

Mesures de paramètres physiques dans le sondage d'Échassières (vitesse sismique, porosité, densité)

J.L. Vignerresse*, M. Cannat*

Mots-clés : Diagraphie, Carotte, Densité, Porosité, Vitesse, Onde sismique, Onde P, Granite (Granite Beauvoir) Allier (Échassières).

Résumé

Nous avons procédé à l'analyse de différents paramètres physiques acquis lors des diagraphies préliminaires du sondage d'Échassières et mesurés sur échantillons carottés. Le dépouillement des logs permet l'exploitation, entre autres, de la densité gamma, de la porosité neutron et de la vitesse sismique V_p . Parallèlement, nous avons mesuré la densité et la porosité sur échantillons carottés. Ces mesures ont été effectuées après traitement spécifique des échantillons (mise à l'étuve, immersion sous vide) afin d'obtenir la porosité ouverte du matériel. La corrélation entre diagraphies et mesures sur échantillons est bonne, bien que la porosité mesurée sur carottes soit systématiquement inférieure à la « porosité-neutron » déterminée en forage. La densité est variable dans les 100 premiers mètres, puis décroît de 2,705 à 2,685 avec la profondeur entre 200 et 400 m. Cette décroissance n'est pas strictement corrélée à une augmentation de la porosité. Elle lui correspond dans la partie basse en relation avec la relaxation de contraintes observée au dessus de la zone fracturée de 450 m. Le changement de faciès est indiqué par la densité qui devient constante en dessous de 480 m (entre 2,675 et 2,670). La porosité reste également constante dans cette partie du sondage. Le changement de faciès est également marqué dans le log sismique. Bien que nous possédions simultanément les logs de vitesse et de densité, nous n'avons pas calculé de log d'impédance sismique ou de coefficients de réflexion. Nous pensons que la grande abondance des fractures (espacement d'environ 40 m) et la faible amplitude des coefficients de réflexion provoque des interférences constructives ou destructives, nécessitant ainsi une élaboration complexe d'un sismogramme synthétique.

Abstract

Downhole logging of seismic compressional velocity, density and porosity compared to cored samples measurements from the Échassières deep borehole.

Downhole logging performed in the Échassières deep borehole (900 m) allows the measurement of seismic compressional velocity, density and porosity. We analyzed and compared these data with measurements on samples cored at various depths. Those measurements were performed after a 24 h vacuum process and low temperature (80 to 100 °C) heating to remove interstitial water in order to catch the open porosity. The correlation between both acquired data is fair though the downhole neutron-porosity is systematically higher than that measured on cored samples. Density values first increase from the top (-99 m) (2.675) down to 200 m (2.710) mainly in relation with the closure of porosity, then values slightly decrease between 200 and 400 m (from 2.705 to 2.685) in correlation with fracture relaxation occurring at 400 m. After a facies change at 480 m, the density remains nearly constant (from 2.670 and 2.675) and correlates with a very reduced constant porosity of 0.30 %. The facies change is also observed on the seismic log. The velocity log shows an increase of the velocity from 4.500 to 5.500 m/s fairly correlated to the closure of porosity. Values are stabilized downhole at 250 m. The changes in velocity and porosity correspond to fracture zones. After the facies change at 480 m, the velocity remains constant around 5750 m/s. A slight decrease to 5650 m/s is observed when the lowermost facies (silicified granite) is encountered (at 720 m). The significant variations of the porosity in this zone also alter other physical parameters. Though we simultaneously had the velocity and density values, we did not computed neither seismic impedance nor reflection coefficient logs. We are conscious that a synthetic seismic log would have been of interest but we suspect that the closely spaced fractures (about 40 m) pattern and the low amplitude reflection coefficients (from 0.05 to 0.1) could create destructive or constructive interferences on the synthetic seismograms.

* Laboratoire de Tectonophysique, Université de Nantes - 44072 Nantes Cedex 03.

Dans le cadre du programme Géologie Profonde de la France (GPF 8-1) un sondage de 900 m a été effectué dans le granite de Beauvoir (commune d'Échassières, Allier). Ce sondage carotté tout du long a fait l'objet de diagraphies multiples (Straub, 1985, Gable, 1985, Autran, 1985, Straub, ce volume). Il est apparu intéressant d'analyser certaines d'entre elles, comparativement avec des mesures effectuées sur échantillons carottés. Pour des raisons de commodité, nous avons essentiellement traité les logs de vitesse sismique des ondes de compression (V_p), de densité gamma et de porosité neutron. D'autres paramètres physiques ont été déterminés, ils ne sont cependant pas pris en compte dans cet article, du fait de leur implication méthodologique (production de chaleur (Vignerresse et Cuney, ce volume) ou de leur signification structurale (anisotropie de susceptibilité magnétique (Bouchez *et al.*, ce volume)). Simultanément nous avons mesuré la densité et la porosité sur des échantillons carottés dans le but de vérifier les valeurs obtenues d'après les diagraphies. Un autre but était de vérifier la variation de densité avec la profondeur. Lors des interprétations gravimétriques, on suppose généralement que la densité augmente avec la profondeur, cependant certaines mesures effectuées sur des échantillons de forage indiquent une légère décroissance de la densité avec la profondeur (Chernis, 1984, Kowallis et Wang, 1982).

