

## Caractérisation hydraulique d'un massif calcaire fissuré de Franche-Comté (France)

Hydraulic characterization of a fissured calcareous formation in Franche-Comté (France)

N. RAMPNOUX<sup>1</sup>, P. BROQUET<sup>1</sup>, J. MANIA<sup>1</sup>

Reçu le 8 novembre 1991, accepté pour publication le 24 avril 1992.

### SUMMARY

An experimental site in fissured calcareous media has been analysed in the upper jurassic of the Loue valley. A core of some 30 metres has been drilled and analysed by different laboratory techniques (porosity, permeability, ultrasonic speed, quantification of the fissuration) and in the field (hydraulic injection tests between shutters, sonic and density diagraphics data). The rock volumes have been explored at the surface by the refraction seismic method.

In the core the fissures are distributed according to four families :

- subvertical stylolitic fractures, the horizontal peaks of which denote the maximum compressive direction of the original tectonic stresses,
- mineralized crevices with calcitic filling, closed fissures,
- opened fractures which induced the hydraulical quality of limestones.

The total porosity of the limestones is characterized by homogeneous values (from 2 to 6 %) and three different families of porosity  $\sigma$  and the average diameter  $d_m$  (0.003 to 0.27  $\mu\text{m}$ ) of the accessible apertures in the matrix :

- family 1 : 0.003  $\mu\text{m} < d_m < 0.018 \mu\text{m}$ , 1.05 %  $< \sigma < 2.14$  % in relation with intergranular spacing in the cementic phase. The clay in the basal part of the core induces a great reduction of this kind of porosity,
- family 2 : 0.044  $\mu\text{m} < d_m < 0.11 \mu\text{m}$ , 0.49 %  $< \sigma < 4.39$  % in liaison with intergranular spacing between the carbonatic figurative elements (bioclasts, lithoclasts, oolithes and microorganisms),
- family 3 : 0.14  $\mu\text{m} < d_m < 0.27 \mu\text{m}$ , 0.28 %  $< \sigma < 3.13$  % in relation with the increasing of the sizes of the figurative elements.

A good agreement between permeability  $k$  and porosity  $\sigma$  is observed ( $k = 3.4 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^{4.96}$  in darcy units).

1. Université de Franche-Comté, Laboratoire de Géologie Structurale et Appliquée, Place Leclerc, 25000 Besançon, France.

\* Les commentaires seront reçus jusqu'au 14 août 1993.

Three diagraphic investigations has been carried out with gamma-gamma measurements (bulk density), with gamma-ray measurements (clay content) and with acoustic compensated measurements (sonic waves speed). The bulk density log is uniform (2.5 to 2.7 g/cm<sup>3</sup>), the gamma-ray log is increasing down the hole (21 to 29 m) whereas the clay content rises.

The acoustic log records the total wave signal that can be traduced by two computed logs :

- speed propagation of the S waves (Vs speed) and P waves (Vp speed) with the ratio Vp/Vs,
- Poisson coefficients and Young modulus.

The principal results suggest the existence of a liaison between hydraulic parameters and the fissuration of the calcareous formation where three levels of fracturation are observed (from 11 to 12 m, from 16 to 18 m and from 19 to 20 m).

The permeability values of the limestone matrix cores are relatively homogeneous (1 to 19 10<sup>-5</sup> darcy) with a decrease in the 23 to 27 m section of the bore-hole where a clayed cement is detected. The hydraulic conductivity of the fractured zone, as determined by means of hydraulic injection tests between shutters leads to values of 1.10<sup>-6</sup> to 8.10<sup>-6</sup> m/s (# 0.1 to 0.8 darcy). Five zones have been chosen for the hydraulic tests in liaison with different parts of the bore hole. The high values of permeability k are in accordance with the high lc index values of the open fractured zones.

A first local calibration function is proposed :

$$lc = 7.13 \text{ Log } k + 51$$

A poor relation connects the laboratory and field results because the elementary volume is increasing from cubic centimeters to some cubic meters. The homogeneity and the isotropy of matrix is disturbed by the fissures (shut or open).

The matrix medium is continuous on the laboratory scale and discontinuous in the field. The ultra-sonic investigation confirms the liaison between the high values of the sonic P waves speed and the principal regional direction of tectonical stress. The total acoustic recording yields the knowledge of the S and P waves speeds of in correlation with subvertical fractures when the speed value variations are numerous.

Three fracture zones are distinguished between 11 to 12 m, 17 to 18 m and 19 to 20 m. The lc index obtained from the sonic log must be used cautiously after correction in the true clayed zones. In these zones the values of the lc index are above 10 without water flowing in the bore hole after hydraulic testing. We propose the use of a corrective chart C (lc) to correct for the clay effect and a new corrected index lc - C (lc) is more reliable.

An adjusted statistical graphical chart is proposed with the following expression :  $C (lc) = \beta \cdot X^\alpha$  with  $\alpha = 1.84$  and  $\beta = 0.088$  (valid only for limestones) and X : the clay index obtained from the gamma-ray measurements. The lc index values histogram localizes the permeable zones of limestones with hydraulically active open fractures.

Measurement of the speed variation of P seismic waves on the bottom of the quarry by the means of the refraction method leads to a good agreement between the maximum speed anisotropy direction and the major fracture direction (N 120°-N 140°) which is perpendicular to the minimum anisotropy seismic speed direction (N 40° -N 50°). The open fractures direction measured on the core is adjoining about N 135°-N 145° when the direction of maximum anisotropy in the quarry is near N 140°.

**Key-words :** limestone, fissure, refraction seismic, gamma-ray, sonic, permeability, porosity, lc index.

## RÉSUMÉ

Un site expérimental représentatif du milieu calcaire fissuré a été étudié dans le Jurassique supérieur de la vallée de la Loue. Un forage carotté de trente mètres a été réalisé et étudié par différentes techniques de laboratoire (porosité, perméabilité, vitesse ultrasonique, quantification de la fissuration) et de terrain (essais hydrauliques par injection entre obturateurs, diagraphies soniques, densité). Le massif rocheux concerné a été exploré en surface à partir de la sismique réfraction.

Les principaux résultats obtenus permettent de relier les paramètres hydrauliques à la fissuration du massif calcaire. On constate une mauvaise relation entre les mesures de laboratoire et de terrain par suite d'un effet d'échelle, les investigations étant faites sur des volumes variant de quelques centimètres cubes à plusieurs mètres cubes. En effet, la matrice homogène et isotrope est perturbée par des fissures (fermées ou ouvertes). Le milieu continu représenté par la matrice et observé au laboratoire s'avère discontinu sur le terrain. L'indice  $lc$  obtenu à partir de la diagraphie sonique paraît intéressant, mais doit être utilisé avec prudence et après correction dans les zones à argilosité reconnue, en effet dans ces zones on constate que pour des valeurs supérieures à 10 de l'indice  $lc$  brut, aucun écoulement n'a été mis en évidence par essai hydraulique. Un abaque de correction  $C$  ( $lc$ ) a donc été établi qui tient compte de la teneur en argile et qui permet de proposer un indice corrigé  $lc - C$  ( $lc$ ) plus fiable.

**Mots clés :** calcaire, fissure, sismique réfraction, gamma-ray, sonique indice  $lc$ , perméabilité, porosité.

## 1 – INTRODUCTION

Les massifs de roches compactes présentent en profondeur un réseau de fissures d'ouverture variable qui rend difficile la mesure de la perméabilité. C'est le cas pour les massifs granitiques de Suède (ABELIN *et al.*, 1991), de Suisse (LIEDTKE *et al.*, 1984) et de France (CABRERA *et al.*, 1990). Les réservoirs calcaires sont peu étudiés par les méthodes physiques directes ou indirectes dans le domaine de l'hydrogéologie, en particulier lorsque l'on veut relier les informations géologiques des affleurements avec celles obtenues sur forage et comparer plusieurs techniques d'auscultation.

