions.

Le volume utile d'investigation de l'indice I_c (fréquence de 12 à 30 KHz) est alors celui d'un secteur circulaire de 10 à 20 cm de pénétration radiale, de 15 à 30 cm de hauteur, centré sur le milieu du segment ER. La perméabilité γ est mesurée suivant la direction de l'axe du forage.

Dans un puits les mesures successives de la diagraphie I_c doivent donc être espacées d'environ 15 cm pour que toute la hauteur du découvert soit correctement investiguée.

1.2. Le signal émis provoque toujours une dépression initiale qui, après passage dans le milieu poreux, se retrouve au début de l'onde P du signal reçu comme une amplitude (négative) toujours faible devant les deux suivantes.

Pour que la mesure I_c reste précise la puissance du signal émis doit donc être d'abord suffisante.

La vitesse de remontée de l'outil dans le forage agit directement sur l'amplitude du bruit surimposé au signal

proprement dit. Pour réduire cet effet de bruit la vitesse doit être faible (inférieure ou égale à 300 m/heure) et régulière. Des vitesses de remontée aussi basses que 100 m/heure peuvent se révéler nécessaires.

Par ailleurs le gain choisi pour l'enregistrement doit satisfaire aux deux conditions antagonistes suivantes :

- obtenir une amplitude décelable, chiffrée sur la première dépression mesurée ;
- éviter la saturation des autres amplitudes de l'onde P reçue.

Le pas d'échantillonnage du signal doit être au plus le vingtième de la période du signal, soit pour une fréquence de 20 KHz, une prise d'informations toutes les 2 μ s.

Dans un puits la suite des valeurs de I_c relevées en fonction de la profondeur permet d'établir la diagraphie I_c de base (Darcilog). Avec les outils acoustiques actuels la gamme de variation de I_c s'étend de 2 à 200 environ, selon les perméabilités rencontrées.

2. CALIBRATION $I_c = f(k)$

Toutes les fois que mesures directes de perméabilité et mesures de I_c sont faites au droit d'un même intervalle dans un puits, la comparaison de ces deux séries de mesures conduit à proposer une relation :

$$I_c = \alpha \log \frac{k}{\mu} + \beta$$

où α et β dépendent de la position des transducteurs dans l'outil et du centrage de l'outil dans le forage.

A ce jour (1988), la détermination de α et β n'a pas été publiée et il ne sera pas fait état ici des valeurs attribuables à ces paramètres.

3. VISCOSITÉ

C'est en général un mélange d'eau connée, de filtrat de boue avec des traces de gaz plus ou moins dissous qui sature la zone d'investigation de la mesure I_c dans les puits.

La valeur de la viscosité dynamique de ce mélange varie en général dans des limites assez étroites pour que l'ordre de grandeur de la mobilité dans les roches n'en soit pas modifié.

En revanche dans la zone investiguée la présence de saturation en hydrocarbures (liquides ou gaz) a une influence lisible sur I_c . L'emploi successif de deux fréquences d'émission du signal, et donc de deux rayons d'investigation pour I_c , permet le repérage de l'existence d'une zone envahie par un filtrat de viscosité très différente de celle du fluide initial.

* Marque déposée.

4. AUTRES DIAGRAPHIES : EXAFLO * ET SEALDEX

Sur un découvert donné, l'histogramme des I_c présente des modes dont les valeurs représentatives correspondent à des familles de perméabilité aptes à être reconnus sur déblais, carottes, tests, diagraphe ou global *. Ainsi les valeurs de I_c élevées (> 50 par exemple pour l'outil B.H.C.) et isolées sont normalement indicatives de passées fracturées.

Ainsi au droit des roches non fracturées à matrices imperméables (ex : argiles) I_c , mesuré avec le B.H.C., est compris entre 6 et 10.

Sur un intervalle sédimentaire épais (ex : 50 à 100 m), les passées imperméables sont souvent prépondérantes : 15 à 30 % de l'ensemble et cette proportion se retrouve évidemment sur l'histogramme de I_c par exemple (fig. 7).

La basse valeur modale de ces passées imperméables, relevée sur l'histogramme est en fait une valeur de coupure séparant les bancs susceptibles de production

ou d'injection de fluides aux environs de la pression hydrostatique correspondante.

5. CUMUL DE LA PERMÉABILITÉ CALCULÉE OU EXAFLO *

Entre deux cotes de profondeur dans un forage, le cumul de la perméabilité verticale déduite de I_c par la formule précitée constitue une nouvelle diagraphe dont les informations peuvent, sous certaines conditions, reconstituer celles de la débitmétrie enregistrée avec une sonde à micromoulinet en découvert.

Toutes les valeurs de I_c inférieures à la coupure ($I_c = 7$ dans l'exemple de la figure 7) sont éliminées du cumul puisqu'elles sont relatives à des passées non-susceptibles d'écoulement.

En revanche si même une seule valeur de I_c n'a pas été calculée à une cote donnée à cause, par exemple, d'un signal reçu de mauvaise qualité, le cumul n'est valable qu'au-dessus ou au-dessous de cette cote.

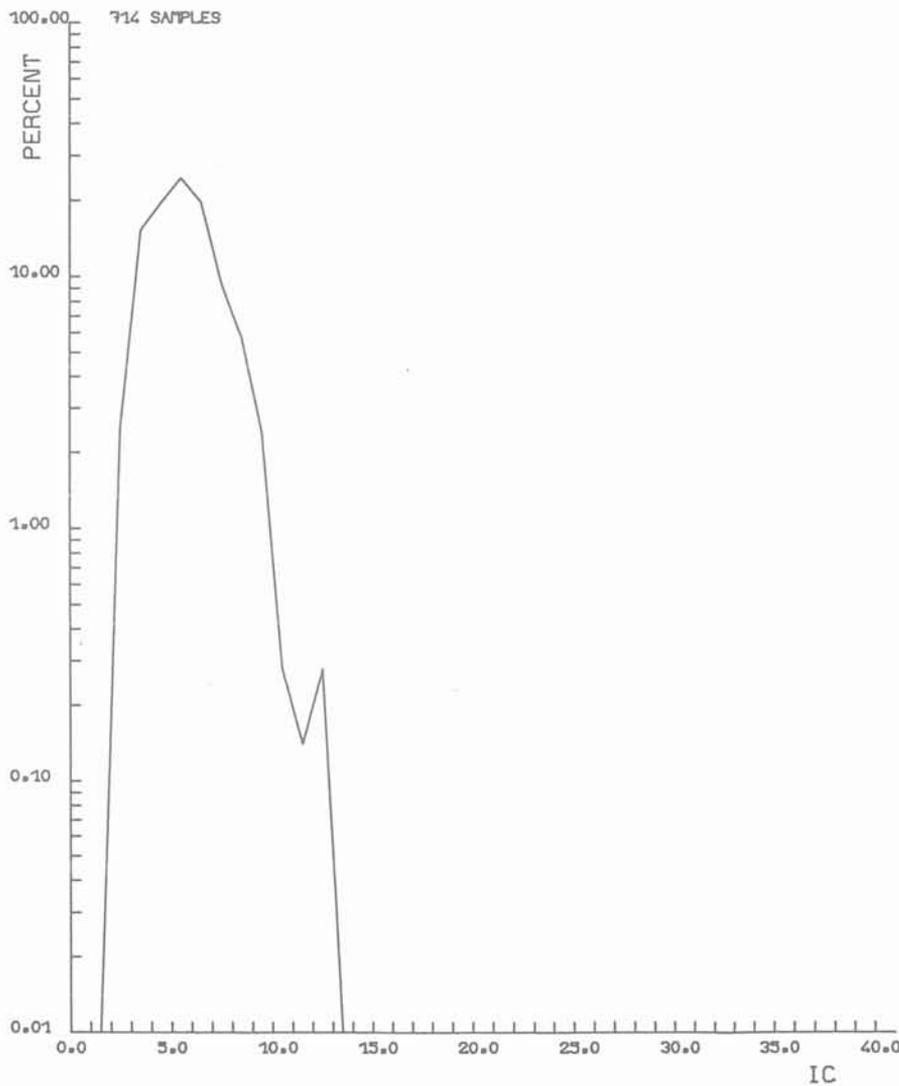


Fig. 7 bis

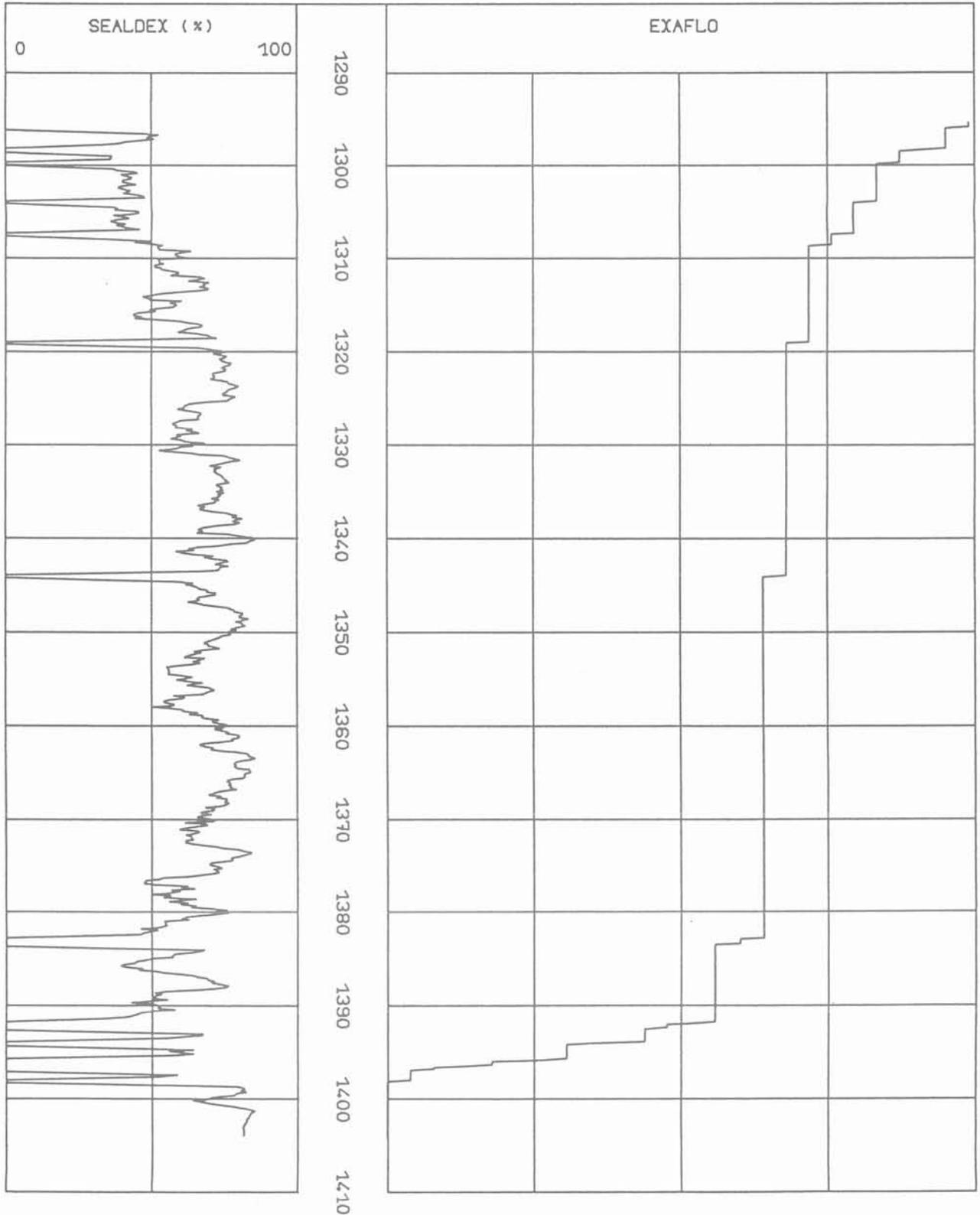


Fig. 7 ter

Les comparaisons entre EXAFLO* et diagraphie de débitmétrie sont possibles toutes les fois que les deux diagraphies sont faites en découvert sur un même puits. Une bonne corrélation entre les deux diagrammes est attendue et généralement trouvée, mais des écarts sont aussi parfois notés. Ces écarts entre le profil de l'Exaflo* d'une part et de la débitmétrie d'autre part sont inter-

prétables en termes de pression de gisement différente de la pression hydrostatique et/ou de variation de la viscosité du fluide saturant, avec la profondeur (fig. 7 bis).

Historiquement les deux premiers exemples d'une telle comparaison datent de 1983. Ils proviennent de deux

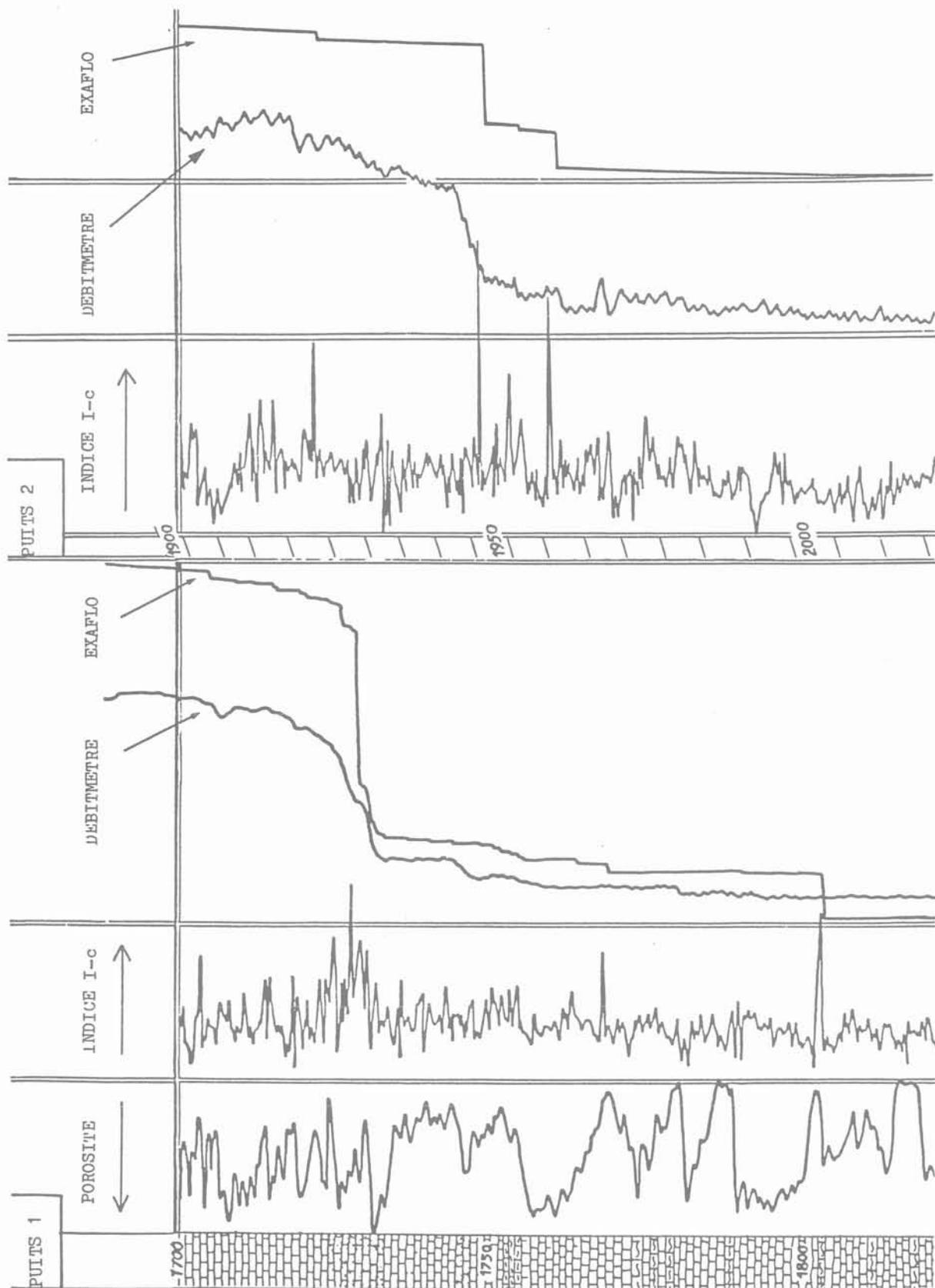


Fig. 8. — Sur un aquifère géothermal calcaire épais de 120 m, deux puits ont été forés à 1 mile de distance ; EXAFLO et le log de débitmétrie ont été effectués sur chacun de ces puits.