A cause de la taille des échantillons disponibles lors du sondage, nous avons utilisé des cylindres de diamètre un pouce (25,4 mm) et d'environ 22 mm de hauteur. Il est rapidement apparu nécessaire de développer une technique adaptée à ce genre d'échantillons pour effectuer une mesure de densité correcte. En effet, la porosité ouverte des échantillons peut faire varier les mesures par simple échange de fluides rendant ainsi la mesure non stationnaire. Ce faisant, il est également devenu possible de mesurer la porosité ouverte.

Mesure de la densité

La technique est celle utilisée habituellement à l'aide de trois pesées du matériel sec, immergé « sec » et immergé après imprégnation. La méthodologie comporte une préparation préalable de l'échantillon.

1. — Mesure du poids sec. Les échantillons sont préalablement séchés à l'étuve pendant 24 heures. La température n'est cependant pas très élevée (80-100 °C), pour éviter la production de nouvelles fractures dues à la dilatation thermique différentielle des minéraux (Heard and Page, 1982). L'expérience montre que les valeurs de 80 à 100 °C sont largement suffisantes, au delà, la porosité créée thermiquement augmente d'abord faiblement, puis s'accroît fortement au dessus de 200 °C. Un gradient de chauffe modéré atténue l'apparition de cette nouvelle porosité. Le poids sec est obtenu au sortir de l'étuve. Une forte réhumidification des carottes se produit dès la sortie de l'étuve.

2. — La mesure du poids immergé « sec » doit être effectuée tout de suite après la mesure du poids à sec. On constate une réhumidification très rapide des échantillons. Ceux-ci peuvent gagner plusieurs milligrammes en quelques minutes sur un poids total immergé de moins de 20 grammes.

3. — Le poids immergé vrai est obtenu après imprégnation sous vide des échantillons. On procède tout d'abord à un dégazage de l'eau sous cloche à vide pendant environ 3 heures. L'immersion dure une douzaine d'heures toujours sous cloche à vide. Certains échantillons ne sont pas complètement imprégnés après ce traitement. Une dérive continue de la mesure pendant l'immersion est indicatrice de ce phénomène. Il faut alors reprendre le vide et l'immersion.

Étant alors en possession des différentes mesures, on calcule simultanément la densité et la porosité totale. Cette dernière incorpore également la porosité de surface des échantillons. Il n'a pas été possible de l'évaluer. Une série de mesures sur un même faciès, mais avec des volumes et une géométrie variables devrait permettre l'estimation du rapport entre porosité de surface et porosité totale.

Les résultats obtenus (fig. 1) montrent une variation de la densité et de la porosité en fonction de la profondeur. La densité est relativement variable entre 2,680 et 2,715 de la surface à 480 m avec une certaine tendance à diminuer entre une valeur moyenne de 2,705 à 200 m et 2,685 à 400 m. Ensuite la densité se montre relativement constante entre 2,670 et 2,675 jusqu'à 800 m. Les valeurs de la porosité sont variables jusqu'à 400 m. Elle passe de 1,5 % en surface à 0,4 % à 280 m. Une augmentation régulière s'observe ensuite, liée semble-t-il à la zone fracturée aux alentours de 450 m. Ensuite, la porosité devient remarquablement faible et constante à environ 0,30 % jusqu'à 800 m.

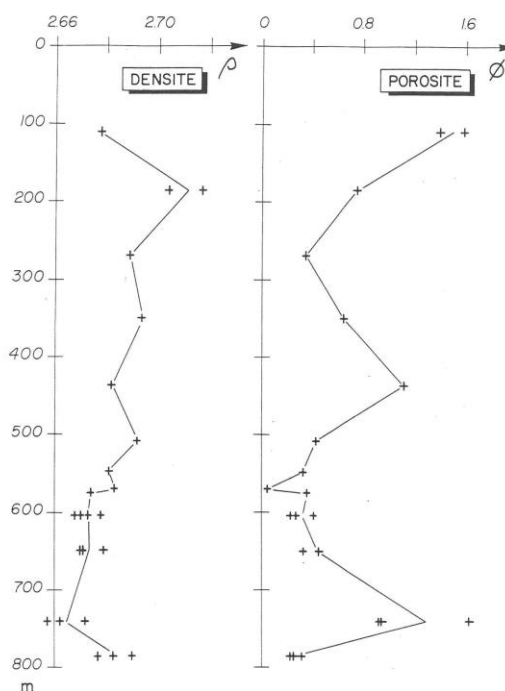


Fig. 1. — Densité et porosité mesurées sur échantillons.
Density and porosity values measured on cored samples.