Le site expérimental de Samson est situé à 30 km au sud de Besançon (Doubs), le long de la vallée de la Loue, dans une carrière en exploitation. Il est implanté au sein de la chaîne du Jura dans le faisceau de Quingey qui prolonge le faisceau bisontin. La zone d'étude est située dans une structure légèrement synclinale au cœur des plis d'orientation méridienne du faisceau de Quingey.

Les séries appartiennent au Jurassique supérieur (formations calcaires généralement bioclastiques ou légèrement argileuses de l'Oxfordien à faciès séquanien et argovo-rauracien) (fig. 1).

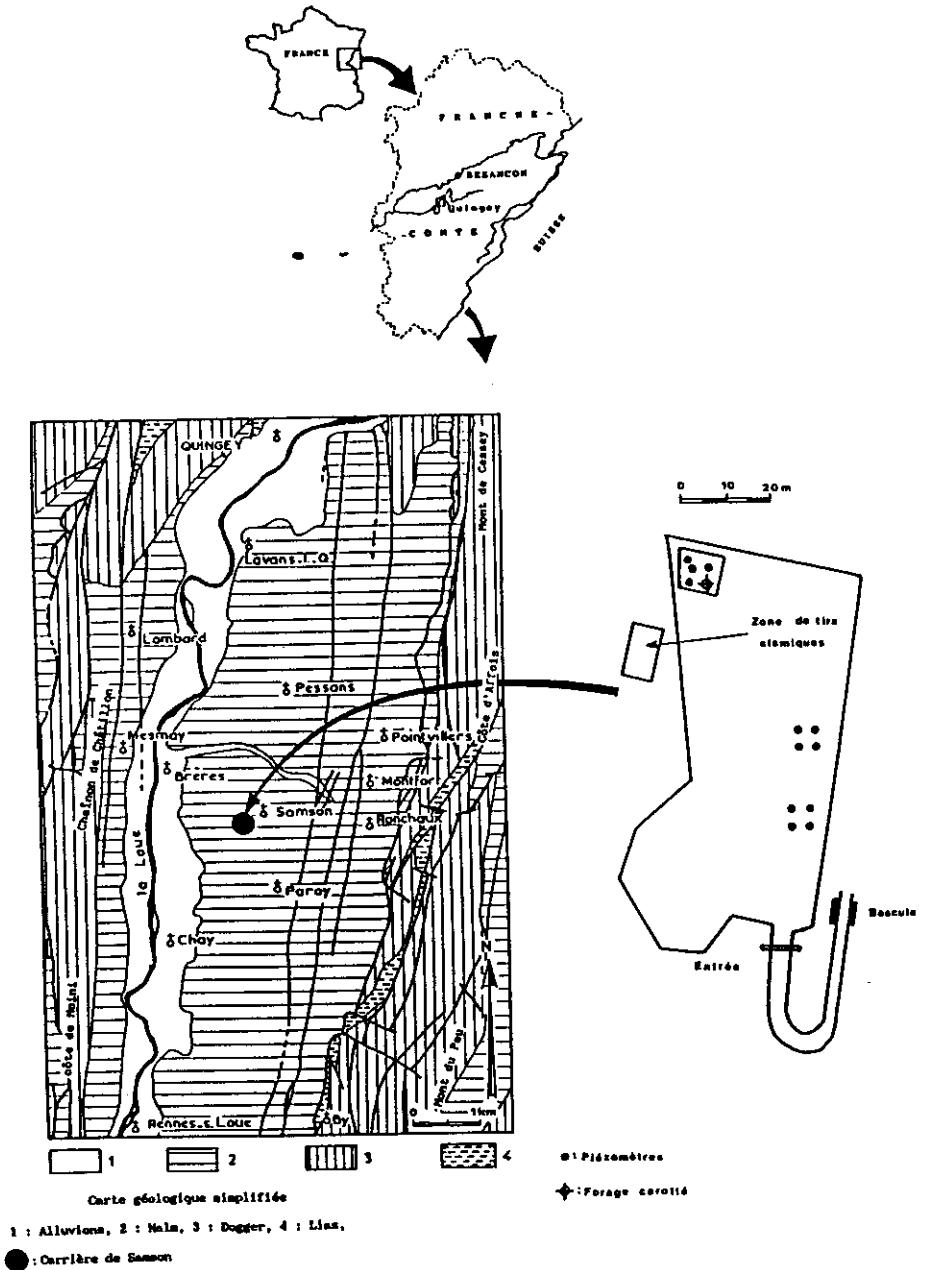


Figure 1 Cartes de localisation des travaux avec position des piézomètres, du forage carotté et de la zone de tir sismique.

Maps of the studied site with the piezometer positions, the core-drill and the seismic zone situations.

La carrière Cuenot à Samson a été choisie comme site expérimental pour sa proximité avec la nappe alluviale de la Loue qui entraîne une alimentation permanente des calcaires sous-jacents et pour les affleurements constitués par les fronts de taille et le carreau de la carrière permettant l'étude de la fracturation et la réalisation de profils en sismique réfraction.

Pour guider l'implantation du forage carotté, une première campagne de sondages « destructifs » (wagon-drill) a été réalisée afin de mettre en place un réseau de cinq piezomètres d'une vingtaine de mètres de profondeur. Seuls quelques piezomètres se sont avérés productifs.

Un forage carotté d'une trentaine de mètres a été réalisé afin d'avoir une coupe en continu du sous-sol, d'établir un relevé précis de la fracturation sur les carottes et d'avoir des échantillons pour les différentes mesures en laboratoire. Sur ce forage ont été réalisées des mesures diagraphiques.

## 2 – RELEVÉ DE LA FRACTURATION SUR LES CAROTTES

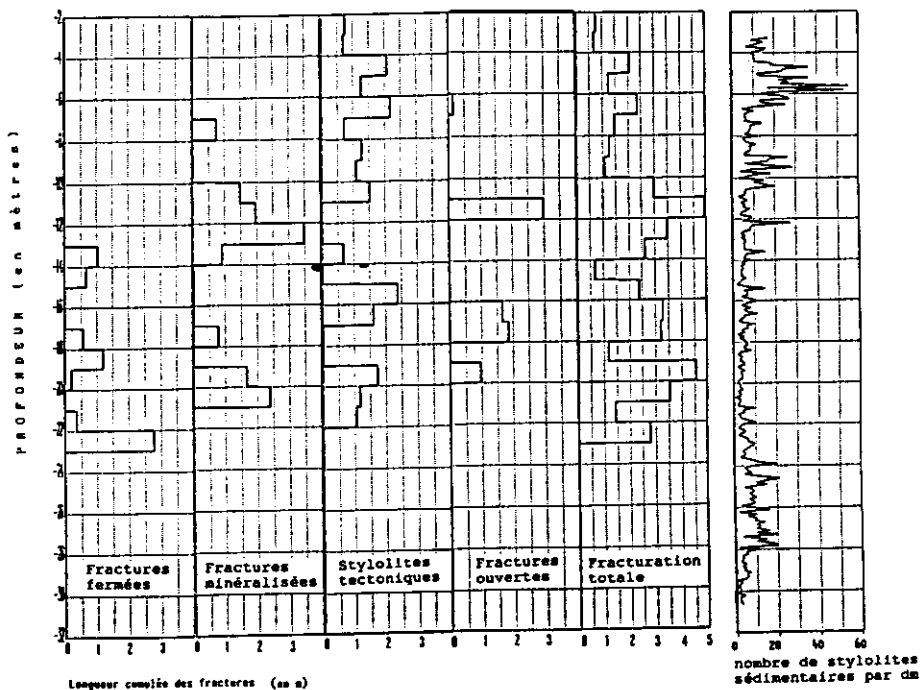
Le relevé de la fracturation sur le sondage de 30 mètres, à travers les calcaires de l'Argovo-Rauracien a permis de distinguer (*fig. 2*) quatre types de fractures :

- des fractures subverticales stylolitiques dont les stylolites tectoniques présentent des pics subhorizontaux indiquant les directions des compressions maximales qui existaient lors de leur genèse ;
- des fentes minéralisées à remplissage de calcite cristallisée ;
- des fractures fermées ;
- des fractures ouvertes.