La superposition de EXAFLO et du débitmètre donne des corrélations satisfaisantes dans les deux cas.

Cette opération, effectuée en 1982, est historiquement le premier essai du nouveau log EXAFLO.

Fig. 8. — Over a 120-meter thick geothermal limestone aquifer two wells were drilled 1-mile apart.

EXAFLO * and the spinner flowmeter log were run in each of them.

Superposing EXAFLO * and flowmeter profiles yields a satisfactory correlation in both cases. This glaring demonstration made in 1982 is historically the first try of the new log dubbed EXAFLO *.

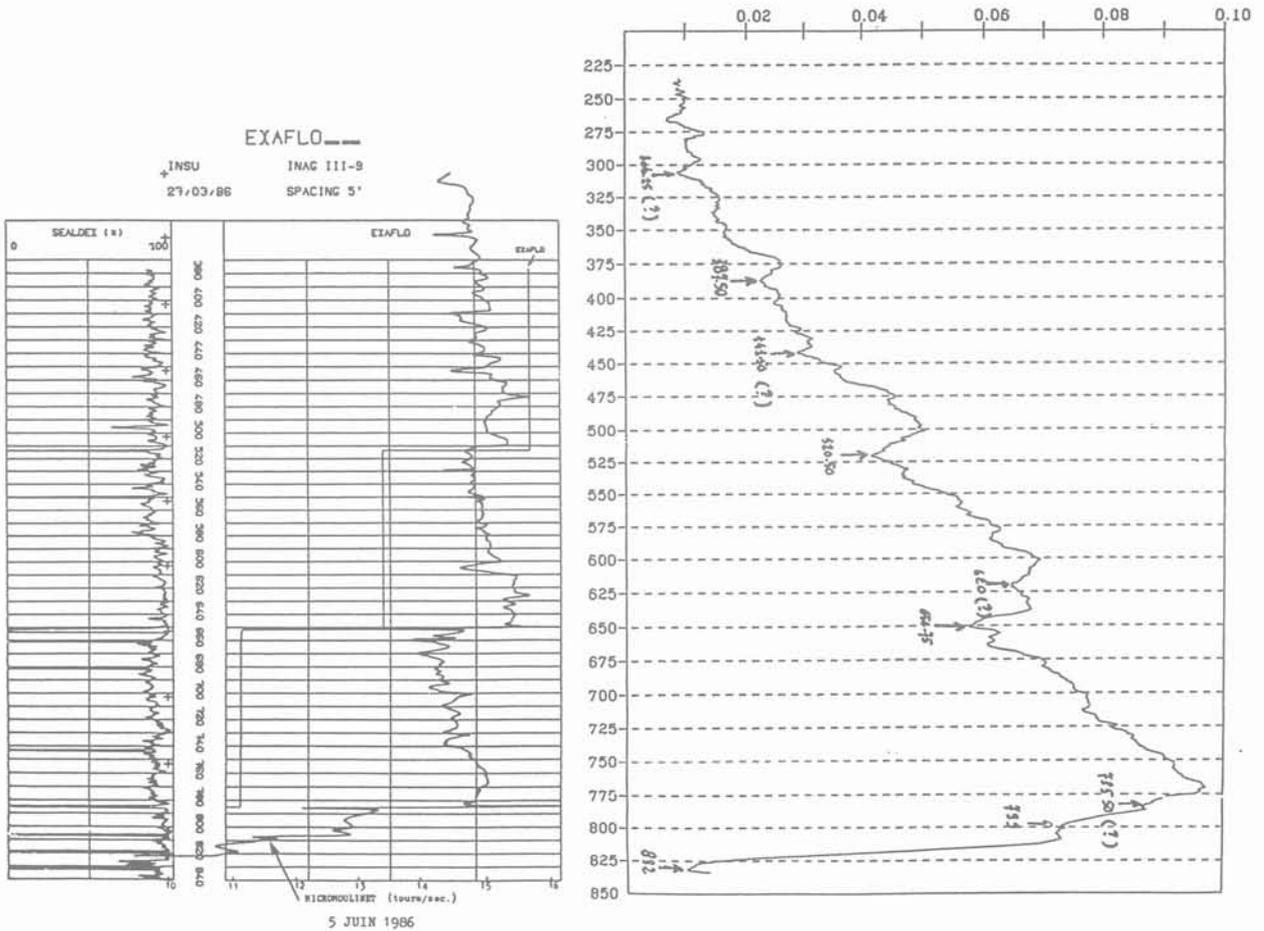
INAG III-9 COMPARAISON INDICE I_c , MICROMOULINET EN INJECTION, GRADIENT DE TEMPERATURE

Fig. 9. — A travers un massif granitique dans le Massif Central, un puits de 840 m a été foré, trois logs différents ont été effectués pour détecter d'éventuelles venues d'eau : EXAFLO, log de température avec une précision de $\pm 0,01$ °C, et le micromoulinet lors d'une injection d'eau à pression constante à partir de la surface.

Fig. 9. — Through a granite body lying in Central France, a 840 meter deep well was drilled and three different logs were tried in it for detecting water entries : EXAFLO *, Temperature log (± 0.01 ° Celsius accuracy), and spinner flowmeter log run while water was injected at constant pressure from the surface.

puits de géothermie du B.R.G.M. (fig. 8), au droit des carbonates poreux fissurés, karstifiés, mais non fracturés du Dogger.

L'exemple le plus récent (1986) (fig. 9) est relatif à un puits foré dans le granite du Massif Central. Toutes les passées de granite qui absorbent des volumes notables d'eau injectée à pression constante sont signalées par la diagraphie de débitmétrie (micromoulinet) et par l'Exaflo *.

Un regroupement supplémentaire de l'accord de ces deux mesures est fourni par la diagraphie des écarts de température enregistrée avec un thermomètre sensible au 1/100 de degré, effectuée par Monsieur JOLIVET.

Un autre exemple (1986) est celui de terrains sableux deltaïques de plus de 300 m d'épaisseur, avec quelques minces passées argileuses.

A l'aplomb du forage (fig. 10 et 10 bis), la porosité des sables est comprise entre 30 et 40 % : des tests de

production infructueux ont permis de s'assurer que leur perméabilité est la plupart du temps trop faible pour assurer le débit d'eau souhaité (500 m³/heure).

Le plus perméable des horizons vers 230-232 m, est repéré grâce à l'Exaflo *. Un test de production a confirmé l'exactitude de cette information.

6. SEALDEX

Compte tenu de ce qu'elles sont très faibles, les perméabilités des intervalles de terrain représentées par des valeurs d'indice I_c inférieures à la coupure définie ci-dessus peuvent être composées selon plusieurs modes de calcul.

Il a semblé judicieux de les représenter par une simple moyenne des valeurs trouvées sur l'intervalle E-R, sous

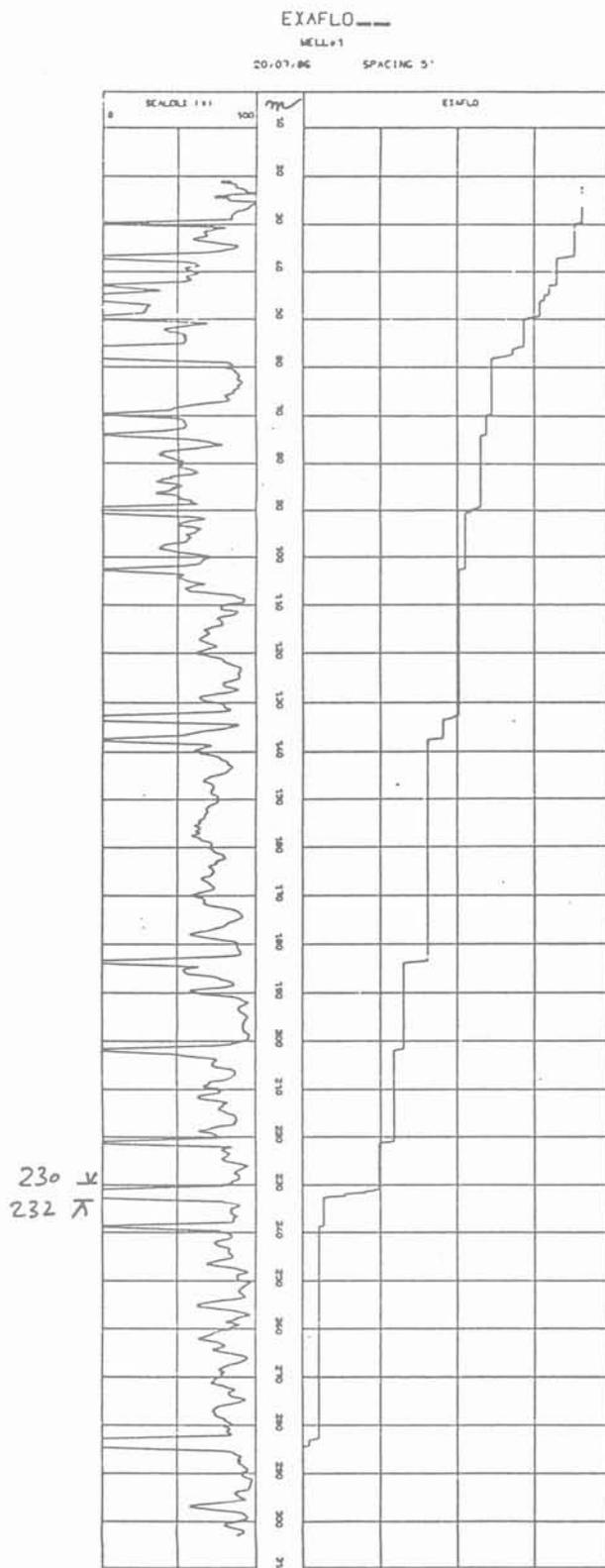


Fig. 10, 10 bis. — Dans ce puits de 300 m, la résistivité, la polarisation spontanée et le log de radioactivité naturelle caractérisent un sable propre, saturé d'eau, avec une porosité de 0,30 à 0,40. Aucun de ces logs ne peut mettre en évidence le meilleur intervalle de production.

Les logs I_c et EXAFLO ont permis d'individualiser une zone perméable (230-232 m) qui produit 25 % du débit total.
 Fig. 10, 10 bis. — In this 300-meter deep well Resistivity, SP, and Natural Gamma Ray logs show clean, 30 % and 40 % porous, fresh-water saturated sands.

All these logs are of no use to single out the best water producing interval.
 Fortunately I_c and EXAFLO * were also run and from them the 2-meter thick interval (230-232 m) was singled out and it produces 25 % of the total flow.