Comparaison avec les valeurs des densités obtenues en diagraphie

On constate que les valeurs obtenues sur échantillons sont systématiquement décalées par rapport aux mesures des diagraphies (fig. 2). A ceci on peut proposer, soit un calage défectueux des diagraphies, soit un effet de la pression de confinement et des fluides résiduels dans le forage. Un calage défectueux qui expliquerait le décalage systématique en faveur des mesures sur échantillons, est cependant peu vraisemblable du fait du principe de la mesure de densité gamma. L'effet de la pression de confinement n'explique pas le signe du décalage. On retiendra cependant que les variations relatives de densité sont conservées entre les mesures sur échantillons et les mesures en forage. En conséquence, il est possible de discuter les variations relatives de la densité et de la porosité par l'examen simultané des diagraphies et des mesures sur carottes.

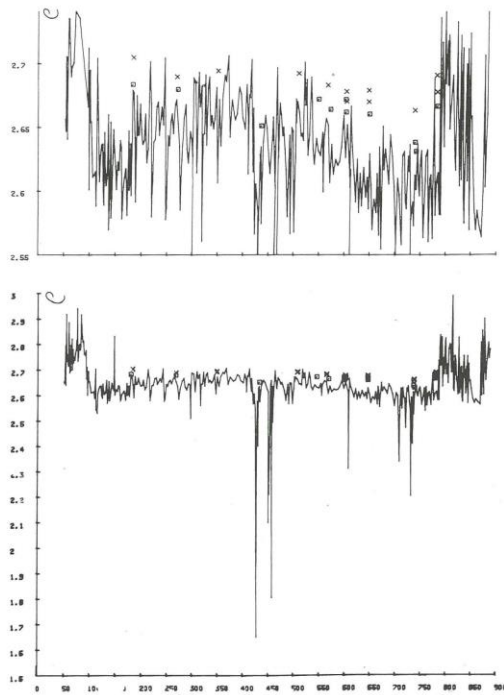


Fig. 2. — Densités mesurées sur les diagraphies et échantillons carottés à pleine échelle et dans l'intervalle de variation de 2,55 - 2,75 (sans les zones altérées) à échelle agrandie. Les croix correspondent aux densités de l'échantillon imprégné sous vide, les carrés à celles mesurées sans imprégnation sous vide. Density values measured during the preliminary logging and on cored samples on full scale diagram and above with an appropriate scale (2,55 - 2,75) excluding altered and fractured zones. Crosses indicate the density measured after the vacuum impregnation process, while the square indicate the measurements made before the vacuum impregnation.

La méthode utilisée sur échantillons a été mise au point après une série d'essais et de tatonnements. Nous l'avons finalement retenue plutôt que certaines solutions proposées par ailleurs (Wadden, 1979, Chernis, 1984, Lin et al. 1986, Melnyk et Skeer, 1986). On peut cependant noter la méthode mise au point par Melnyk et Skeer (1986) qui analysent les différentes causes d'erreurs de mesure aux différentes étapes de la mesure. Ces travaux, centrés sur des forages profonds dans du matériel granitique, présentent des résultats similaires à ceux d'Échassières. Une légère décroissance de la densité est observée dans d'autres sondages (Wadden, 1979, Daniels et al. 1983). Dans le sondage du Lac du Bonnet (Canada) cette variation, observée entre 130 et 410 m, peut faire passer la densité de 2,73 à 2,63 soit une variation de 5%. Dans ces travaux, les valeurs de la porosité sont très faibles, souvent inférieures à 0,5%.

La décroissance de la densité est généralement attribuée à une augmentation de la porosité. Dans le cas de mesures sur échantillons, cette décroissance peut faire intervenir une nouvelle fracturation par suite de la décompression rapide des roches, liée au forage. Celle-ci se manifeste par l'apparition d'une fracturation en avance de la zone forcée sous l'effet de la dilatance. Il en résulte une augmentation de la porosité (Kowallis et Wang, 1982). On doit alors observer une corrélation inverse entre la densité et la porosité. Ce n'est pas le cas lors du changement de faciès à Échassières, ou la porosité en dessous de 480 m est relativement constante. C'est cependant ce que l'on observe de 200 à 400 m. La décroissance de la densité de 200 (2,705) à 400 m (2,685) s'accompagne tout d'abord d'une décroissance de la porosité de 0,8 à 0,3% jusqu'à 260 m, puis d'une augmentation régulière de cette dernière de 0,3% à 260 m à 1,1% à 440 m. Cette augmentation de la porosité est à relier à la relaxation des contraintes au-dessus de la zone fracturée à environ 450 m. (B. Feuga, ce volume).