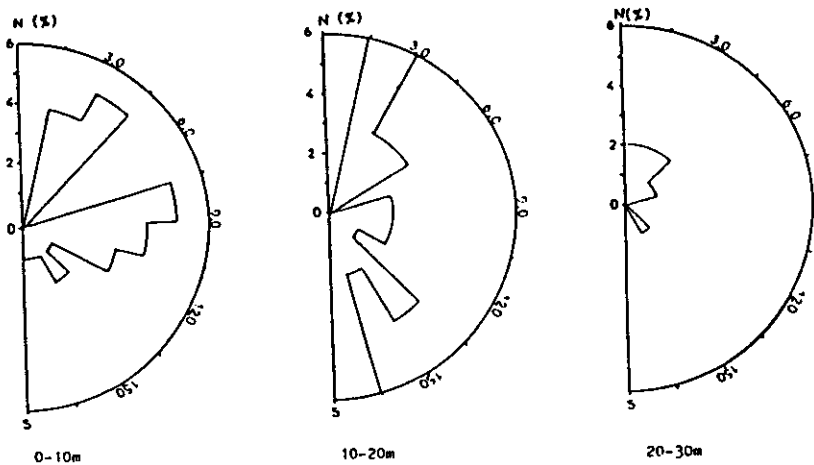
Seules les fractures ouvertes jouent un rôle hydraulique. La répartition des pendages (*fig. 3c*) indique que les fractures sont majoritairement subverticales (de 70 à 90 degrés). Il faut ajouter que dans les plans de stratification on peut également observer des stylolites sédimentaires (*fig. 2*).

Les directions rencontrées (jusqu'à 5 familles) en profondeur sont variables et permettent de penser qu'il y a soit une rotation du système fissural avec l'existence de surfaces de fissuration courbes ou sinusoïdales soit l'apparition d'autres générations de fractures (*fig. 3a, 3b*).

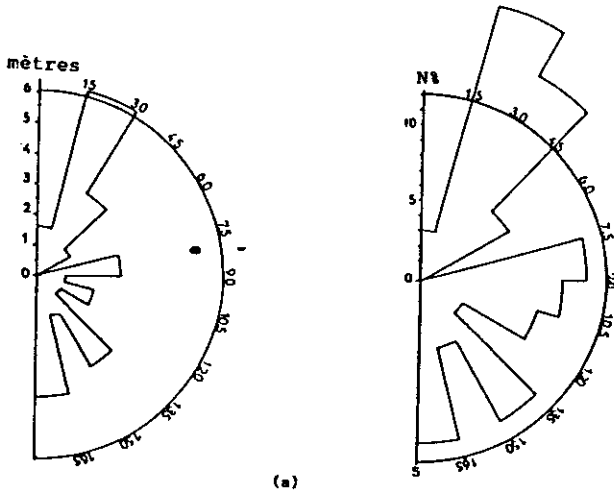
La fracturation ouverte (*fig. 2*) peut être scindée en trois niveaux hydrauliquement différents : de 11 à 12 m, de 16 à 18 m et de 19 à 20 m.



**Figure 2** Répartition des différents types de fractures et des stylolites tectoniques et sédimentaires relevés sur les carottes du forage de Samson.  
*Drill core logs for different fracture types and for different sedimentary or tectonic stylolites recovered from the Samson bore hole.*



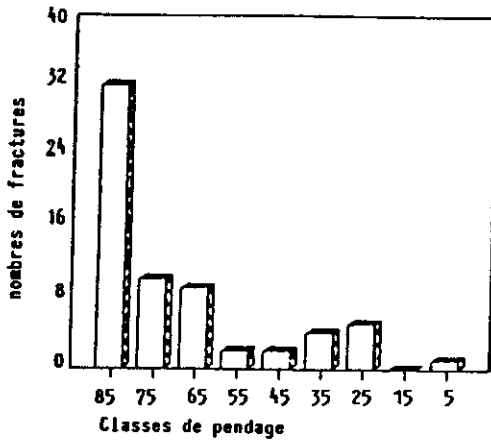
**Figure 3a** Rosaces de la fracturation par tranche de profondeur (fréquence).  
*Fracturation rosette by deep section (frequency).*



(a)

**Figure 3b** Rosaces de la fracturation totale  
 – en longueur cumulées (en mètres)  
 – en fréquence (%).

*Total fracturation rosette*  
 – cumulative lengths (in meters)  
 – frequency (%).



**Figure 3c** Histogramme des pendages des fractures.  
*Histogram of the fracture dips.*

### 3 - MESURES AU LABORATOIRE

Les différentes mesures ont été réalisées sur des échantillons prélevés sur les carottes de sondage, sous formes de cylindres de 40 mm de diamètre et de 40 mm de hauteur. Seules les mesures de porosimétrie au mercure ont demandé un échantillonnage de plus petite taille (10 mm de diamètre sur 25 mm de hauteur).

Cette série d'échantillons a été deshydratée en étuve puis saturée en eau (dégazée) sous-vide (la saturation est réalisée pour les mesures de porosité à l'eau et les mesures de vitesse ultra-sonique).

#### 3.1 Mesures de porosité

La mesure de la porosité totale à l'eau a fourni des valeurs homogènes comprises entre 2 et 6 % (fig. 4a) avec une zone de plus faible porosité dans les calcaires argileux (23 à 27 m).

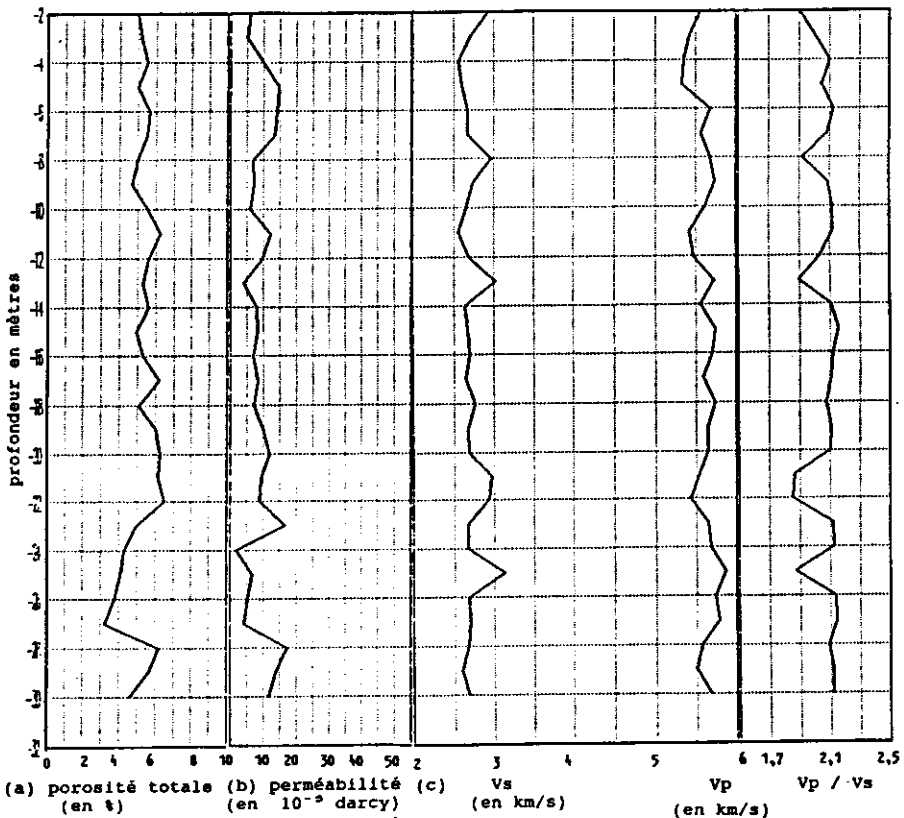


Figure 4 Répartition des mesures de laboratoire sur carottes.