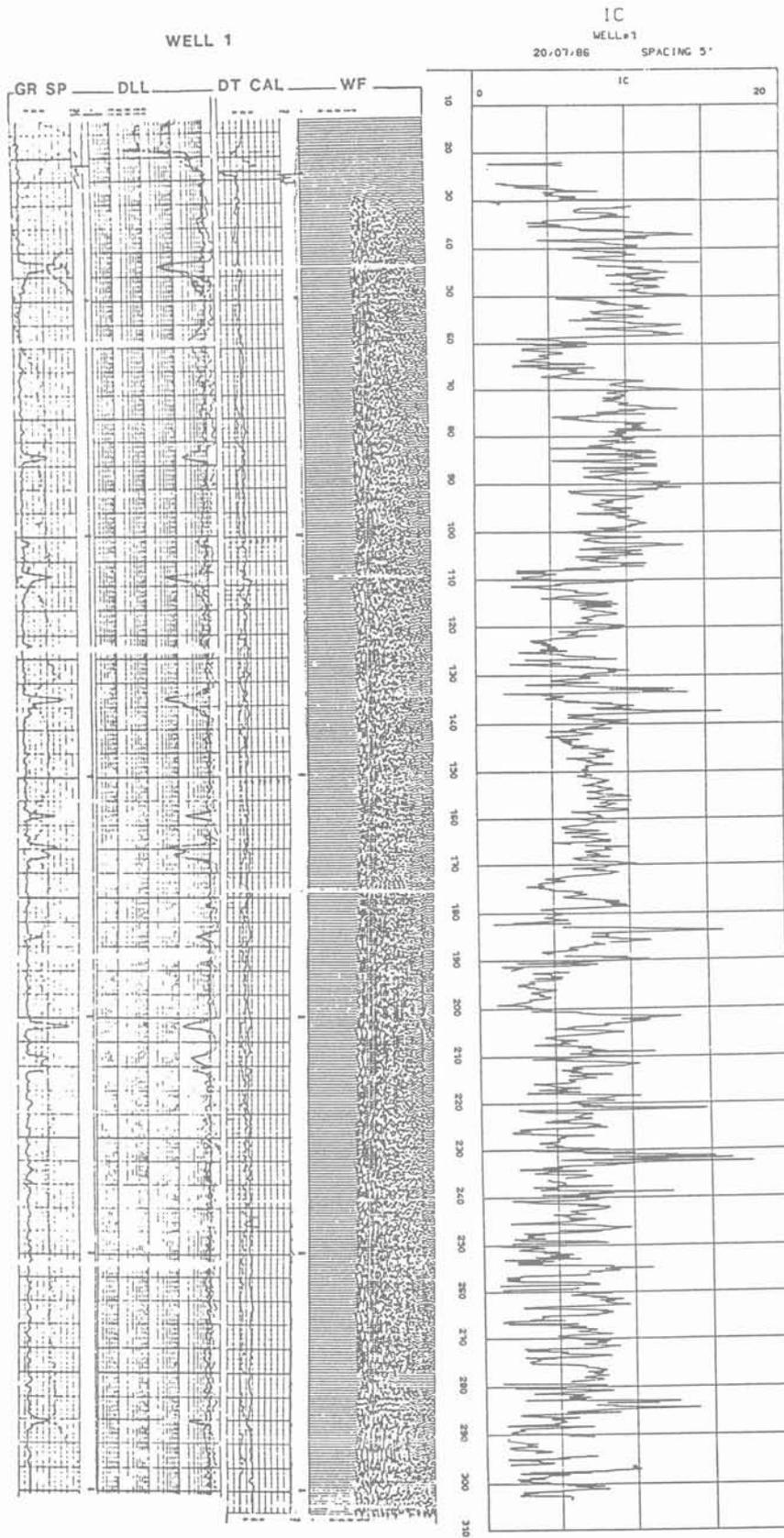


Fig. 10 bis

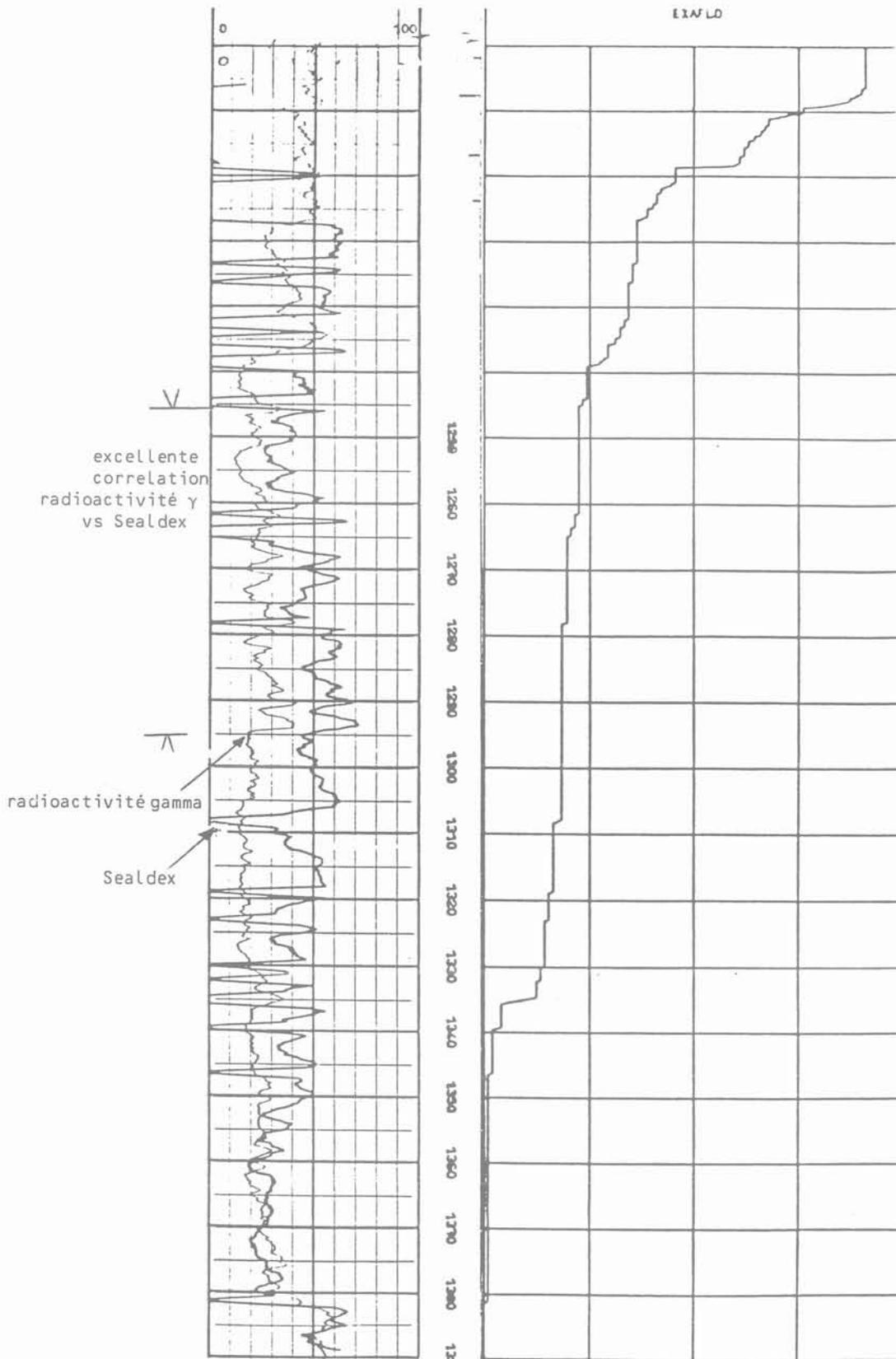


Fig. 11. — Dans ce puits, la formation est composée de grès plus ou moins argileux ; la perméabilité de ce type de roche dépend de la granulométrie du sable et de la distribution de l'argile. Il peut donc arriver que, sur un intervalle à granulométrie constante, le seul pourcentage en argile soit responsable de l'imperméabilité. Si c'est le cas, le log de radioactivité naturelle et le log I_c (ou SEALDEX) doivent présenter un profil parallèle : on notera, de 1 250 à 1 300 m, la remarquable identité des deux logs.

Fig. 11. — In this well the shown formation is made up of more or less shaly sandstone. The permeability of this type of rock is controlled by sand granulometry and by clay distribution. So in such rocks it may occur that over an interval of constant grain size the only impermeability agent be the given clay percentage. In this is the case the Natural Radioactivity log and the I_c log (or "Sealdex", which is the averaged I_c over the spacing length) ought to exhibit identical profiles. From 1 250 to 1 300-m identity of these two profiles is indeed striking.

la condition qu'aucune d'entre elles n'y soit supérieure à la valeur de coupure.

Dans les terrains où la teneur en argile contrôle la perméabilité, le profil de l'information fourni par cette diagraphie Sealdex corrèlera avec la diagraphie de Radioactivité gamma qui mesure la teneur en argile (fig. 11).

7. CONCLUSION

Dans un puits la recherche des intervalles au droit desquels se produisent des écoulements de fluide entre roche et forage conduit à la recherche des intervalles perméables.

Bien entendu le débit de l'écoulement (et sa permanence) ne dépendent pas seulement de la valeur de la perméabilité sur cet intervalle. L'évaluation de la perméabilité par les diagraphies acoustiques présentées ici

n'est donc qu'un élément d'enquête sur les écoulements.

En revanche pour l'emploi de la diagraphie acoustique par traitement de l'onde P, il est urgent que la procédure de mesure soit entièrement définie : c'est ce qui a été fait plus haut.

A condition qu'ils aient été enregistrés suivant les règles de l'art, tous les exemples obtenus à ce jour ont donné des diagraphies fidèles. Leur interprétation en termes de k/μ s'est toujours révélée utile à l'ingénieur.

BIBLIOGRAPHIE

1. LEBRETON et al. (1978), *SPWLA Logging Symposium Transactions*, 1978, El Paso.
2. CONCHE, LEBRETON et ROJAS (1986), *International Geothermy Symposium*, janv. 1986, Stanford.
3. Brevets : France n° 2106702, U.S.A. n° 3786894, Canada n° 852617.

variation du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié de la plaine de Salonique (Grèce)

variation in the storage coefficient of a stratified aquifer
in the plain of Thessaloniki (Greece)

J. MELADIOTIS, C. DEMIRIS *

Rev. Franç. Géotech. n° 45, p.p. 51-58 (octobre 1988)

Résumé

L'exploitation de longue durée des eaux souterraines de la plaine de Salonique, entre les rivières Axios et Gallikos, doit avoir modifié, entre autres, la valeur moyenne du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié de la région, telle qu'elle a été obtenue initialement à partir des essais de pompage il y a environ vingt ans.

Dans cette étude, la variation du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère ci-dessus a été calculée théoriquement à partir de la compaction des couches argileuses intercalaires, semi-perméables, dû à l'exploitation de longue durée.

Les résultats de ce travail montrent que l'exploitation de longue durée des eaux souterraines de la plaine de Salonique, entre les rivières Axios et Gallikos, doit avoir apporté une augmentation importante (de l'ordre de dix peut-être) de la valeur du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié.

Abstract

The long-term withdrawal of groundwaters from the stratified aquifer of the valley of Thessaloniki between the rivers Axios and Gallikos, must have caused a substantial change in the value of the storage coefficient, as determined from the initial pumping tests.

This paper evaluates the change in the storage coefficient due to the compaction of the semi-permeable strata, associated with long-term production. It is concluded that an increase of the coefficient by one order of magnitude must have resulted during the production life of the aquifer.

* Laboratoire de Géologie du Génie Civil, Ecole Polytechnique de l'Université Aristote de Thessaloniki, Grèce.

1. INTRODUCTION

L'exploitation de longue durée des nappes souterraines de la plaine de Salonique, entre les rivières Axios et Gallikos (figure 1), région agricole de grande culture mais aussi région industrielle d'allure prospère, doit avoir modifié les valeurs des caractéristiques hydrau-

plastique) des couches argileuses intercalaires, semi-perméables, qui est liée au coefficient d'emmagasinement à long terme.

Le poids respectif de ces effets varie avec la profondeur des couches intéressées et la vitesse de variation du niveau piézométrique.



Fig. 1. — Carte schématique de la plaine de Salonique. Localisation de la région d'étude.

Fig. 1. — Schematic plan of the Thessaloniki plain indicating the area investigated.

liques de l'aquifère stratifié de la région, obtenues à partir des essais initiaux de pompage.

Le but essentiel de cette étude est l'estimation de la variation relative de la valeur du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié situé dans les dépôts quaternaires de cette région, provoquée par une exploitation de longue durée.

2. DÉFINITION THÉORIQUE DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT À LONG TERME

2.1. Définition

Dans le cas d'un aquifère stratifié constitué de couches alternées de sable et d'argile semi-perméable, à faible et moyenne profondeur, les essais de pompage correspondant à des écoulements de quelques jours ne donnent que le coefficient d'emmagasinement à court terme (coefficient d'emmagasinement de Theis), qui a un caractère local.

Dans le cas des exploitations de longue durée apparaît un phénomène de consolidation des couches, qui est beaucoup plus important pour les couches d'argile que pour les couches de sable. La consolidation des couches d'un aquifère stratifié a comme résultat, d'une part la diminution de la porosité des couches perméables et d'autre part la compaction (déformation

Pour des aquifères stratifiés de profondeur moyenne avec des couches argileuses intercalaires semi-perméables à faible et moyenne profondeur, l'effet déterminant est la compaction des couches d'argile.

2.2. Relation entre le coefficient d'emmagasinement à long terme et les couches intercalaires à faible et moyenne profondeurs

2.2.1. Compaction complète Compaction incomplète Influence du temps

Considérons le cas d'un aquifère stratifié, avec « N » couches argileuses intercalaires, semi-perméables, à faible et moyenne profondeur, et admettons que la compaction de toutes ces couches intercalaires soit complète. Dans ce cas, l'expression donnant le coefficient d'emmagasinement à long terme de l'aquifère ci-dessus peut s'écrire ainsi :

$$S = \gamma_w \sum_{i=1}^N (m_{vi} \cdot h_i) \quad (1)$$

où :

h_i est l'épaisseur de la couche intercalaire « i », en mètres,

m_{vi} son coefficient de compressibilité volumétrique, exprimé en m^2/N ,

et γ_w est le poids volumique de l'eau, exprimé en N/m^3 .

Dans l'équation (1), nous avons négligé les déformations élastiques de l'eau et du milieu poreux.

En réalité, la compaction n'est jamais complète, même si la pression de l'aquifère reste constante.

Une équation plus précise que celle donnée ci-dessus, peut être déduite de la théorie du tassement de TERZAGHI [14] :

$$S = \gamma_w \sum_{i=1}^N (m_{vi} \cdot h_i \cdot U_i) \quad (2)$$

où : U_i est le pourcentage de consolidation de la couche intercalaire « i ».

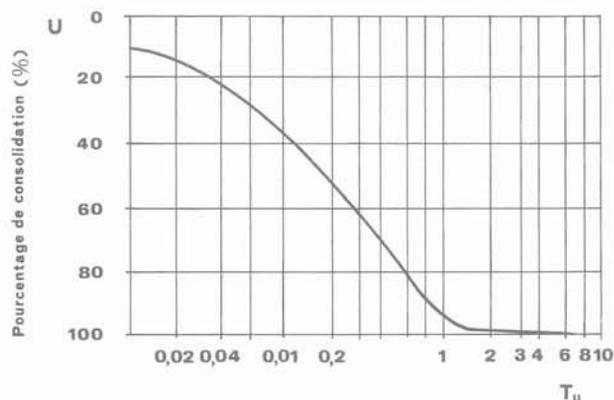


Fig. 2. — Relation entre U et T_u d'après Terzaghi et Frölich pour une couche intercalaire semi-perméable.

Fig. 2. — Relationship between U and T_u for a semi-permeable interlayer according to Terzaghi and Frölich.

Le pourcentage de consolidation est déterminé à partir du graphique de la figure 2, comme fonction du facteur T_u , donné par l'expression suivante :

$$T_u = \frac{4C_v}{H^2} \cdot t \quad (3)$$

où :

C_v est le coefficient de consolidation en m^2/s déterminé en laboratoire ;

t est le temps de consolidation en secondes ;

H représente le chemin de drainage en m, c'est-à-dire, la distance maximale que doit parcourir l'eau, pour atteindre une zone drainante en suivant toujours le plus court chemin.

Le coefficient d'emménagement, dû à la consolidation donné par l'équation (1), représente une valeur moyenne pour la période considérée.

2.2.2. Signification pratique

En comparant les équations (1) et (2), on note que l'on passe de l'une à l'autre en remplaçant h par $U \cdot h$ qui est appelé épaisseur efficace h_{ef} .

Physiquement, l'épaisseur efficace est la partie de la couche semi-perméable qui est en contact direct avec les couches perméables et qui est effectivement compactée pendant la période considérée.

Si la couche est épaisse, l'épaisseur efficace est, en fait, divisée en deux parties situées au toit et au mur de la couche intercalaire (figure 3).

Si la couche est mince, les deux parties sont réunies et toute la couche est compactée.

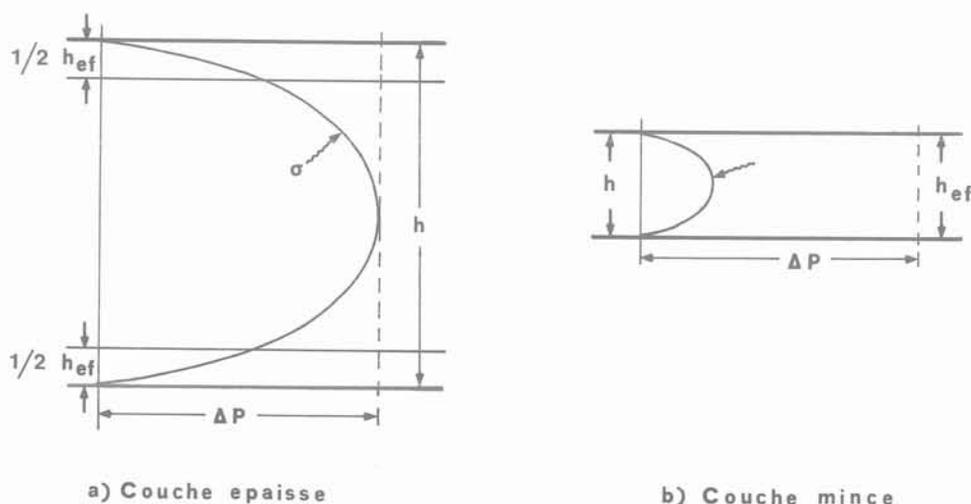


Fig. 3. — Schéma relatif à la notion d'épaisseur efficace H_{ef} .
Fig. 3. — Diagram illustrating the concept of the effective thickness h_{ef} .

Dans l'application pratique du calcul du coefficient d'emmagasinement, on admet que le coefficient de consolidation C_v est égal à $5.10^{-8} m^2/s$ représentant la valeur moyenne des mesures prises en laboratoire, citées dans l'ouvrage de TERZAGHI [14].

Pour déterminer le chemin de drainage H d'une couche argileuse semi-perméable et par conséquent son épaisseur pour laquelle le pourcentage de consolidation $U = 95\%$, correspondant selon TERZAGHI à $T_u = 1$ (voir figure 2), on utilise l'équation (3) en considérant une période de temps $t = 20$ ans ou $6,3.10^8$ secondes, correspondant à l'échéance moyenne des prévisions des modèles :

$$T_u = \frac{4 \times 5.10^{-8}}{H^2} \times 6,3.10^8 = 1$$

d'où $H \approx 10$ m.

On en conclut que toutes les couches d'épaisseur inférieure à 10 m seront entièrement compactées dans le temps considéré ($t = 20$ ans).

Pour les couches d'épaisseur supérieure à 10 m, le calcul de l'épaisseur efficace ($h_{ef} = U.h$) montre que,

pour les mêmes hypothèses, celle-ci est approximativement constante et égale à 10 m.

L'équation (1) devient alors :

$$S = \gamma_w \sum_{i=1}^N (m_{vi} \cdot h_{efi}) \tag{4}$$

où :

h_{efi} est l'épaisseur efficace de la couche intercalaire semi-perméable « i » en mètres ($h_{ef} = h$ pour $h \leq 10$ m et $h_{ef} = 10$ m pour $h > 10$ m).

Il est évident que si la couche argileuse semi-perméable est très épaisse, son épaisseur efficace est divisée en deux parties, situées au toit et au mur de la couche : on prend alors pour le mur et également pour le toit $h_{ef} = 5$ m.