*Laboratory fracture measurements on cores.*



La mesure de la porosité totale  $\phi$  au mercure (DULLIEN *et al.*, 1974, JENKINS *et al.*, 1984) par l'intermédiaire du porosimètre Coultronics 9310 nous a permis d'étudier la répartition spatiale de la porosité dans la roche. La mesure a été associée à un contrôle visuel sur lames minces injectées de résine colorée pour estimer sa configuration géométrique (FAUDOT, 1980). Nous avons distingué jusqu'à trois familles de pores, chaque famille étant définie par la taille de son diamètre moyen d'accès  $d_m$  [diamètre théorique calculé par la formule de Washburn (in RAMPNOUX, 1991)] et par sa porosité :

- famille 1 :  $0,003 \mu\text{m} < d_m < 0,018 \mu\text{m}$   
 $1,05 \% < \phi < 2,14 \%$

Elle correspond aux espaces intergranulaires au sein de la phase de liaison (ciment micritique ou même microsparitique). Cette phase de liaison très fine et à répartition très homogène induit des tailles de pores théoriques de petites dimensions et une valeur de porosité assez constante. Dans la partie inférieure du forage (de 23 à 30 m), la présence d'argile induit une forte diminution de la valeur de la porosité de cette famille.

- famille 2 :  $0,044 \mu\text{m} < d_m < 0,11 \mu\text{m}$   
 $0,49 \% < \phi < 4,39 \%$

Elle correspond, d'une part, aux espaces intergranulaires entre la phase de liaison et les éléments figurés (bioclastes, lithoclastes...) et d'autre part, aux espaces intragranulaires des éléments figurés carbonatés (couches externes des oolithes, loges des micro-organismes).

- famille 3 :  $0,14 \mu\text{m} < d_m < 0,27 \mu\text{m}$   
 $0,28 \% < \phi < 3,13 \%$

Elle n'est présente que dans la partie inférieure du forage (de 23 à 30 m). Elle correspond aux mêmes types de pore décrits pour la famille précédente. Mais l'augmentation de la taille des éléments figurés dans la roche provoque l'augmentation du diamètre théorique d'accès des pores, associée à la diminution de la phase de liaison qui dans la partie basse du forage, s'enrichit en argile.

### 3.2 Mesure de la perméabilité

Les mesures de la perméabilité à l'air ont été réalisées à l'aide d'un perméamètre de type Institut Français du Pétrole à charge variable (MONICARD, 1981). Elles ont conduit à l'établissement d'un log (*fig. 4b*) dont les valeurs sont relativement homogènes allant de 1 à  $19 \cdot 10^{-5}$  darcy avec une diminution entre 23 et 27 m de profondeur liée à la présence d'un ciment argileux.

La perméabilité intrinsèque ( $k$ ) mesurée a été reportée en fonction de la porosité totale ( $\phi$ ) sur la figure 5. Il apparaît une relation de corrélation de type puissance  $k = \beta \cdot \phi^x$  (ce type de résultat est couramment vérifié dans la littérature). La dispersion, peu marquée, des points le long de cette droite de corrélation semble montrer qu'à l'échelle des éprouvettes les écoulements s'effectuent par l'intermédiaire du réseau poreux connecté (DAW *et al.*, 1983, DUCOMTE, 1985).

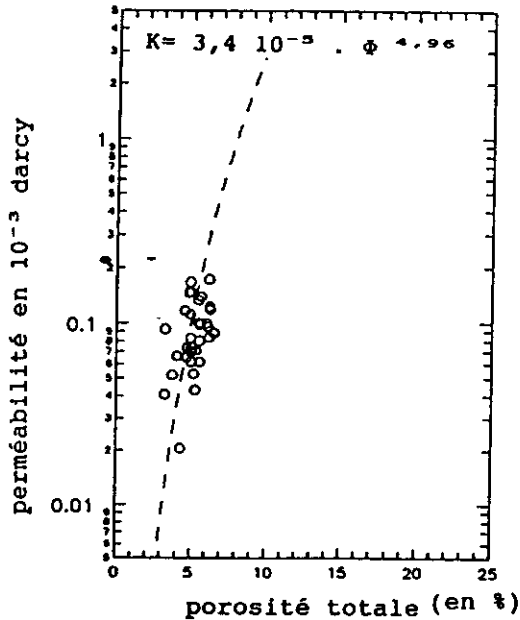


Figure 5 Relation entre la porosité et la perméabilité (mesures sur carottes).  
*Relation between porosity and permeability (cores measurements).*

### 3.3 Mesure des vitesses des ondes ultrasoniques

Sur les échantillons saturés en eau, nous avons réalisé deux séries de mesure de célérité des ondes à l'aide de transducteurs longitudinaux (pour les ondes P) et transversaux (pour les ondes S) d'une fréquence de 500 kHz (BOURBIE *et al.*, 1986, GEYER *et al.*, 1970). On ne distingue pas (*fig. 4c*) de corrélation entre  $V_p$  et  $V_s$  d'une part, et la courbe des porosités d'autre part, par manque de discrimination et de sensibilité dans la gamme de porosité utilisée ( $\phi < 6\%$ ).

### 3.4 Mesures d'anisotropie ultrasonique P sur les carottes

Il s'agit d'une méthode simple pour mesurer la direction des contraintes basée sur l'auscultation acoustique en onde P. La mesure de l'anisotropie horizontale (2D) des vitesses des ondes P est réalisée à l'aide d'un dispositif expérimental composé, d'une paire de transducteurs (de fréquence centrale égale à 500 kHz) que l'on déplace autour de l'échantillon étudié (carottes de 78 mm de diamètre et de 80 mm de hauteur). L'ensemble du dispositif est immergé dans une cuve remplie d'eau.

Ce type de dispositif permet de mettre en évidence la très faible anisotropie au sein de la roche (RAMPNOUX, 1991). Cependant une bonne corrélation est mise en évidence entre les directions d'anisotropie maximum dont la moyenne se situe à N35 c'est-à-dire perpendiculairement à l'une des trois directions de

raccourcissement relevées sur le terrain par SOPENA *et al.* (1973) dans le secteur étudié et qui se trouvent à N35, N125 et N170. Aucune hétérogénéité texturale originelle (bioclastes, lithoclastes...) ne semble s'ajouter à l'anisotropie de « contrainte », des valeurs comparables étant obtenues dans les calcaires bioclastiques et les calcaires argileux.

#### 4 – DIAGRAPHIES DIFFÉRÉES

Une campagne de mesures diagraphiques a été réalisée sur le forage carotté et sur quelques sondages (réalisés en destructif), par la société EPTS-Diasol.

Trois types de diagraphies ont été adoptées :

- la diagraphie gamma-gamma (sonde F.D.S.) pour la mesure de la densité,
- la diagraphie gamma-ray (sonde F.D.S.) pour l'évaluation de l'argilosité,
- la diagraphie de type acoustique (sonde Sonique-Compensée) à enregistrement automatique du train d'ondes total. Ces enregistrements procurent une représentation des signaux enregistrés et permettent une étude des arrivées des ondes longitudinales ( $V_p$ ) et des ondes de cisaillement ( $V_s$ ). Cette sonde est équipée d'un émetteur (fréquence centrale de 13 à 15 kHz) et de deux récepteurs à des distances respectives de 0,6 et 1 mètre (BOURBIE *et al.*, 1986, SERRA, 1985). Les résultats sont reportés sur les figures 6 et 7, où ils sont confrontés au log structural avec l'indication des zones à fractures ouvertes et donc hydrauliquement actives (cf. mesures de terrain).

Le log des densités indique une grande régularité (2,5 à 2,7 g/cm<sup>3</sup>) sauf au droit de la zone la plus intensément fracturée.

Le log du gamma-ray montre un accroissement en profondeur (de 21 à 29 m) qui correspond à l'existence de niveaux détritiques carbonatés riches en bioclastes et à ciment argileux. Cette zone est bien individualisée par ailleurs au niveau des logs de porosité et de perméabilité mesurées au laboratoire (*fig. 4a et 4b*).

Le carottage acoustique enregistre la totalité du train d'onde qui permet de restituer :

- un log de vitesse de propagation des ondes S et des ondes P, ainsi que l'évolution du rapport  $V_p/V_s$  (*fig. 6a et 6b*),
- des logs des coefficients de Poisson ( $\sigma$ ) et du module de Young ( $\epsilon$ ) calculés (*fig. 6c et 6d*) par les relations classiques (GEYER *et al.*, 1970) :

$$\sigma = 0,5 (V_p/V_s)^2 - 1/(V_p/V_s)^2 - 1$$

$$\epsilon = 2p Vs^2 (\sigma + 1)$$

avec p : masse volumique.

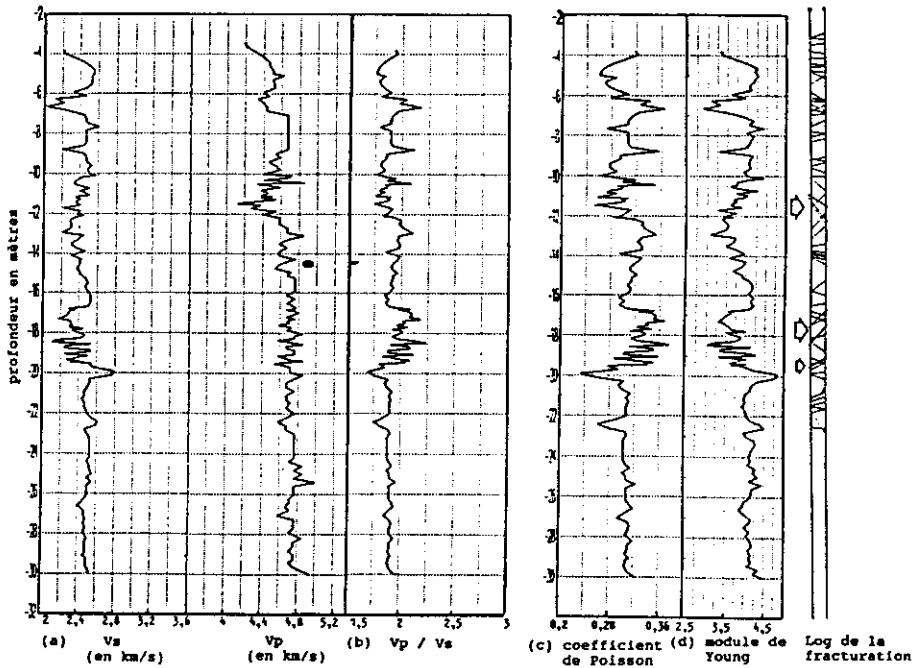


Figure 6 Résultats des analyses de vitesse de propagation sonique sur le forage de Samson.

*Sonic propagation speeds measurements in the Samson bore hole.*

On distingue nettement (fig. 6a, 6b et 6c) :

- la partie supérieure du forage (2 à 20 m) où les fortes variations des vitesses des ondes P et S peuvent être corrélées à la présence des nombreuses fractures subverticales observées sur les carottes du forage,
  - une première zone de fracturation (11 à 12 m) qui est bien caractérisée par une chute de la vitesse des ondes P (de 4,1 à 4,7 km/s),
  - deux autres zones fracturées (17 à 18 m et 19 à 20 m) caractérisées par un écart plus faible des valeurs de la vitesse des ondes P (de 4,45 à 4,82 km/s). La vitesse des ondes S est, par contre, beaucoup plus affectée et décroît fortement au droit de ces deux zones (de 2,1 à 2,8 km/s),
- la partie inférieure du forage (20 à 30 m), se composant essentiellement d'une matrice saine non fracturée, montre des vitesses quasi-uniformes avec les valeurs suivantes,  $V_s = 2,5 \pm 0,1$  km/s,  $V_p = 4,7 \pm 0,3$  km/s et un rapport  $V_p/V_s = 1,9 \pm 0,06$ . Quand  $V_p/V_s$  est constant, sa valeur relative est caractéristique de la lithologie. La faible profondeur des formations calcaires testées explique la forte valeur du rapport (= 1,9) des vitesses pour les calcaires non fissurés.

La diaggraphie sonique fournit aussi l'indice  $I_c$ , calculé de manière automatique à partir de la formule établie par LEBRETON *et al.* (1978). Il est défini par le rapport des amplitudes des premières arches du signal temporel

de l'onde P,  $|A2| + |A3| / |A1|$  avec A l'amplitude de l'arche du signal reçu (le calcul se fait par le rapport des pentes). Cet indice dépend de l'atténuation du signal et donc de la perméabilité du milieu (LEBRETON *et al.*, 1978 ; DUCOMTE, 1985 ; CONCHE, 1985, CONCHE *et al.*, 1986). Le log de l'indice  $I_c$  ainsi défini montre (fig. 7) plusieurs zones à fortes valeurs ( $I_c > 10$ ), certaines n'étant pas au droit des intervalles fissurés caractérisés précédemment.