Pour pouvoir utiliser l'équation (4), on doit connaître le coefficient de compressibilité volumétrique m_v , qui est fonction de la contrainte effective σ (figure 4) à laquelle le sol est soumis.

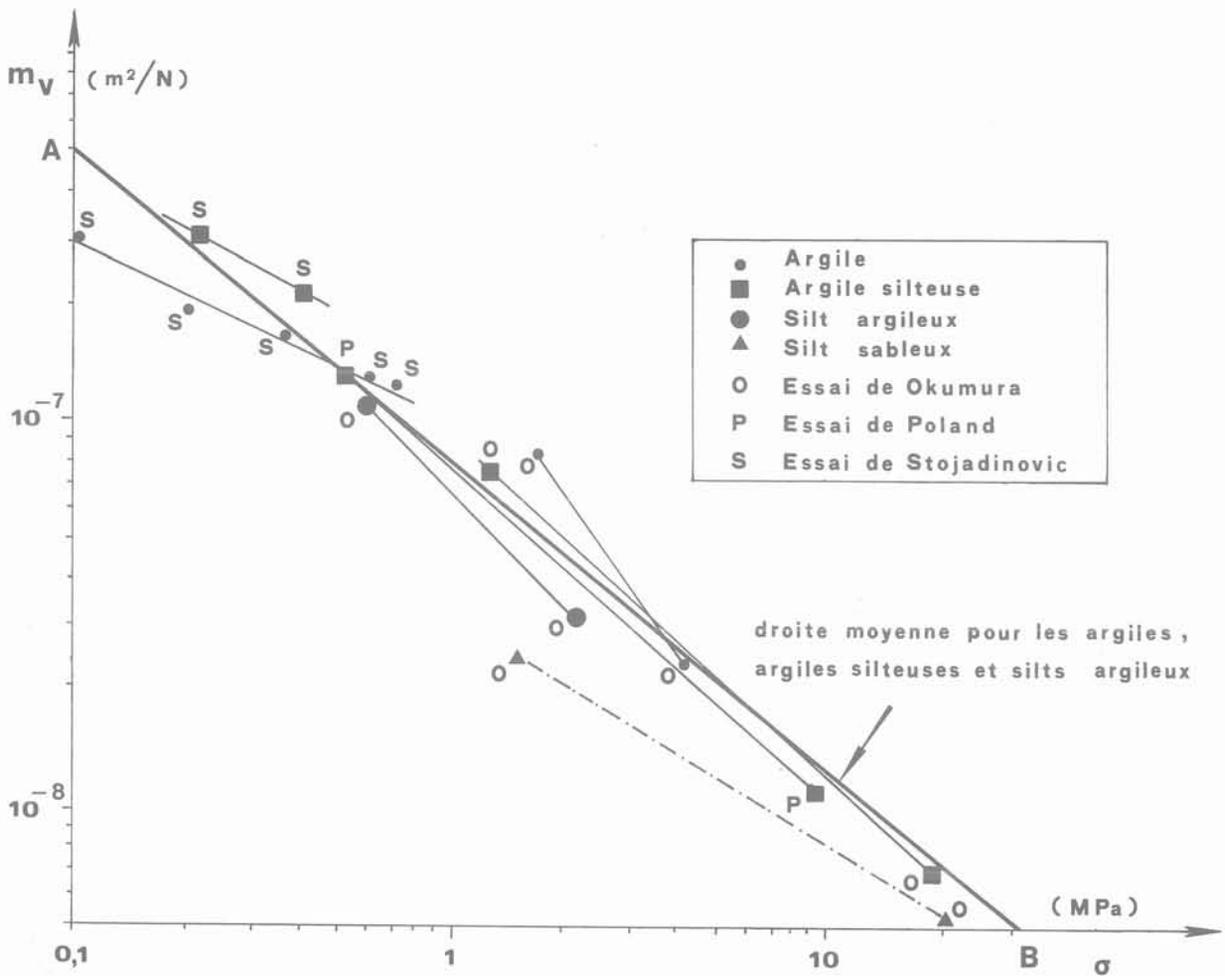


Fig. 4. — Relation entre le coefficient de compressibilité volumétrique m_v et la contrainte effective σ d'après les résultats de quelques essais de Okumura, Poland et Stojadinovic.

Fig. 4. — Relationship between the compressibility index and the effective stress as derived from experimental results by Okumura, Poland and Stojadinovic.

A partir du graphique de la figure 4, en échelle logarithmique, sur lequel sont résumés les résultats de quelques essais de OCUMURA, POLAND et STOJADINOVIC, relatifs à la détermination de m_v en fonction de σ , on constate que la dispersion de la plupart des résultats est assez faible, compte tenu du caractère du phénomène. Tous les résultats relatifs à l'argile, l'argile silteuse et le silt argileux ont ainsi pu être représentés par une seule droite. La droite AB du graphique de la figure 4 correspond à la droite moyenne pour les argiles, argiles silteuses et silts argileux.

Puisque le coefficient de compressibilité volumétrique d'une couche est fonction de sa profondeur par rapport au sol, pour trouver la relation existant entre le coefficient de compressibilité volumétrique m_v et la profondeur M , on utilise les résultats de MURAYAMA, qui a montré que la pression de préconsolidation est sensiblement supérieure à la pression due au poids des terrains sus-jacents pour toutes les couches plus profondes que 20 m, le rapport étant de l'ordre de 1,5.

Si l'on admet que le poids spécifique du milieu poreux saturé est de l'ordre de 2.10^4 N/m^3 et que l'effet de l'artésianisme sur la contrainte effective est négligeable, on arrive à la relation approchée entre la contrainte effective σ et la profondeur M :

$$\sigma = 0,3 \cdot M \quad (5)$$

D'après cette relation, on peut calculer la valeur du coefficient de compressibilité volumétrique d'une for-

mation argileuse en fonction de sa profondeur par rapport au sol.

3. APPLICATION AU CAS DE L'AQUIFÈRE STRATIFIÉ DE LA PLAINE DE SALONIQUE ENTRE LES RIVIÈRES AXIOS ET GALLIKOS RÉSULTATS OBTENUS

Les nappes souterraines situées dans les sédiments quaternaires de la plaine de Salonique entre les rivières Axios et Gallikos, sont pompées par plusieurs forages. Les forages d'exploitation, les plus importants dont la profondeur varie de 120 à 220 m, sont notés sur la carte de la figure 5.

Les forages d'exploitation de la région ci-dessus ont été construits à partir de la fin de la décennie de 1960 jusqu'au début de la décennie de 1970 ; ils traversent un grand nombre d'aquifères successifs d'environ 1 à 4 m d'épaisseur. Ces aquifères sont constitués par des couches de sables, de graviers et de galets, séparés entre eux par des couches argileuses imperméables ou semi-perméables d'épaisseur 3 à 30 m environ. A l'exception de la couche argileuse qui correspond aux dépôts du pro-delta du Delta de la rivière Axios et qui se caractérise comme étant une formation imperméable, toutes les autres couches argileuses intercalaires se

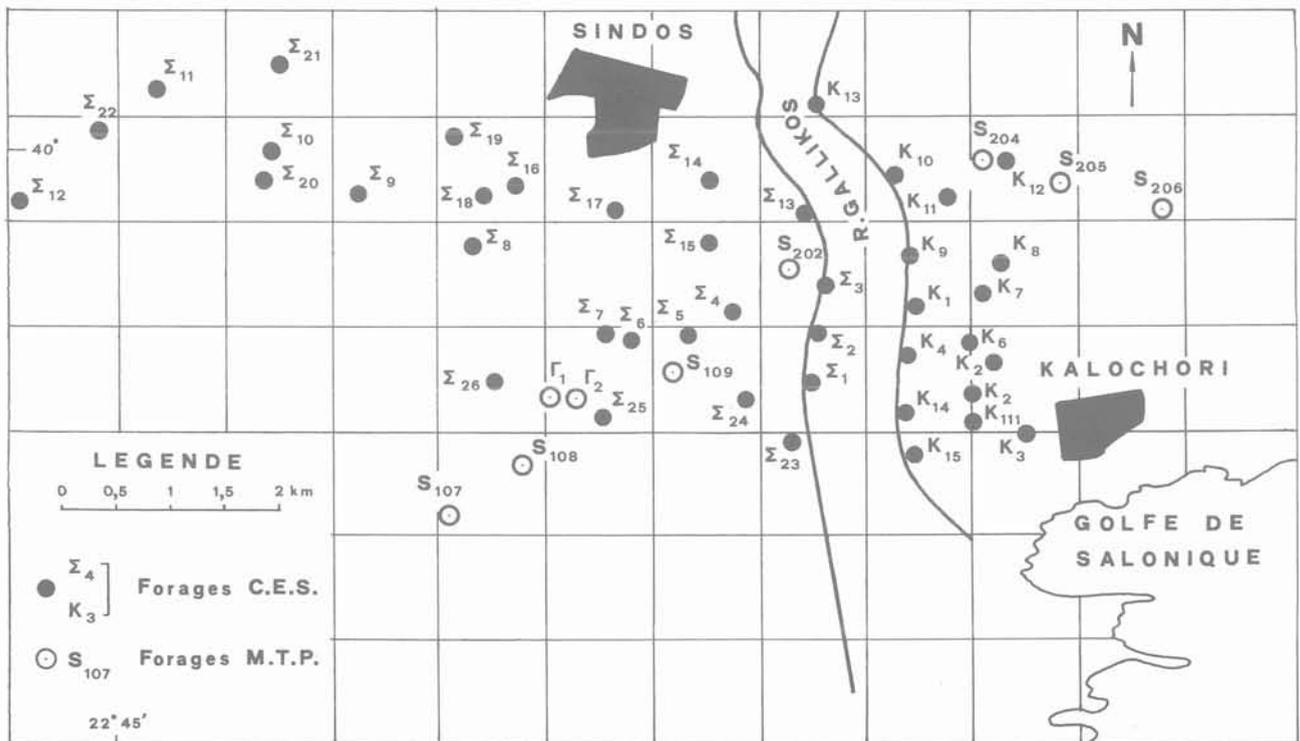


Fig. 5. — Emplacements des forages dans la région étudiée.
Fig. 5. — Locations of boreholes in the area of investigation.

caractérisent comme des formations semi-perméables d'après les résultats des analyses granulométriques. La caractérisation de ces couches argileuses comme formations semi-perméables, a été basée en plus sur les résultats des essais initiaux de pompage dans les forages (courbe caractéristique entre le rabattement observé et le temps de pompage). Pour les exigences de ce travail, la détermination exacte des niveaux des formations argileuses intercalaires rencontrés dans les forages a été réalisée à partir du carottage par rayons gamma (diagrammes de radioactivité naturelle).

D'après les résultats obtenus, d'une part par des essais de pompage et d'autre part par des analyses granulométriques, pétrographiques et morphoscopiques des formations détritiques traversées par les forages, les aquifères précités ont des caractéristiques individuelles, mais comme ils sont exploités tous ensemble, on peut ignorer ces caractéristiques et envisager leur comportement global. On peut, donc, considérer ce système

partir des essais initiaux de pompage dans les forages $\Gamma_{2'}$, Σ_{17} et Σ_{14} et d'autre part à partir de la compaction des couches argileuses intercalaires semi-perméables qui apparaissent dans les forages précités. Dans le premier cas, les valeurs du coefficient d'emmagasinement à court terme (coefficient d'emmagasinement de Theis) de l'aquifère stratifié sont respectivement $2,7 \cdot 10^{-3}$, $4,4 \cdot 10^{-3}$ et $3,8 \cdot 10^{-3}$, tandis que, dans le deuxième cas, les valeurs du coefficient d'emmagasinement à long terme, qui correspondent aux formations argileuses intercalaires, semi-perméables, sont données explicitement dans les tableaux I, II et III.

D'après ces résultats, on constate que la valeur du coefficient d'emmagasinement à long terme de l'aquifère stratifié est de l'ordre de 10^{-2} . Il est évident que cette valeur du coefficient d'emmagasinement à long terme est théorique et dépend de divers facteurs, tels que la structure et la géométrie des couches perméables et semi-perméables de l'aquifère stratifié. Pourtant, la

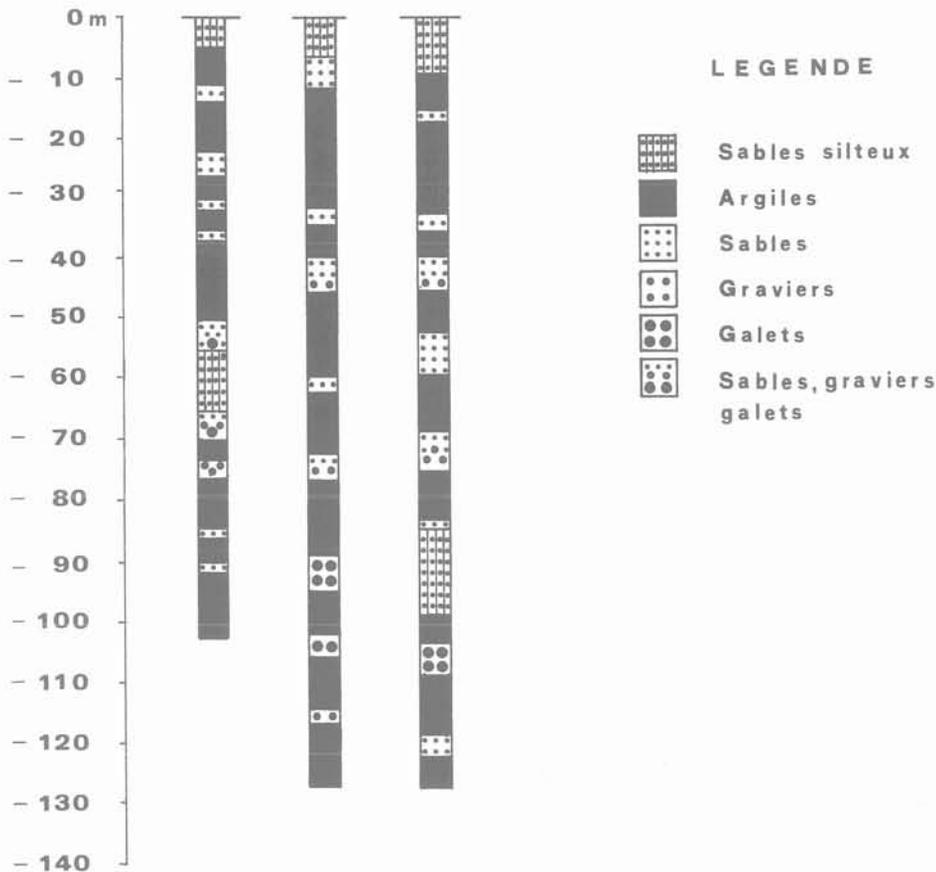


Fig. 6. — Coupes lithologiques des forages d'exploitation de la région étudiée.

Fig. 6. — Lithological logs of producing boreholes in the area of investigation.

comme un aquifère stratifié où les couches argileuses semi-perméables à faible et moyenne profondeurs jouent le rôle d'intercalations.