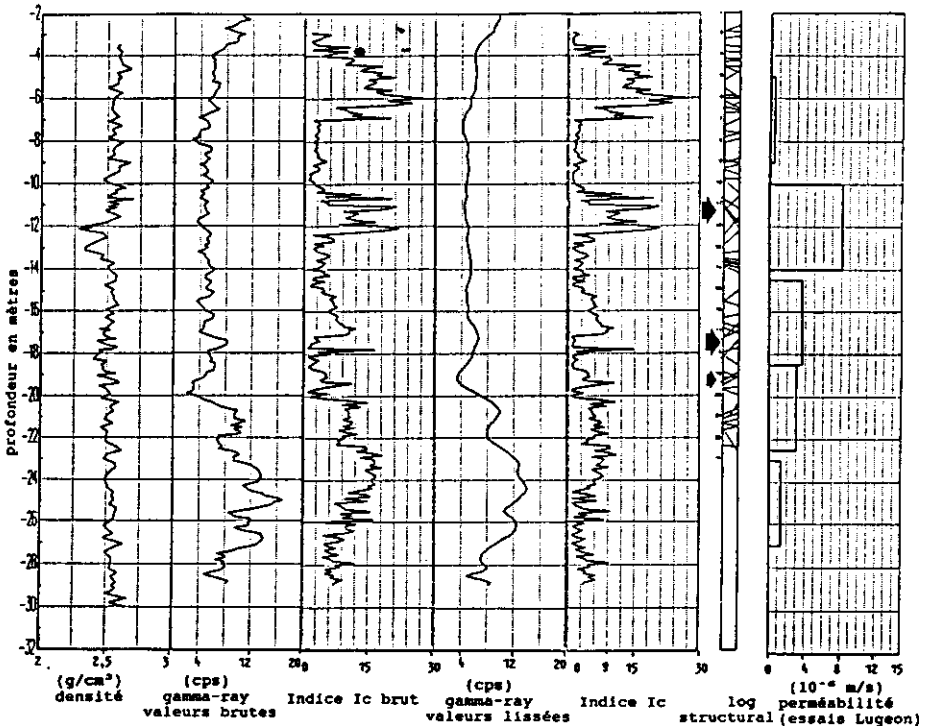
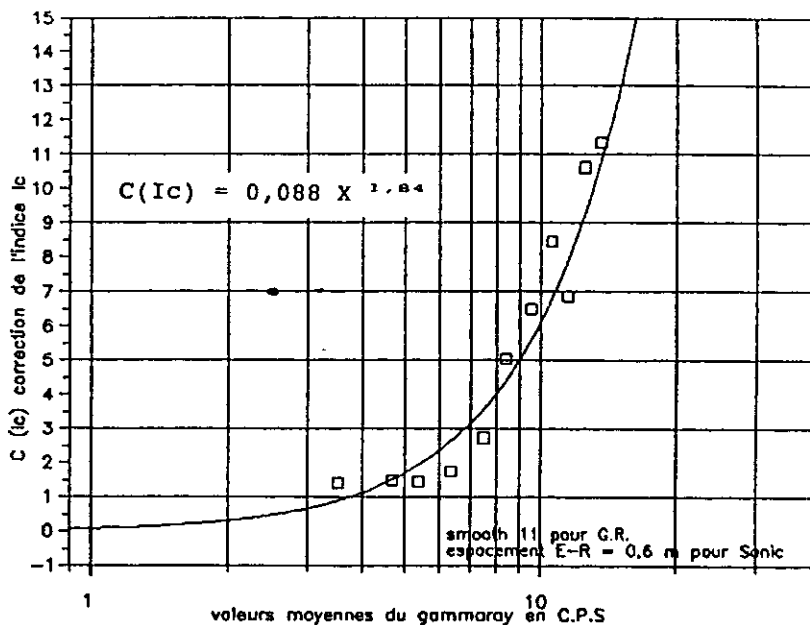


Figure 7 Profils diagraphiques du forage de Samson.  
Diagraphic profiles in the Samson bore hole.

Dans une première étape, une correction de l'indice  $I_c$  en fonction de l'argilosité a été entreprise. En effet, la zone comprise entre 21 et 30 m dont l'indice  $I_c$  est supérieur à 10, présente une augmentation de l'argilosité marquée par la baisse de la perméabilité matricielle et où aucune fracture n'a été relevée sur les carottes. Un abaque de correction ajusté statistiquement a été utilisé à cet effet, il est de la forme (fig. 8) :

$$C(I_c) = \beta \cdot X^\alpha$$

avec  $\alpha = 1,84$  et  $\beta = 0,088$  (valable pour les seules formations calcaires étudiées), et X : l'argilosité définie à partir du gamma-ray.  $I_c$  corrigé est alors égal à la différence entre  $I_c$  et  $C(I_c)$ .



**Figure 8** Abaque de correction  $C(Ic)$  de l'indice  $Ic$  brut en fonction de l'argile (exprimée en coups par secondes : C.P.S).

*Graphical chart correction  $C(Ic)$  of the bulk  $Ic$  index as a function of clay content (CPS units).*

Cet indice  $Ic$  corrigé montre alors une meilleure individualisation des zones fracturées. Cependant l'importance de  $Ic$  dans la partie supérieure (3 à 7 m), n'est pas dû à l'argilosité ( $Ic = Ic$  corrigé). Il semble correspondre à la présence de nombreux stylolites sédimentaires dans la zone de fluctuation de la nappe. La variation du niveau piézométrique a pour conséquence l'existence d'une zone partiellement saturée (porosités matricielle et stylolitique) se comportant comme un système triphasique (matrice-air-eau) qui atténue fortement les signaux acoustiques (BOURBIE *et al.*, 1986). Ces fortes valeurs d'indice ne correspondent donc pas à une zone à forte perméabilité matricielle ou de fracture en milieu saturé en eau. Sur l'ensemble du forage, la délimitation des zones potentiellement perméables correspond à la détection des fractures compte tenu de la faiblesse des valeurs de porosité et de perméabilité matricielle. L'histogramme des valeurs  $Ic$  corrigées (fig. 7) permet d'une part une bonne localisation des zones perméables correspondant aux valeurs de  $Ic$  les plus élevées (> 9) et d'autre part : une localisation des intervalles non fracturés à matrice faiblement perméable dont l'indice  $Ic$  est inférieur à 9. Ces derniers représentent environ 90 % des roches traversées. L'étalonnage des valeurs de l'indice  $Ic$  en unité de perméabilité (m/s) n'a été possible qu'après la réalisation d'essais de type Lugeon dans le forage. La relation classiquement admise (LEBRETON *et al.*, 1978 ; CONCHE *et al.*, 1986) entre ces deux types de mesures a été vérifiée lors de ces essais (voir paragraphe suivant) et elle est de la forme :

$$Ic = \alpha \log k/\mu + \beta$$

ou  $\alpha$  et  $\beta$  dépendent de l'outil graphique utilisé.

## 5 – MESURES DE TERRAIN

### 5.1 Essais hydrauliques de type Lugeon

Les tests d'injection ont été utilisés afin d'obtenir un ordre de grandeur de la perméabilité du milieu (CASSAN, 1980 et 1986) et d'avoir un contrôle sur la fracturation. Les essais ont été réalisés à l'aide d'un dispositif à double obturateur avec une lanterne de grande taille (4 m) afin de minimiser le contournement des obturateurs le long de fractures subverticales. La localisation des tranches testées a été établie à partir du log structural.

Cinq zones, correspondant à des degrés et des types de fracturation différents, ont été sélectionnées. Nous avons alors réalisé une série d'essais d'injection à paliers de pression d'eau croissante (pression maximum = 1 MPa) puis décroissante, maintenus constants pendant une durée de 10 minutes après stabilisation des débits injectés (établissement d'un écoulement permanent). On obtient pour chaque essai une courbe débit/pression à partir de laquelle on calcule la valeur de la perméabilité (CASSAN, 1980 et 1986). Ces valeurs comprises entre  $1 \cdot 10^{-6}$  à  $8 \cdot 10^{-6}$  m/s sont rapportées sur l'histogramme de la figure 7.

Ces essais indiquent que :

- les valeurs les plus élevées de l'indice  $l_c$  coïncident bien avec des zones de fractures ouvertes et hydrauliquement actives (de 11 à 12 m, 16 à 18 m, 19 à 20 m) (fig. 7),
- il est possible d'établir une calibration locale  $l_c = f(k)$  (fig. 9) dont la relation s'écrit :

$$l_c = 7,13 \log k + 51 \quad (k \text{ en m/s})$$

Cet étalonnage n'est qu'une estimation de la perméabilité ; en effet les faibles valeurs d'indice semblent surestimées par rapport aux mesures effectuées sur la matrice ( $k \approx 10^{-9}$  m/s). L'écoulement dans la première zone fissurée (11 à 12 m), présentant les plus fortes valeurs de  $l_c$ , semble être laminaire tandis que dans les deux autres zones (à valeurs de  $l_c$  moins élevées) les écoulements semblent laminaires (16 à 18 m) ou turbulents (19 à 20 m) mais compensés par l'ouverture élastique des fissures à une pression critique d'environ  $2,7 \pm 0,2$  bars.