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié de la plaine de Salonique entre les rivières Axios et Gallikos ont été déterminées, d'une part à

grandeur de la valeur du coefficient d'emmagasinement à long terme montre que, indépendamment de la diminution de la porosité des couches perméables, le tassement des couches argileuses intercalaires, semi-perméables, dû à l'exploitation de longue durée peut augmenter considérablement la valeur du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié qui s'étend

Tableau I. Evaluation du coefficient d'emménagement à long terme pour le forage Γ_2

| Intervalle d'apparition des niveaux argileux semi-perméables en m | Profondeur moyenne en m | Epaisseur en m | | Coefficient de compressibilité m_v en m^2/N | Coefficient d'emménagement à long terme S |
|---|-------------------------|----------------|-------------------|---|---|
| | | réel h | efficace h_{ef} | | |
| 26 - 30,5 | 28,25 | 4,5 | 4,5 | $9,0 \cdot 10^{-8}$ | $4,05 \cdot 10^{-3}$ |
| 31 - 35 | 33,00 | 4,0 | 4,0 | $8,2 \cdot 10^{-8}$ | $3,28 \cdot 10^{-3}$ |
| 70 - 73 | 71,50 | 3,0 | 3,0 | $4,5 \cdot 10^{-8}$ | $1,35 \cdot 10^{-3}$ |
| 76 - 84 | 80,00 | 8,0 | 8,0 | $4,0 \cdot 10^{-8}$ | $3,20 \cdot 10^{-3}$ |
| 85 - 90 | 87,50 | 5,0 | 5,0 | $3,8 \cdot 10^{-8}$ | $1,90 \cdot 10^{-3}$ |
| 91 - 102 | 96,50 | 11,0 | 10,0 | $3,5 \cdot 10^{-8}$ | $3,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | | | | | $S = 1,73 \cdot 10^{-2}$ |

Tableau II. Evaluation du coefficient d'emménagement à long terme pour le forage Σ_{17}

| Intervalle d'apparition des niveaux argileux semi-perméables en m | Profondeur moyenne en m | Epaisseur en m | | Coefficient de compressibilité m_v en m^2/N | Coefficient d'emménagement à long terme S |
|---|-------------------------|----------------|-------------------|---|---|
| | | réel h | efficace h_{ef} | | |
| 21 - 31 | 26,00 | 10,0 | 10,0 | $9,4 \cdot 10^{-8}$ | $9,40 \cdot 10^{-3}$ |
| 45 - 59 | 52,00 | 14,0 | 10,0 | $5,6 \cdot 10^{-8}$ | $5,60 \cdot 10^{-3}$ |
| 61 - 72,5 | 66,75 | 10,5 | 10,0 | $4,8 \cdot 10^{-8}$ | $4,80 \cdot 10^{-3}$ |
| 76 - 88 | 82,00 | 12,0 | 10,0 | $3,9 \cdot 10^{-8}$ | $3,90 \cdot 10^{-3}$ |
| 94 - 101 | 97,50 | 7,0 | 7,0 | $3,5 \cdot 10^{-8}$ | $2,45 \cdot 10^{-3}$ |
| 105 - 114 | 109,50 | 9,0 | 9,0 | $3,2 \cdot 10^{-8}$ | $2,97 \cdot 10^{-3}$ |
| 116 - 127 | 121,50 | 11,0 | 10,0 | $3,1 \cdot 10^{-8}$ | $3,10 \cdot 10^{-3}$ |
| | | | | | $S = 3,22 \cdot 10^{-2}$ |

Tableau III. Evaluation du coefficient d'emménagement à long terme pour le forage Σ_{14}

| Intervalle d'apparition des niveaux argileux semi-perméables en m | Profondeur moyenne en m | Epaisseur en m | | Coefficient de compressibilité m_v en m^2/N | Coefficient d'emménagement à long terme S |
|---|-------------------------|----------------|-------------------|---|---|
| | | réel h | efficace h_{ef} | | |
| 22 - 32 | 27,00 | 10,0 | 10,0 | $9,3 \cdot 10^{-8}$ | $9,30 \cdot 10^{-3}$ |
| 45 - 52 | 48,50 | 7,0 | 7,0 | $6,0 \cdot 10^{-8}$ | $4,20 \cdot 10^{-3}$ |
| 59 - 68 | 63,50 | 9,0 | 9,0 | $4,9 \cdot 10^{-8}$ | $4,41 \cdot 10^{-3}$ |
| 75 - 84 | 79,50 | 9,0 | 9,0 | $4,0 \cdot 10^{-8}$ | $3,60 \cdot 10^{-3}$ |
| 98 - 103 | 100,50 | 5,0 | 5,0 | $3,4 \cdot 10^{-8}$ | $1,70 \cdot 10^{-3}$ |
| 108 - 118 | 113,00 | 10,0 | 10,0 | $3,1 \cdot 10^{-8}$ | $3,10 \cdot 10^{-3}$ |
| 122 - 127 | 124,50 | 5,0 | 5,0 | $3,0 \cdot 10^{-8}$ | $1,50 \cdot 10^{-3}$ |
| | | | | | $S = 2,78 \cdot 10^{-2}$ |

dans les dépôts quaternaires de la plaine de Salonique entre les rivières Axios et Gallikos. Cet aspect théorique est renforcé par les résultats de quelques essais de pompage qui ont été réalisés dans les forages de deux aquifères stratifiés avec des couches argileuses intercalaires semi-perméables, au Sahara septentrional (BORRELI, 1971, 1978) et en Libye (MAILLARD-ROSET, 1976), en vue de déterminer les nouvelles valeurs du

coefficient d'emménagement après une exploitation de longue durée. Les résultats de ces essais ont montré une augmentation importante du coefficient d'emménagement des aquifères ci-dessus, de l'ordre de 100. Plus précisément, la valeur du coefficient d'emménagement des aquifères ci-dessus a augmenté de 10^{-5} à 10^{-3} .

4. CONCLUSION

A partir des valeurs du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère stratifié à faible et moyenne profondeur de la plaine de Salonique, entre les rivières Axios et Gallikos, obtenues par les essais initiaux de pompage et par la consolidation des couches argileuses intercalaires semi-perméables, on conclut que l'exploitation de longue durée doit avoir apporté une augmentation importante (peut-être un décuplement) de la valeur du coefficient d'emmagasinement.

BIBLIOGRAPHIE

1. BOGOMOLOV G. et SILIN-BEKTCHOURINE A. (1955), *Hydrogéologie Spécialisée*, Ed. B.R.G.M. (37), Paris.
2. BOGOMOLOV G. (1962), *Hydrogéologie et notions de géologie d'ingénieur*, Ed. Paix, Moscou.
3. BORELI M. (1978), *Hétérogénéité des milieux poreux et effet d'échelle*, Symp. Intern. de l'Assos. Inter. de Rech. Hydrauliques. Thessaloniki, Grèce. Ed. Univers. Aristote de Thessaloniki., Thessaloniki.
4. CASTANY G. (1967), *Traité pratique des eaux souterraines*, Ed. Dunod, Paris.
5. DEMIRIS C. (1984), *Géologie du génie civil*, Ed. U.A.T., Thessaloniki.
6. LAMBE T. and WHITMAN R. (1969), *Soil mechanics*, Ed. John Wiley, New York.
7. LEE I. (1968), *Soil mechanics*, Ed. Butterworths, London.
8. MAILLAND-ROSSET G. (1976), *Etude d'un aquifère profond hétérogène en zone aride, plaine du Wadi Al Hira et du Wadi Abu Shaybah Tripolitaine (Libye)*, Thèse 3^e cycle, U.S.M.G.
9. MELADIOTIS J. (1984), *Etude géologique de la partie Est de la plaine de Salonique entre les rivières Axios et Gallikos où se développent des aquifères exploitables*, Thèse U.A.T., Thessaloniki.
10. MURAYAMA S. and SHIBATA T. (1966), *Flow and stress relaxation of clays*, Int. Symp. on Rheology and Soil Mech. Grenoble, France. Ed. Springer Verlag, New York, pp. 99-129.
11. POLAND J., LOFGREN B. and RILLEY F. (1972), *Glossary of selected terms useful in studies of the mechanics of aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal*, U.S. Geological Survey Water-Supply, paper 2025.
12. SCHNEEBELI G. (1978), *Hydraulique souterraine*, Ed. Eyrolles, Paris.
13. SCHLOSSER F. (1973), *Hypothèses et théories pour la prévision des tassements des remblais sur sols compressibles*, Bul. de Liaison L.P.C. Special T, Paris, pp. 26-57.
14. TERZAGHI K. et PECK R. (1957), *Mécanique des sols appliquée*, Ed. Dunod, Paris.
15. TODD D. (1959), *Groundwater hydrology*, Ed. John Wiley, New York.
16. U.N.E.S.C.O. (1972), *Etude des ressources en eau du Sahara septentrional*, Plaque n° 1, Paris.

application combinée de l'analyse structurale, de la géostatistique et de la théorie des blocs clés à l'étude des problèmes de stabilité et de confortement des travaux miniers

combined application of structural analysis, geostatistics
and key-block theory in the study of problems of stability
and reinforcement on mining works

M. VINCHES

Ecole des Mines d'Alès*
Bureau de Recherches Géologiques et Minières**

Rev. Franç. Géotech. n° 45, p.p. 59-70 (octobre 1988)

Résumé

L'étude présentée ici vise la mise en place d'une méthodologie qui permette le dimensionnement d'ouvrages miniers, souterrains ou non, en fonction de la structure géologique du massif rocheux dans lequel ils se trouvent.

Trois étapes de cette méthodologie sont exposées successivement :

- la détermination des caractéristiques statistiques et géostatistiques des populations de fractures ;
- la génération, par simulation, d'un champ de fractures de caractéristiques statistiques données ;
- l'étude de la stabilité de blocs isolés, définis par ces fractures ; ceci grâce à la théorie des blocs clés.

A la suite de cette chaîne de traitement des données structurales, des règles d'action devront être tirées, concernant la conception et l'exécution des ouvrages à réaliser.

Abstract

The study presented in this paper aims at the setting up of a methodology which allows the design of mining works, underground or otherwise, taking into account the geological structure of rock masses in which they are located.

Three stages of this methodology are presented :

- the determination of statistical and geostatistical characteristics of the population of fractures ;*
- the generation of a field of fractures, with given statistical characteristics, by simulation ;*
- the study of the stability of isolated blocks defined by these fractures, by means of the key-block theory.*

Following the processing of this structural data, rules of action, concerning the conception and execution of the planned structure, will be drawn up.

* 6 avenue de Clavières, 30107 Alès Cedex.

** Département d'ingénierie géotechnique, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 02.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre d'une modélisation et d'une étude de stabilité de massifs rocheux fracturés, considérés comme assemblages de blocs, on peut généralement distinguer deux étapes qui sont successivement, la détermination de la géométrie des blocs liée à la géologie du site, et l'étude de la stabilité des dits blocs. Plusieurs types d'approches, statistiques ou déterministes, peuvent être envisagés pour la caractérisation de la géométrie des blocs (D. HELIOT, 1987; J. FINE, T. KORINI, 1987; M. VINCHES, 1987; P.M. WARBURTON, 1985), comme pour l'étude de leur stabilité (P. CUNDALL, 1980; P. CUNDALL et al., 1985; J. LEMOS et al., 1987; L.J. LORIG et al., 1986; R. GOODMAN et G.H. SHI, 1985; P.M. WARBURTON, 1987; J. FINE et al., 1987).

La démarche suivie dans cette étude se base sur les travaux en géologie structurale de H. MASSOUD (1987); H. MASSOUD et J.P. CHILES (1986); J.P. CHILES (1987), permettant la modélisation statistique et géostatistique d'un champs de fractures. On présente le cas d'études réalisées sur deux mines françaises: la mine souterraine de Fanay-Augeres de la COGEMA, la mine à ciel ouvert des Bondons de la Compagnie Française de MOKTA.

Dans une deuxième partie, on expose comment grâce à des programmes de génération de champs de fractures (H.M. Peggy GILMOUR et al., 1986; D. BILLAUX, 1986) il est possible d'obtenir une réalisation particulière du phénomène aléatoire, étudié dans la première partie, de paramètres statistiques connus.

On décrit ensuite comment la connaissance des intersections des fractures engendrées doit pouvoir permettre la détermination de blocs, délimités par les plans de fractures, de dimensions finies. On pourra alors étudier leur stabilité, grâce à la théorie des blocs clés, et en déduire des règles d'action concernant la conception (dimensionnement, orientation, forme,...) d'ouvrages miniers.

En conclusion sont présentés quelques points de discussion, et l'état actuel des recherches menées sur ce sujet à l'Ecole des Mines d'Alès, et au B.R.G.M.

Il convient de noter que la méthodologie exposée en est encore à un stade de recherche, et n'a été appliquée, à ce jour, que sur des sites expérimentaux dans le cas de schistes et de granites.

2. MODÉLISATION DU CHAMP DE FRACTURES - CAS D'APPLICATION

Cette partie a pour objet de préciser les caractéristiques spécifiques de la modélisation des champs de fractures par les techniques de la géostatistique, par rapport aux techniques basées sur la « statistique classique », ces dernières ne permettant pas de prendre en compte la structuration spatiale des phénomènes naturels étudiés. Nous basant sur les travaux réalisés par H. MASSOUD

et J.P. CHILES principalement, nous reprendrons la démarche complète permettant d'aboutir à ce type de modélisation, en trois étapes principales: l'obtention des données de base, suivie de l'analyse structurale, puis de la modélisation, de la fracturation. Nous ferons appel à des résultats obtenus sur deux sites différents: la mine souterraine de Fanay-Augeres (Haute-Vienne) dans le granite du massif de Saint-Sylvestre, et la mine à ciel ouvert des Bondons (Lozère), principalement dans des schistes métamorphiques et quartzites de la série cévenole, au contact du batholite du Mont-Lozère.

2.1. Obtention des données de base

Nous distinguerons dans cette partie, les relevés de fractures, du traitement statistique qui en est fait, avant de faire part de quelques remarques de portée générale.

Les relevés de fractures

Les relevés ont été effectués, selon les trois phases suivantes:

1. lavage de la partie de galerie ou d'affleurement étudiée;
2. carroyage à la peinture;
3. numérotation et repérage des fractures.

Ainsi, d'une part, toutes les fractures sont mises en évidence, d'autre part elles peuvent être aisément repérées par rapport à un référentiel global pour l'ensemble de la station de mesure. Enfin la dernière étape permet le comptage des fractures en s'assurant de les prendre toutes en compte.

Au total, ce sont 2940 fractures qui ont été ainsi échantillonnées, en galeries pour la mine Fanay, 2317 fractures en affleurements pour la mine des Bondons.

Le traitement statistique

Afin de caractériser chaque fracture, divers paramètres ont été sélectionnés. A une analyse statistique globale de l'ensemble des fractures dont le dépouillement se serait sans doute révélé difficile quant à l'interprétation des résultats, deux types de démarches pouvaient être préférés:

1. constituer des familles de fractures regroupées d'après leur origine tectonique, ou leur histoire;
2. constituer des familles de façon subjective, à partir de stéréogrammes sur canevas de WULFF.

En pratique, dans le cas de Fanay, étudié antérieurement au site des Bondons, sur quelques 200 fractures, H. MASSOUD a cherché par une étude préalable, s'il y avait corrélation entre les démarches 1 et 2. L'inconvénient de la première approche est de multiplier les familles, et de perdre l'information concernant les fractures non prises en compte dans les limites de définition des familles tectoniques principales. La deuxième méthode — distribution des fractures en familles dépendant du choix de l'opérateur —, englobe la distribution précédente; elle permet de conserver 80 % des fractures levées dans une station donnée. En outre cette

méthode a l'avantage d'une certaine souplesse d'utilisation, permettant de faire intervenir l'expérience de géologues de terrain ayant une bonne connaissance du site.

Une troisième démarche pour la constitution de familles, visant à prendre en compte la totalité des relevés de fractures consiste à générer les frontières de familles autour de pics de fréquence jusqu'à la rencontre des frontières des autres familles. L'inconvénient majeur de cette dernière façon de procéder, est d'englober dans une même famille, des fractures d'origine tectonique différente.

Pour le cas des Bondons, en revanche, la totalité des paramètres caractéristiques d'une fracture ont été relevés, permettant une étude structurale plus fine, servant d'autres buts que la seule étude de la stabilité de blocs rocheux. Il s'agit, notamment, de la mise en évidence de directions de schistosité variant selon les stations de mesures, et de corrélations entre directions, de structures particulières et la présence de divers matériaux de remplissage (M. VINCHES et al., 1988).

Remarques générales

Les familles directionnelles perpendiculaires aux plans d'observation sont mieux estimées que celles qui leur sont parallèles. Sauf dans le cas de sondages verticaux, les familles horizontales sont très mal représentées. Dans une note technique, J.L. YOW Jr (1987), donne des indications sur les problèmes de « zones aveugles », sur les pondérations à mettre en place pour tenir compte des biais introduits lors des mesures, et sur la prise en compte d'erreurs de mesures.

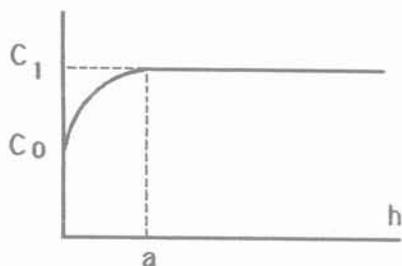


Fig. 1 a. — Variogrammes sur les orientations, d'après H.MASSOUD — 1987.

On note à ce sujet que si les stations de mesure sont disposées de façon aléatoire, leur direction liée à une disposition des supports constitués par des parements de galeries (cas de Fanay), ou un gradin à ciel-ouvert (cas des Bondons), est par contre imposé.

L'étude statistique du lot de fractures ainsi recueillies et traitées confirme l'organisation des fractures en familles, connues des géologues, dont on essaiera d'étudier la structure spatiale.

2.2. Analyse structurale

L'analyse faite dans le cas de Fanay-Augeres est basée sur des supports rectangulaires de taille constante de 5 mètres de long par 2 mètres de haut. Dans un cas autre (cas des Bondons par exemple), il faudra de même définir une taille de support dans lequel seront décrites les variables. Il convient lors de ce choix, de se rappeler que seules les structures de portée supérieure à la taille du support seront éventuellement révélées par l'analyse structurale.

Les variables qui ont été étudiées peuvent être considérées comme appartenant à deux types distincts :

— variables ordinaires visant à rendre compte de la structuration des fractures en terme de nombre de centres et de longueur cumulée, de façon à estimer et simuler des densités de fractures ;

— variables particulières telles que la distance interfracturale horizontale qui, pour les familles sub-verticales, a été étudiée avec deux variantes : distance interfracturale en nombre et en mesure, ceci essentiellement pour contrôler si la distribution spatiale des

| STATION: LASSAGNE | | | | |
|--|----------|------------|-----------|---------|
| ERREURS DE MESURES | FAMILLES | PARAMETRES | DIRECTION | PENDAGE |
| VARIANCE : 16° sur le pendage VARIANCE : 64° sur la direction | 1 | C_0 | 1000 | 120 |
| | | C_1 | 1250 | 300 |
| | | a | 6 | 6 |
| | 2 | C_0 | 200 | 38 |
| | | C_1 | 250 | 50 |
| a | | 6 | 6 | |
| 3 | C_0 | 130 | 60 | |
| | C_1 | 315 | 60 | |
| | a | 12 | ∞ | |
| 4 | C_0 | 210 | 44 | |
| | C_1 | 320 | 53 | |
| | a | 5 | 5 | |
| 5 | C_0 | 170 | 53 | |
| | C_1 | 250 | 95 | |
| | a | 5 | 5 | |

Fig. 1 a. — Variogrammes on the orientations, from H. MASSOUD — 1987.

fractures est aléatoire. La variable distance interfracturale en mesure est définie en tout point d'une ligne horizontale h du parement. Elle prend comme valeur l'espacement existant entre la première fracture à gauche et la première fracture à droite de ce point, intersectant cette ligne h . Pour la variable distance interfracturale en nombre, on affecte un numéro à chaque intersection d'une fracture avec la ligne horizontale h , et une valeur de distance interfracturale.

Ces variables étant définies, il a été procédé, dans le cas de Fanay, à une analyse variographique sur plusieurs d'entre elles, dont les résultats ont donné lieu aux interprétations physiques suivantes, éventuellement transposables à d'autres cas d'observations :

— *Effet de pépite* :

sur les variogrammes estimés sur les variables caractérisant l'orientation d'un plan de fracture, la discontinuité à l'origine du variogramme (Fig. 1a) signifierait, selon H. MASSOUD et al (1986), que deux fractures proches, dans une même famille, ne sont pas rigoureusement parallèles, et peuvent donc se croiser. Géologiquement ce phénomène se conçoit bien, et semble lié à la définition des frontières des familles. Si la variabilité de l'orientation entre en jeu (la dispersion est visible sur le canevas de WULFF), l'erreur de mesure, dont nous avons déjà noté l'importance, intervient également dans ce phénomène.

— *Composante continue* :

cette composante est caractérisée par un palier et une portée. Dans le cas étudié (distance interfracturale en mesure), deux structures gigognes ont été mises en évidence, de portées distinctes vers 5-6 mètres, et environ 30 mètres. La première pourrait correspondre à un regroupement des fractures en paquets de longueur égale à 5-6 mètres. La deuxième serait la distance séparant ces paquets de fractures, situés à environ 30 mètres les uns des autres.

Un autre aspect important de l'étude de H. MASSOUD a été la mise en évidence d'un seuil de sélection des fractures, appelé seuil critique. Dans le but de rendre possible, en pratique, la définition de la structuration de la fracturation aux grandes distances, il était nécessaire d'avoir des relevés sur des stations de longueur importante, de l'ordre de la centaine de mètres. Afin de gagner du temps pour les opérations de relevés sur le terrain, mais avec le souci de conserver une information suffisante sur la structuration de la fracturation, diverses études ont été réalisées à partir des variogrammes, afin de déterminer si on pouvait se passer d'effectuer certains relevés, sans perdre d'information de façon significative. Ainsi dans le cas de Fanay-Augerès, a-t-on pu mettre en évidence un seuil critique pour la variable « distance interfracturale » égal à 1,5 mètre. La figure 1b montre, en effet, qu'il n'y a pas de changement de l'allure du variogramme pour des longueurs de trace inférieures à 1,5 mètre.

En conclusion, et d'un point de vue global, il est préconisé une démarche en trois temps, permettant d'appréhender la variabilité de la fracturation aux moyennes et grandes distances :

1. Un levé systématique des fractures de longueur

supérieure à 0,20 m, les fractures de taille inférieure définissant des blocs de taille assez faible pour être dégagés lors du purgeage par exemple, sur des stations de mesure d'une longueur de l'ordre d'une centaine de mètres ;

2. La détermination d'un seuil de sélection sur la longueur des traces des fractures (seuil critique) ;

3. Le levé d'autres stations de mesures en se limitant aux fractures dont la longueur de trace est supérieure au seuil de sélection critique.

Ce n'est que sur l'ensemble des données obtenues que sera calé un modèle probabiliste, rendant compte de la structuration du champ de fractures étudié.

2.3. Modélisation de la petite fracturation

La mise en œuvre de cette modélisation peut se décomposer en trois temps :

1. Choix d'un type de modèle ;
2. Mise en place d'une méthode d'estimation des paramètres du modèle ;
3. Test sur la bonne adéquation du modèle à la réalité expérimentale.

Il nous a paru important de détailler cette démarche sur l'exemple de Fanay, à titre d'illustration.

Trois modèles successifs ont été considérés :

Phénomène poissonien

La confrontation des variogrammes expérimentaux aux résultats théoriques d'un phénomène poissonien conduit au rejet de ce modèle. En effet, si le variogramme sur les distances interfracturales en nombre semble présenter une allure pépétique pure correspondant à un phénomène poissonien, les variogrammes sur les distances interfracturales en mesure d'une part, sur le nombre de centres de fractures de l'autre, présentent une allure qui infirme l'hypothèse poissonienne à densité constante.

Processus des salves aléatoires

Ce type de processus est caractérisé de la façon suivante :

- les germes poissoniens sont implantés avec une densité $\varnothing g$;
- le nombre de points dans un nuage centré en x , est $N(x)$;
- les nombres de point par nuage sont indépendants entre eux ;
- chaque point du nuage est implanté en $X + U$, par rapport au germe qui est implanté en X , indépendamment des autres points selon une loi de probabilité $F(X)$. (On a le choix entre différentes fonctions de répartition (exponentielle, gaussienne, uniforme),... la fonction gaussienne a été retenue, a priori, par les auteurs H. MASSOUD et J.P. CHILES.)

En étudiant les schémas permettant de visualiser la disposition spatiale des traces de fractures à deux dimensions, les fractures apparaissent nettement regroupées en paquets, ou nuages, de quelques unités très

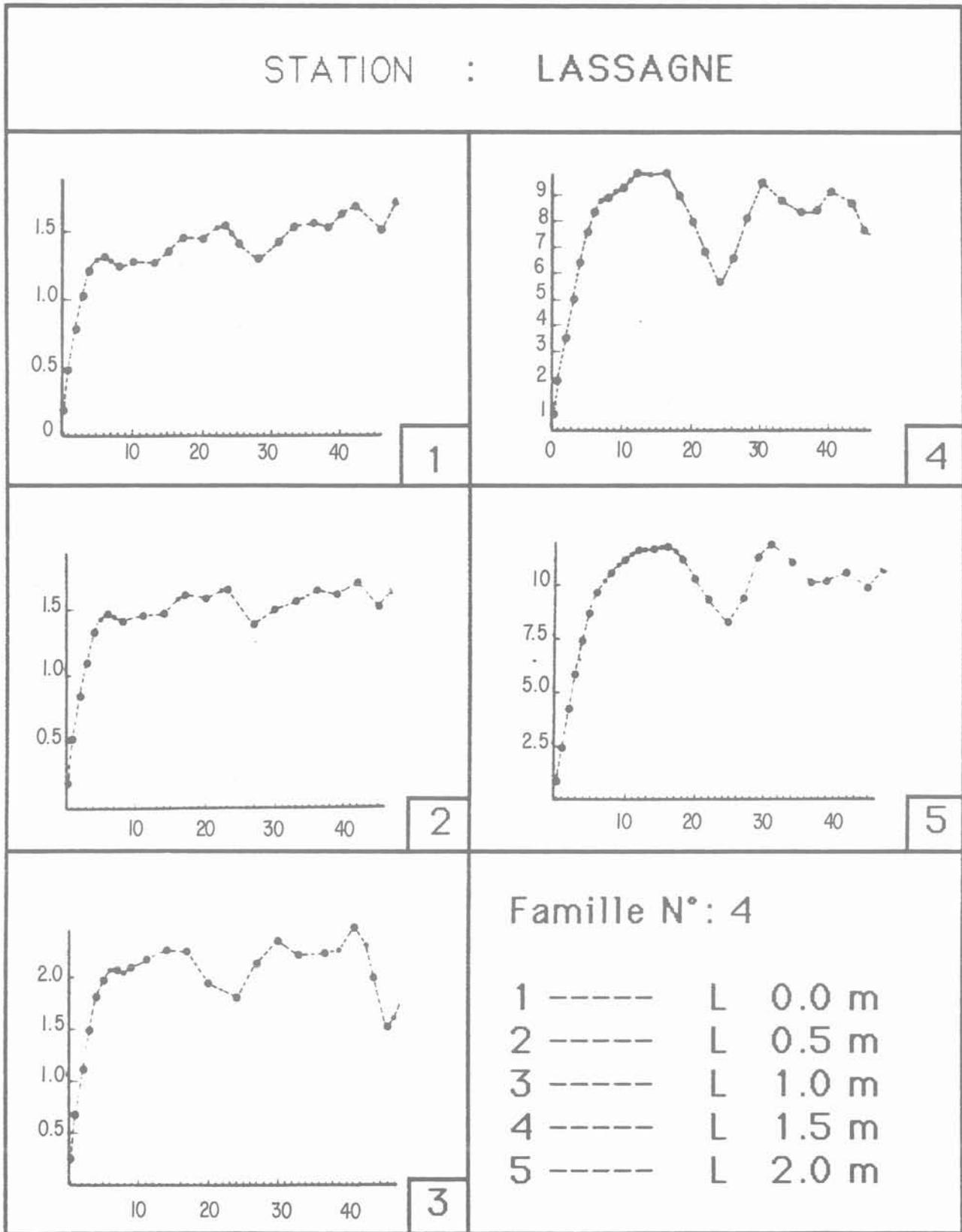


Fig. 1 b. — Variogrammes sur les distances interfracturales en mesure, d'après H. MASSOUD — 1987.
 Fig. 1 b. — Variogrammes on the measurements of spacing of fractures, from H. MASSOUD — 1987.

STATION : LOISEAU 320 -----> FAMILLE 4

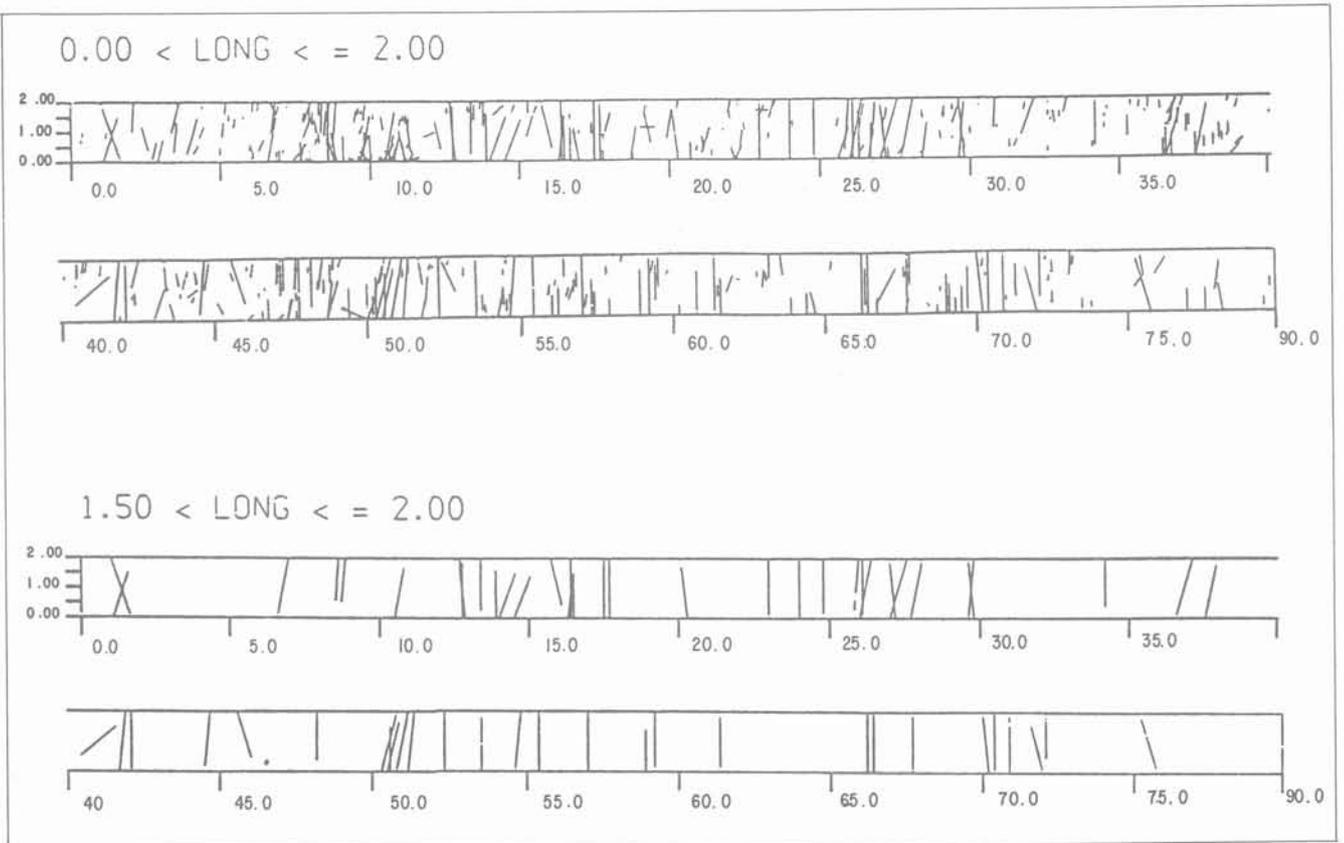


Fig. 2. — Organisation spatiale des fractures
d'après les relevés de H. MASSOUD — 1987.
Fig. 2. — Spatial organisation of fractures,
from measurements of H. MASSOUD — 1987.

resserrées autour d'un « germe », comme le montre la figure 2. De plus ces germes semblent se répartir aléatoirement dans la station, d'où la notion de germes poissonniens qui a été retenue. Toutefois, sur les variogrammes calculés aux grandes distances, une certaine variabilité est mise en évidence, qui est donc liée à une variabilité de la densité de germes. De cette constatation naît la démarche consistant à essayer d'améliorer le modèle de façon à rendre compte de cette structuration aux grandes distances, au moyen de l'étude des processus à densité régionalisée.