### 5.2 Sismique réfraction

Comme nous l'avons vu précédemment, lors des mesures des vitesses ultrasoniques (2D), la matrice rocheuse est quasiment isotrope (paragraphe 3.4). Les variations des vitesses de propagation des ondes sismiques P vont dépendre essentiellement de l'anisotropie induite par la fissuration naturelle. Pour cela nous avons utilisé les méthodes de la sismique réfraction afin de mesurer les vitesses de propagation des ondes P dans les différentes directions du massif rocheux, à l'aide d'un dispositif de tir en « arc » (BROQUET *et al.*, 1978), placé sur le fond de la carrière (structure tabulaire).

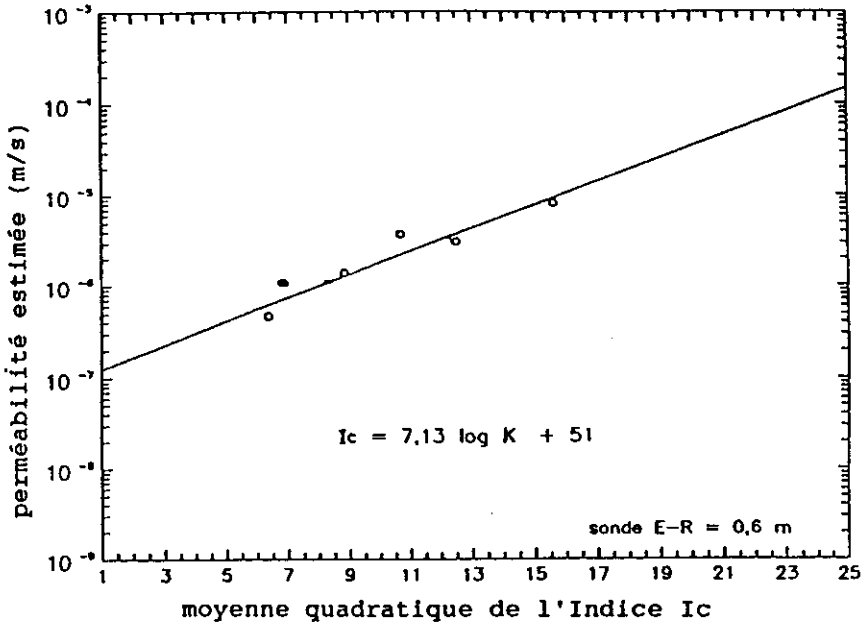


Figure 9 Relation entre la perméabilité Lugeon et la moyenne quadratique de l'indice  $Ic$  corrigé :  $Ic - C(Ic)$ .

*Relation between the Lugeon permeability and the quadratic average of the corrected index  $Ic$  :  $Ic - C(Ic)$ .*

Ce dispositif (fig. 10) permet une mesure de vitesse tous les  $10^\circ$  environ, les géophones étant placés sur un arc de cercle centré et à égale distance (10 m) du point de tir.

Les résultats (fig. 11) sont présentés sous la forme d'un diagramme polaire, donnant l'anisotropie A (en %) pour chaque direction étudiée avec :

$$A = (V - V_{\min}) / V_{\text{moy}}$$

où  $V_{\min}$  est la vitesse minimum,  $V_{\text{moy}}$  : la vitesse moyenne,  $V$  : la vitesse suivant la direction considérée.

La comparaison du diagramme d'anisotropie A de vitesse avec la rosace de la fracturation relevée sur le site montre la quasi-concordance entre la direction du maximum d'anisotropie ( $N 140^\circ$ ) et la direction de fracturation majeure ( $N 120^\circ$ - $N 140^\circ$ ), alors que la direction minimum d'anisotropie ( $N 40^\circ$ - $N 50^\circ$ ) est sensiblement perpendiculaire à celle-ci. Cette technique permet de mettre en évidence l'état de contrainte actuel dans le massif rocheux qui peut être entièrement différent de celui qui a engendré les discontinuités. Cet état de contrainte peut venir modifier l'ouverture des fissures et rétablir sous l'effet d'un serrage la continuité sismique du milieu dans certaines directions (BROQUET *et al.*, 1978). Des remarques similaires ont été faites lors d'études sur l'anisotropie ultrasonore de carottes de forage (RASOLOFOASON *et al.*, 1989). Le comportement hydraulique d'un milieu, à



matrice continue et isotrope, est dépendant de l'état des contraintes locales, les écoulements se font de façon préférentielle dans la direction d'anisotropie maximum, à la faveur des fissures ouvertes. Rappelons que les directions des fractures ouvertes (zone de 16 à 20 m) relevées dans le forage sont N 135°- N 145° alors que l'axe d'anisotropie A maximum mesuré en sismique est N 140°.

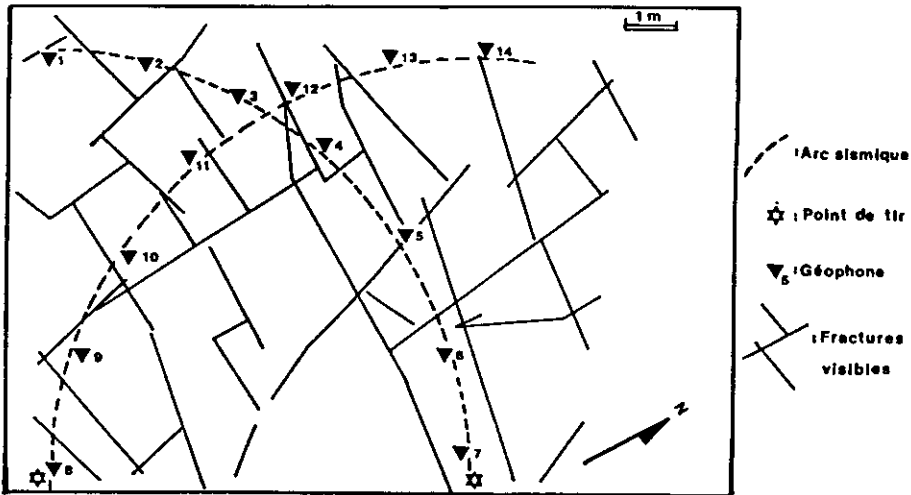
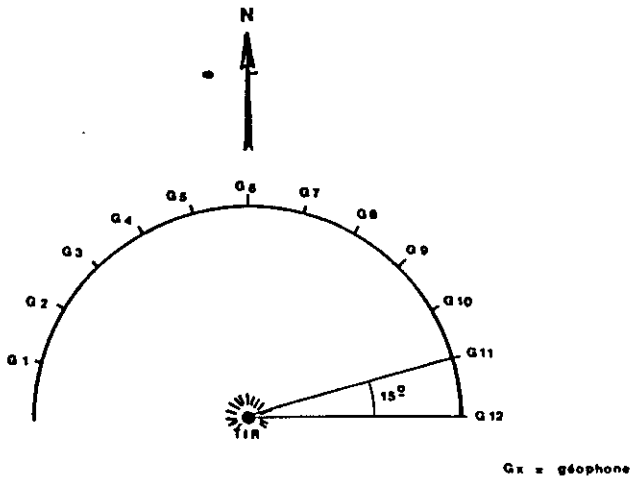
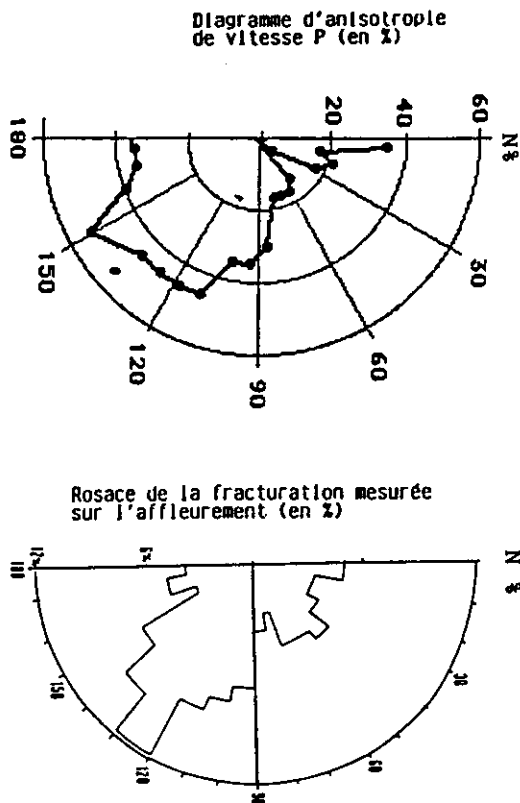


Figure 10 Dispositif en arc de tir sismique réfraction et de la position des points de tir par rapport aux fractures visibles sur le terrain.