Processus à densité régionalisée

Ce dernier modèle, permet d'introduire une corrélation spatiale de la densité de fracturation entre supports voisins, c'est-à-dire une régionalisation de la densité $\varphi_g(x)$.

Il est possible de justifier ce modèle, qui semble correctement décrire la réalité au vu de la comparaison des variogrammes théoriques avec les variogrammes expérimentaux notamment, en considérant que l'hypothèse poissonnienne rend compte du comportement des fractures au niveau local, la densité régionalisée étant

associée à des facteurs tectoniques affectant l'ensemble des fractures, non considérées alors comme individus.

Le modèle de structure du phénomène « fracturation » étant relativement bien cerné, H. MASSOUD et J.P. CHILES avaient deux moyens à leur disposition en vue d'engendrer un champ de fractures. Pour simuler la distribution réelle des longueurs, ils pouvaient soit partir des relevés d'intersection des fractures sur les stations de mesure, soit partir d'un modèle a priori. En fait, l'application de méthodes et calculs de probabilité aux relevés de fracturation dont ils disposaient, leur a évité de choisir un modèle a priori. En effet, des calculs effectués sur des distributions marginales notamment permettent de remonter à la distribution des longueurs réelles des fractures.

Ainsi le principal programme de génération de champs de fractures, basé sur les conclusions des essais de différents modèles, s'organise-t-il de la façon suivante :

on définit d'abord une région de génération parallélépipédique contenant n.m.p. blocs eux aussi parallélépipédiques de dimensions n'.m'.p'. Les fractures sont modélisées par des disques d'épaisseur éventuellement variable. Le diamètre moyen des disques et l'écart-type sur ce diamètre sont ensuite donnés par l'utilisateur,

ainsi que la dispersion selon les trois axes principaux du référentiel global. On se donne ensuite un plan vertical dans cette zone de génération, sur lequel on calcule le réseau formé par les intersections des fractures (disques) qui seront engendrées. Le nombre moyen des disques par salve est ensuite introduit par l'utilisateur. Les germes sont engendrés par le programme selon une loi de Poisson dont on se fixe le paramètre. Les fractures sont alors engendrées de manière pseudo-aléatoire, de façon à ce que les spécifications données par l'utilisateur concernant les lois de distribution des diamètres, des espacements, des rayons, ou des germes, soient respectées.

Nous avons décrit, à partir d'un exemple, une méthode pour définir un modèle probabiliste de champ de fractures, puis le modèle lui-même, représentatif de la réalité telle qu'on peut la percevoir, grâce à l'emploi d'outils géostatistiques. Nous présentons, dans la partie suivante, le calcul des réseaux créés par des fractures, à partir de modélisations diverses ; la modélisation par un schéma de salves poissonniennes à densité régionalisée devant pouvoir être une des modélisations prises en compte.

3. GÉNÉRATION DU RÉSEAU DE FRACTURES

Les programmes que nous allons présenter, initialement écrits dans le cadre des travaux de l'équipe de J. LONG au Lawrence Berkeley Laboratory, H.M. Peggy GILMOUR et al (1986), sont basés sur la modélisation suivante des fractures :

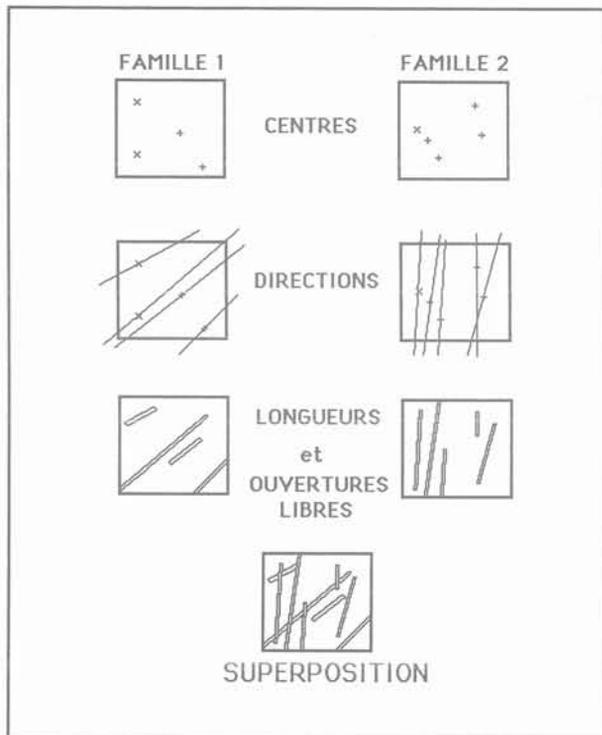


Fig. 3. — Génération à deux dimensions de fractures, famille par famille, avec superposition, d'après D. BILLAUX — 1986.

Fig. 3. — Generation, group by group, of fractures in two dimensions, and superposition, from D. BILLAUX — 1986.

— en trois dimensions, chaque fracture, modélisée par un disque, est identifiée par sa position, son orientation, son rayon et son ouverture libre ;

— en deux dimensions, elle est représentée par un segment de droite caractérisé par son centre, sa longueur, son orientation, et son ouverture libre, matérialisant l'intersection du cylindre plat tridimensionnel avec le plan d'étude.

Dans les deux cas, les fractures sont engendrées pseudo-aléatoirement, famille par famille, de façon indépendante, puis elles sont superposées, comme l'indique, pour le cas bidimensionnel, la figure 3. L'originalité de notre approche, par rapport à d'autres, est de pouvoir introduire à ce niveau la structuration du phénomène mise en évidence, par les techniques géostatistiques : densités variables de germes, diversité des lois de distributions statistiques des rayons, écartements, et ouvertures des fractures simulées, sur la base de relevés expérimentaux.

Les distributions des longueurs de fractures et de leur ouverture libre peuvent être exponentielles, log-normales, ou gamma. Les distributions d'orientations peuvent être gaussiennes ou uniformes. Les fractures sont engendrées dans une région de génération parallélépipède rectangle, dans le cas bidimensionnel, dont les dimensions sont fixées par l'utilisateur. En trois dimensions, les mêmes lois de distribution peuvent s'appliquer aux populations de fractures. Celles-ci sont, dans ce cas, engendrées dans une région — toujours dite de « génération » — de forme sphérique. On peut dans les deux cas bidimensionnel et tridimensionnel, entrer une à une les fractures, de façon déterministe.

Ce modèle de génération permet l'introduction simultanée de fractures positionnées de façon déterministe, et de façon pseudo-aléatoire. On peut également

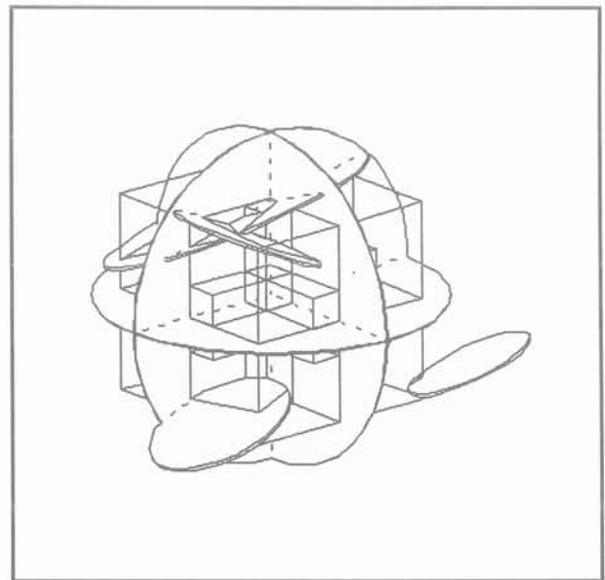


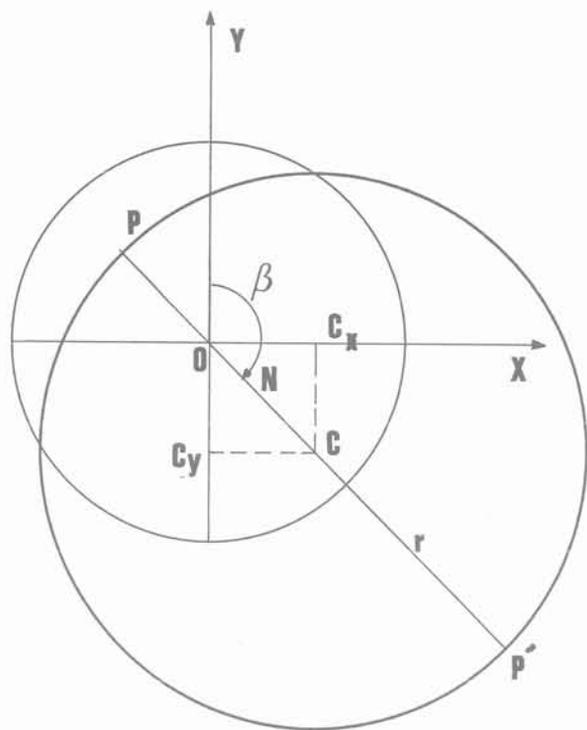
Fig. 4. — Exemple de génération de réseau de fractures, avec simultanément des fractures positionnées de façon déterministe, et engendrées pseudo-aléatoirement.

Fig. 4. — Example of fracture mesh generation including deterministically and statistically generated fractures.

engendrer, de façon déterministe, des cavités à l'intérieur de la zone d'écoulement, de forme parallélépipédiques. La figure précédente donne un exemple de telles réalisations (fig. 4). On remarquera trois cavités et trois fractures majeures perpendiculaires entre elles recoupant des fractures générées pseudo-aléatoirement, les paramètres statistiques de cette génération étant fixés par l'utilisateur.

Les fractures ayant été engendrées, on recherche alors les blocs de dimensions finies, découpés, ou définis par ces fractures qui se recoupent.

On étudie ensuite leur stabilité par la théorie des blocs clés. La reconnaissance de tous les blocs définis par des intersections de fractures fait encore partie des domaines dans lesquels notre recherche est, pour le moment, en cours (D. LIN et al., 1987).



$$ON = R \tan \alpha/2$$

$$OC = R \tan \alpha$$

$$r = R / \cos \alpha$$

$$Cx = R \tan \alpha \sin \beta$$

$$Cy = R \tan \alpha \cos \beta$$

Fig. 5. — Projection stéréographique d'un plan.
Fig. 5. — Stereographic projection of a plane.

4. NOTIONS SUR LA THÉORIE DU BLOC CLÉ, RESTREINTE A L'ÉTUDE DE LA STABILITÉ D'UN BLOC ISOLÉ

Contrairement aux deux précédentes, cette dernière étape de la chaîne de traitement que nous proposons sera présentée comme un point plus bibliographique, basé essentiellement sur l'ouvrage de base de la théorie des blocs clés R.E. GOODMAN et G.H. SHI (1985). Nous renvoyons pour de plus amples développements à J.L. YOW Jr. (1985), J.L. YOW Jr. et al (1987) W.J. BOYLE (1986).

Les principales hypothèses de base de la méthode sont :

- a) les surfaces définissant les fractures sont parfaitement planes ;
- b) l'étendue des plans de fractures est infinie, et il n'y a pas apparition de nouvelles fractures ;
- c) les blocs définis par les intersections des fractures sont considérés comme rigides ;
- d) les orientations, pendages et caractéristiques géométriques et mécaniques des joints sont donnés de façon déterministe.

En nous basant sur les propriétés géométriques de projections stéréographiques, nous pouvons présenter

RESULTANTE DES FORCES :
0.00 0.00 -1.00
PENDAGE ET DIRECTION :
45.0 0.0
45.0 90.0
45.0 180.0
45.0 270.0
FOYER DE PROJECTION :
0.00 0.00 1.00
CODE DU BLOC :
1 1 0 1

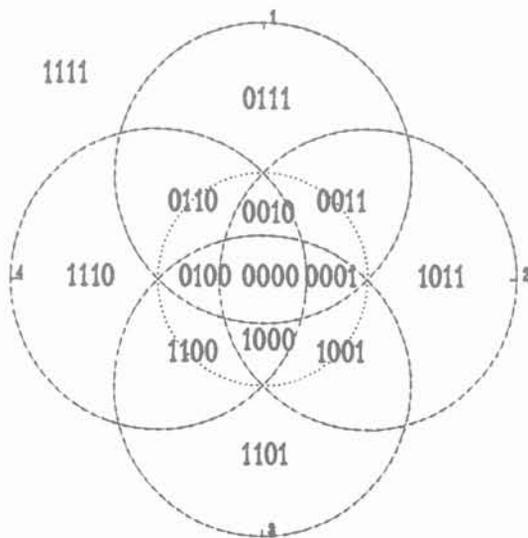


Fig. 6. — Exemple de projection d'intersections de demi-espaces, d'après des programmes originaux de R.E. GOODMAN et al.
Fig. 6. — Example of projection of intersections of half-spaces, from original programmes by R.E. GOODMAN et al.

quelques aspects des résultats que l'on peut obtenir grâce aux programmes développés par l'équipe de R.E. GOODMAN, légèrement modifiés.

On notera que l'on peut associer à tout plan, de pendage α et de direction β donnés, passant par le centre d'une sphère de référence choisie, sa projection sur le plan équatorial de cette sphère, qui est un cercle de caractéristique rappelées sur la figure 5.

On peut remarquer que tout élément situé dans le demi-espace situé au dessus d'un plan P donné se projette à l'intérieur du cercle C qui est la projection de ce plan P, dans le plan équatorial de la sphère de référence. Inversement, tout point situé au-dessous du plan P considéré est projeté à l'extérieur du cercle C. Ainsi en associant un indice particulier à chacun des demi-espaces supérieur et inférieur, relativement à un

plan donné, il est possible de définir pour un ensemble de n plans donnés une chaîne de n caractères, permettant de caractériser une intersection de n demi-espaces. On peut ainsi obtenir une partition du plan équatorial de la sphère de référence, et associer à chacune des régions définies par les intersections de demi-espaces supérieurs et inférieurs relatifs à des plans donnés, une chaîne de caractères donnée. La figure suivante, fig. 6, donne un exemple de cette construction dans le cas de quatre plans.

A partir de cette étape, on peut choisir d'étudier la stabilité d'un bloc particulier, qui est défini par l'intersection de demi-espaces, relatifs à des plans donnés. On peut alors obtenir une représentation de ce bloc (fig. 7), en se fixant ses dimensions, ou obtenir, à titre d'exemple, la visualisation d'un bloc par rapport à une section de tunnel donnée, grâce aux programmes développés par R.E. GOODMAN et al.