*Sismic refraction apparatus and position of the shoot points in relation with visible field fissures.*



**Figure 11** Relation entre l'anisotropie (%) de vitesse de l'onde longitudinale P et la distribution (%) de la fracturation observée sur le terrain.

*Relation between the longitudinal P wave speed anisotropy (%) and the fracture distribution (%) observed in the field.*

## 6 - CONCLUSIONS

La confrontation de plusieurs méthodes d'investigation à différentes échelles permet de montrer les limites de ces méthodes mais aussi leurs complémentarités :

- les mesures en laboratoire (porosité, perméabilité, vitesse ultrasonique) ont montré le rôle limité de la matrice dans l'écoulement des eaux. La matrice est à l'échelle centimétrique homogène et relativement isotrope mais les écoulements se font à la faveur de l'interconnection du réseau poreux ;

- les mesures « in situ » de diagraphie acoustique indiquent qu'il existe de nombreuses zones où l'indice  $I_c$  est élevé ( $I_c > 10$ ) mais pour certaines zones aucun écoulement n'a été mis en évidence. Une correction de

l'argilosité a permis d'éliminer un grand nombre de fortes valeurs d'indice. Il apparaît donc primordial d'associer à la mesure de l'indice  $I_c$  une diagraphie gamma-ray afin d'avoir une connaissance contrôlée de l'argilosité. C'est pourquoi un abaque de correction  $C(I_c)$  est proposé afin d'obtenir une valeur de l'indice  $I_c$  corrigé [=  $I_c - C(I_c)$ ].

Les mesures en tête de forage en zone non saturée s'avèrent peu fiables, elles montrent l'importance de la saturation du milieu sur l'atténuation des ondes acoustiques et la nécessité d'opérer en milieu parfaitement saturé en eau.

Finalement la mise en évidence et la quantification des propriétés de la matrice et des fractures les plus conductrices, dans un ou même plusieurs forages, ne sont pas suffisantes pour déterminer la géométrie des écoulements dans un massif rocheux. Il est nécessaire de connaître la géométrie et l'interconnexion des fractures sur l'ensemble du massif, soit par les méthodes directes de relevés de fissuration sur le terrain soit par des techniques indirectes telles que la sismique réfraction, en accédant autant que possible, à l'état de contrainte actuel dans le massif rocheux.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions Mr B. Zinsner de l'Institut Français du Pétrole, pour son accueil au sein du laboratoire de Physique des roches et pour son aide lors de la réalisation des mesures en laboratoire.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABELIN J., NERETNIEKS I., 1991. A large scale flow and tracer experiment in granite- Experimental design and flow distribution. *Water Resources Research*, vol. 27, n° 12, pp. 3107-3117.
- BOURBIE T., COUSSY O., ZINSNER B., 1986. Acoustique des milieux poreux. *Edit. Technip*, Paris, 334 p.
- BROQUET P., FORESTIER G., VEREZ C., 1978. Essai d'analyse en sismique réfraction de la fracturation d'un massif rocheux calcaire de Franche-Comté. *Ann. Sc. Univ. Besançon, Géol. fasc. 29, 3<sup>e</sup> série*, p. 37-45.
- CABRERA J., CUSHING E.M., DERLICH S., 1990. Etude par forage de la fracturation profonde en roches dures (granite) à partir de carottes et imagerie sonique : exemple du forage d'Auriat. *Journées Diagraphies et Mécanique des terrains*, Bordeaux, 13-14 nov. 1990, pp. 37-49).
- CASSAN M., 1980. Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols. *Edit. Eyrolles*, Paris, 275 p.
- CASSAN M., 1986. Aide-mémoire d'hydraulique souterraine. *Presse Ecole Nat. Ponts et Chauss.*, Paris, 193 p.

- CONCHE B., 1985. Apport des diagraphies dans l'identification de la fracturation. *Mém. I.P.G.*, Strasbourg, France, 65 p.
- CONCHE B., LEBRETON F., ROJAS J., 1986. Evaluation of porous medium permeability by acoustic logging finds geothermal applications. *Internal Report Univ. Stanford*, USA, 8 p.
- DAW G.P., SCOTT R.A., 1983. Hydrological testing for deep shafts and tunnels. *Bull. Intern. Assoc. of Engineerin Geology*, Paris, n° 26-27, p. 391-395.
- DUCOMTE C., 1985. Diagraphie de perméabilité en géothermie. *Géothermie Act.*, n° 2, p. 30-35.
- DULLIEN F.A.L., DHAWAN G.K., 1974. Characterization of pore structure by a combination of quantitative photomicrography and mercury porosimetry. *Jour. of Colloid and Interface Sc*, n° 47, p. 337-349.
- FAUDOT D., 1980. Etude structurale d'un corps poreux. *Pétrole et Techniques*, Paris, France, n° 273, p. 175-182.
- GEYER R.L., MYUNG J.I., 1970. The 3D velocity log : a tool for in situ determination of the elastic moduli of rocks. *Dynamic Rock Mechanics, 12<sup>th</sup> Symposium on Rocks Mechanics*, Rolla, USA, p. 71-105.
- JENKINS R.G., RAD M.B., 1984. The effect of elliptical pores on mercury porosimetry results. *Powder Technology*, n° 38, p. 177-180.
- LEBRETON F., SARDA J.P., TROCQUEME F., MORLIER P., 1978. Logging tests in porous media to evaluate the influence of their permeability on acoustic waveforms. *Transactions of S.P.W.A. 19<sup>th</sup> annual logging symposium*, El Paso, USA, 24 p.
- LIEDTKE L., PAHL A., 1984. Water injection test and finite element calculations of water percolation through fissured granite. *Proceedings of a joint CEC-NEA Workshop*, Brussels, Belgium, may 1984, pp. 411-422.
- MONICARD R., 1981. Cours de production. Tome 1 : caractérisation des roches réservoirs. Analyse des carottes. *Edit. Technip*, Paris, France, 203 p.
- RAMPNOUX N., 1991. Relations entre la fracturation et la perméabilité en pays calcaire - Etudes au laboratoire et in situ à l'aide des outils hydrauliques et diagraphiques (Doubs, Franche-Comte), *Thèse Univ. de Franche-Comté*, Besançon, 290 p.
- RASOLOFOSAON P.N., ZINSNER B., 1989. Effet de la relaxation des contraintes in situ sur l'anisotropie ultrasonore P et S des carottes de forages. *Proceedings of Intern. Sympos. on Rock at Great Depth*, Edit. Maury & Fourmaintraux, Pau, France, p. 305-312.
- SERRA O., 1985. Diagraphies différées. Base de l'interprétation. Tome 2 : interprétation des données diagraphiques. *Bull. Centre Rech. Expl. Prod. Elf Aquitaine*, Pau, France, Mem. 7, 631 p.
- SOPENA J.P., SOULAS J.P., 1973. Etudes microtectoniques dans le Jura. Déformations des calcaires sous contrainte tectonique ; essais d'interprétation et de corrélation des résultats pour l'ensemble de la chaîne. *Thèse Univ. de Franche-Comté*, Besançon, 2 vol., 154 p.