SOMMET :
 5.62 2.02
PENDAGE ET DIRECTION :
 45.0 0.0
 45.0 90.0
 45.0 180.0
 45.0 270.0
DIRECTION DU TUNNEL :
 1.00 0.00 0.00
RESULTANTE DES FORCES :
 0.00 0.00 -1.00
INTERVALLE ANGULAIRE :
 359.82 135.00
CODE DU BLOC :
 1 1 0 1

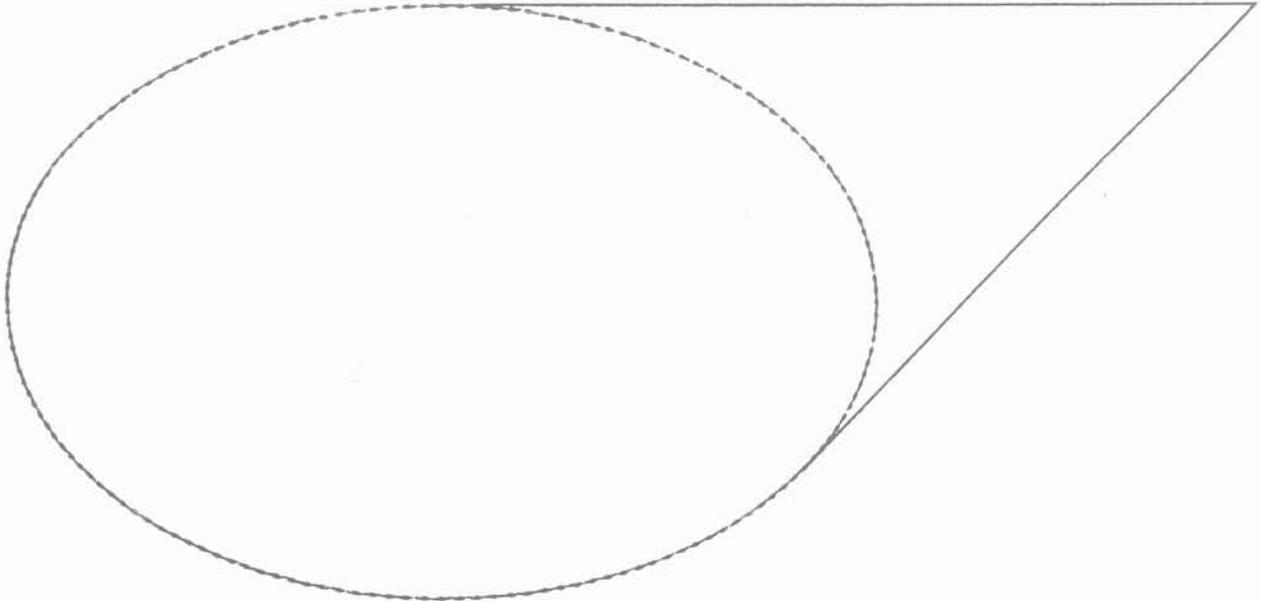


Fig. 7. — Exemple de résultats obtenus, d'après des programmes originaux de R.E. GOODMAN et al.
 Fig. 7. — Example of results, from original programmes by R.E. GOODMAN et al.

Enfin, il est possible, à partir de la connaissance de la résultante des forces agissant sur un bloc donné, de déterminer si, pour un angle de frottement donné le long des faces du bloc, celui-ci est stable ou non, et dans ce dernier cas, connaître la direction du déplacement du bloc (glissement le long d'une des faces, le

long de deux faces, soit encore parallèlement à la droite intersection des deux plans des faces, ou encore décollement du bloc). A titre d'exemple, la figure suivante, (fig. 8) donne pour la résultante des forces indiquée, R, un mode de déplacement du bloc étudié le long de la face numéro 1, tant que l'angle de frottement est inférieur à 55 degrés.

REGIONS D'EQUILIBRE

PENDAGE DIRECTION COTE

| | | |
|------|------|---|
| 35.0 | 55.0 | 1 |
| 45.0 | 65.0 | 1 |
| 55.0 | 75.0 | 1 |
| 65.0 | 85.0 | 1 |

FOYER DE PROJECTION :

0.00 0.00 1.00

INCREMENT SUR L'ANGLE :

15.00

FORCE RESULTANTE :

0.00 0.00 -1.00

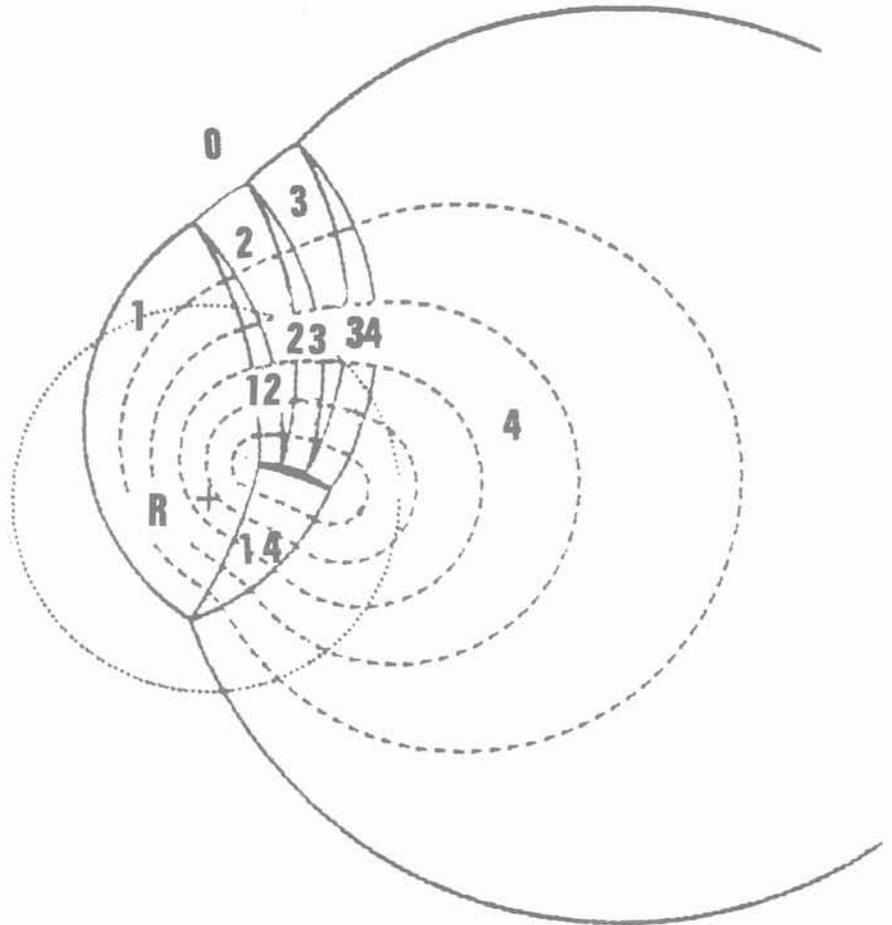


Fig. 8. — Exemples de détermination du mode de déplacement d'un bloc donné. D'après les programmes de R.E. GOODMAN et al.

Fig. 8. — Example of the determination of displacement mode of a given bloc. From original programmes by R. E. GOODMAN et al.

Il est important de noter que les éléments de la théorie des blocs clés présentés ici s'intéressent à la stabilité d'un bloc isolé, et ne rendent pas compte des avantages de la méthode pour déterminer la meilleure orientation possible d'un ouvrage minier, compte tenu de la structure du massif. Cet aspect très important, peut toutefois être pris en compte, en redéfinissant l'orientation globale de l'ouvrage à réaliser, au niveau de la génération du réseau des fractures et des régions ou cavités qui l'intersectent, cavités qui peuvent représenter les travaux miniers à réaliser. Cette recherche d'optimisation est donc effectuée au niveau de la deuxième phase de la démarche concernant la génération du réseau, plus précisément au moment du positionnement des ouvrages à réaliser, et non au niveau de l'utilisation de la théorie des blocs-clés proprement dite. La détermination des différents blocs clés dans chaque cas permet, à partir de règles d'actions, d'orienter le choix du concepteur.

5. CONCLUSION

La chaîne de traitement des données structurales présentée ici doit permettre une prise de décision en meilleure connaissance de cause, tant au niveau de la conception que de l'exécution d'ouvrages au rocher. Par la possibilité qui est offerte d'engendrer simultanément des fractures de façon déterministe ou pseudo-aléatoire, l'ensemble du traitement permettra des applications dans divers cas de figure : stabilité de falaises, de travaux miniers, de talus routiers, conceptions de sites industriels souterrains...

A la différence de certaines approches, le massif rocheux fracturé n'est ici considéré ni comme un assem-

blage de blocs au sens strict, ni comme un milieu continu décomposé en sous-domaines ayant des propriétés égales à celles d'un matériau continu équivalent, mais plutôt comme une masse dans laquelle sont définis des blocs, délimités par des intersections de fractures de dimensions finies. La reconnaissance de tous les blocs finis, déterminés par ces intersections de fractures et de plans liés aux travaux entrepris dans le massif, présente encore des difficultés qui restent à surmonter. La figure 9 présente de façon très schématique l'ensemble du programme complet dont plusieurs parties fonctionnent déjà, mais de façons indépendantes.

Ce programme devrait bénéficier des résultats de travaux actuellement en cours à l'Institut des Matériaux et des Gisements Miniers, de l'Ecole des Mines d'Alès, portant sur la caractérisation et la prise en compte dans des modèles de calcul mécanique, de la rugosité des fractures rocheuses, et notamment de la dilataance. Par ailleurs, il utilise les versions améliorées des programmes de calcul de réseaux de fractures, en étroite collaboration avec le Département d'Ingénierie Géotechnique du Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

REMERCIEMENTS

La recherche dont les premiers résultats sont présentés dans cet article est effectuée dans le cadre du contrat n° MA 1 M — 00 55, entre la Commission des Communautés Européennes, et le B.R.G.M.

Y ont participé, en plus de l'auteur, Mademoiselle S. GENTIER et Messieurs J.P. CHILES et B. FEUGA pour le B.R.G.M., Messieurs S. BASTIDE, B. VAYSSADÉ, et Ph. WEBER pour l'Ecole des Mines d'Alès.

BIBLIOGRAPHIE

1. BILLAUX D. (1986), *Programmes de modélisation de champs de fractures en deux et trois dimensions*, Document BRGM, 1986.
2. BOYLE W.J. (1986), *The influence of initial stress on the movement of blocks around underground openings*, Ph. D. dissertation, Univ. of California, Berkeley.
3. CHILES J.P. (1987), *Three dimensional geometric modeling of a fracture network*, DOE/AECL'87 Conference « Geostatistical sensitivity and uncertainty methods for ground-water flow and radionuclide transport modeling », SAN FRANCISCO Sept 15/17 1987.
4. CUNDALL P. (1980), UDEC, *A generalised distinct element program for modeling jointed rock*, Final technical report, U.S. ARMY, Contract N°. DAJA 37-79-C-0548, 1980.
5. CUNDALL P., HART R.D. (1985), *Development of generalized 2-D and 3-D distinct element programs for modeling jointed rock*, Final report, U.S. Army Corps of Engineers, Contract N°. DACA 39-82-C-0015.

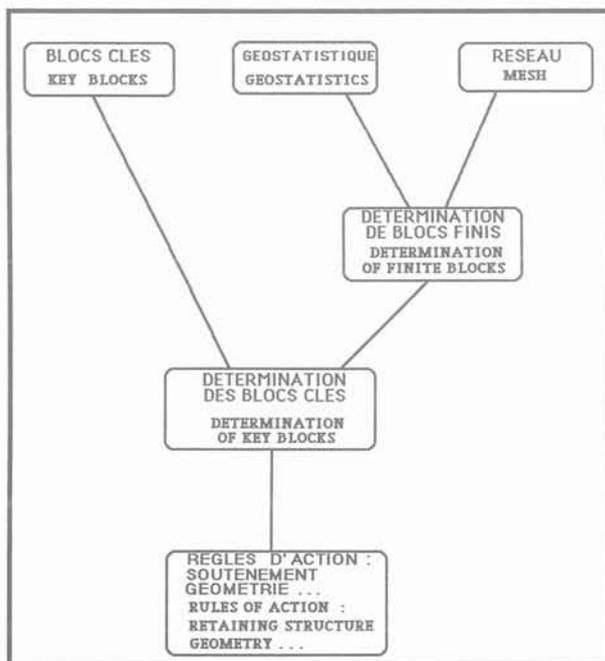


Fig. 9. — Schéma général du programme mis en place.
Fig. 9. — General scope of the programme

6. FINE J., KORINI T. (1987), *Une méthode d'analyse des risques de chutes de bloc dans les galeries creusées en terrains fissurés*, 6th Int. Cong. of ISRM, Montreal.
7. GILMOUR H.M. Peggy, BILLAUX D., S. LONG J.C. (1986), *Models of calculation fluid flow in randomly generated three-dimensional networks of disc — shaped fractures*, Rapport Lawrence Berkeley Laboratory LBL, 19515, Sept. 1986.
8. GOODMAN R.E., SHI G.H. (1985), *Block theory and its application to rock engineering*, Edt. Prentice-Hall, Inc. 338 pages.
9. HELIOT D., (1987), *Generating a three dimensional jointed rock mass*, Document interne CERCHAR.
10. LEMOS J., HART R., LORIG L.J. (1987), *Dynamic analysis of discontinua using the distinct element method*, 6th Int. Cong. of ISRM, Montreal.
11. LIN D., FAIRHURST C., STARFIELD A.M. (1987), *Geometrical identification of three-dimensional rock systems using topological techniques*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24 N° 6, pp. 331-338.
12. LORIG L.J., BRADY B.G.H., CUNDALL P.A. (1986), *Hybrid distinct element — boundary element analysis of jointed rock*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 23 N° 4, pp. 303-312.
13. MASSOUD H., CHILES J.P. (1986), *La modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique*, Rapport BRGM/Ecole des Mines d'Alès, Mai 1986.
14. MASSOUD H. (1987), *Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique*, thèse de Docteur-Ingénieur, Ecole des Mines de Paris, 1987.
15. VINCHES M. (1987), *Approche des problèmes de stabilité des massifs rocheux fracturés*, Rapport IRBAT, Juillet 1987.
16. VINCHES M., GERVAIS F., HETUIN E. (1988), *Etude statistique et géostatistique de la fracturation de la mine des Bondons (France)*, à paraître, Document BRGM.
17. WARBURTON P.M. (1985), *A computer program for reconstructing blocky rock geometry and analysing simple block stability*, Computers and geosciences, Vol. 11 N° 6, pp. 707-712.
18. WARBURTON P.M. (1987), *Implications of keystone action for rock bolt support and block theory*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, N° 5, pp. 283-290.
19. YOW Jr. J.L. (1985), *Field investigation of keyblock stability*, Ph. D. dissertation, Univ. of California, Berkeley.
20. YOW Jr J.L., GOODMAN R.E. (1987), *A ground reaction curve based upon block theory*, Rock Mech. and Rock Eng. 20, pp. 167-190.
21. YOW Jr J.L. (1987), *Blind zones in the acquisition of discontinuity orientation data*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24, N° 5, pp. 317-318.

GROUND ENGINEERING

Contents Vol. 22, N° 3, April 1988

- 5 For the Record/Ground engineering plant and equipment
- 6 Ground engineering plan and equipment
- 7 Lime Stabilisation'88. A report on the BACMI Symposium held in London earlier this year by C.D.F. Rogers
- 10 Geodiary
- 12 Analysis of piled embankments, by W.J. Hewlett and P.M.F. Randolph
- 19 Diaphragm walling for Sizewell B sets records
- 27 Ground Engineering Practice

Contents Vol. 22, N° 4, May 1988

- 5 BGS News
- 6 For the Record
- 8 Pressuremeter and cone penetration testing. A report on the BGS meeting, by J.M.W. Holden and L.S. Pang
- 12 Investigations for rig sites in the Gulf of Cambay
- 15 Geotechnical Book Review
- 16 Geodiary
- 18 The design and construction of a new rotary machine for rock joints, by Shulin Xu, E.A. Rogers and M.H. de Freitas
- 21 Earthworks control — assessment of suitability, by H.G. Baird
- 28 Hazard protection on St. Helens thrust-bore

Published eight times a year by GEO Publications Ltd. - PO Box 370, Brentwood, Essex - CM 14 4AQ, England (Telephone : 0277-73456).

Price : £ 3.50 per copy post free (UK) - £ 22 per year, UK - £ 27 overseas (surface mail postage paid).

© 1988 - ISSN 0017-4653

ACHEVÉ D'IMPRIMER
SUR LES PRESSES DE
L'IMPRIMERIE CHIRAT
42540 ST-JUST-LA-PENDUE
EN SEPTEMBRE 1988
DÉPÔT LÉGAL 1988 N° 3957

IMPRIMÉ EN FRANCE