La décroissance générale de la densité en profondeur de 2,705 vers - 200 m, à 2,665 à - 750 m ne s'accompagne pas d'une diminution régulière de la porosité. Il existe certes une corrélation entre ces deux paramètres, cependant le rapport de leur gradient de variation dans les deux logs n'est pas constant. On ne peut donc évoquer les variations de porosité comme seules causes des changements de densité. Le changement de faciès qui intervient au-dessous de 480 m se traduit également par un changement du caractère de la corrélation densité/porosité.

Vitesse sismique

La vitesse sismique des ondes de compression (V_p) a été mesurée en diagraphie (Autran, 1985) sous forme de courbe de lentour. Ces données ont été redigitalisées et converties en courbe de vitesse. La vitesse est très variable tout au long du forage, signe de nombreuses zones d'altération ou de fissure. Connaissant la vitesse et la densité, il était facile de construire un log d'indépendance sismique et de coefficients de réflexion.

Nous n'avons pas effectué ce travail pour les raisons suivantes :

Le coefficient de réflexion est donné par le rapport entre la différence et la somme des impédances acoustiques. Il

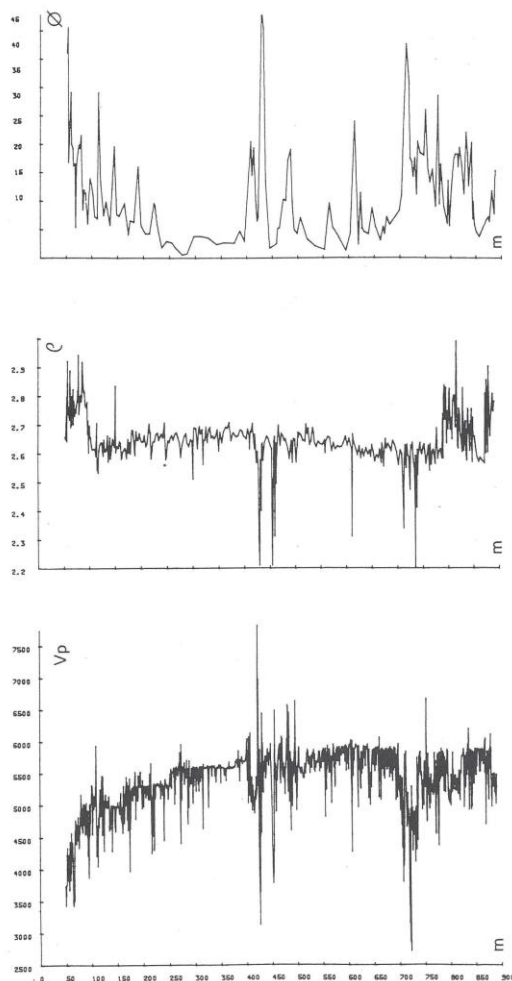


Fig. 3. — Corrélation vitesse / densité / porosité.
Chaque paramètre a été redigitalisé des données originales.
Les unités respectives sont en m/s, et en %,
les densités sont naturellement sans unités.

Correlated diagrams of compressional velocity, density and porosity.
Each curve has been digitized and redrawn from the original measures.
Units are in m/s and %.

permet de construire un sismogramme synthétique par convolution avec une onde sismique simple. Le calcul de l'impédance sismique nécessite donc un échantillonnage homogène des logs de densité et de vitesse. La vitesse sismique est cependant extrêmement variable au cours du log à cause de la présence de nombreuses fractures et zones d'altération se

succédant avec un intervalle moyen de 40 m. De ce fait, le calcul de l'impédance nécessite au préalable un filtrage délicat que nous n'avons pas entrepris. De plus, ces zones de fracture peuvent provoquer de nombreuses interférences lors du calcul des sismogrammes synthétiques. On admet en général une fréquence de réponse du signal sismique comprise entre 5 et 50 Hz. Compte tenu de la vitesse moyenne des roches (5600 m/s) et d'un pas de digitalisation des sismogrammes d'environ 1 ms, cet échantillonnage correspond à des structures d'environ 1 à 10 m. Le risque d'interférence entre les ondeslettes d'environ 35 Hz et les nombreux coefficients de réflexion est donc sérieux. Ceci est encore renforcé par le fait que les coefficients de réflexion calculés de façon ponctuelle sont faibles (entre 0,05 et 0,1).

Références bibliographiques

- AUTRAN A. (1985). — Diagraphie sonique réalisée par SEMM. Programme Géologie Profonde de la France, Thème 8, Documents BRGM n° 100, pp. 293-301.
- CHERNIS P.J. (1984). — Comparison of the pore microcrack structure of the shallow and deep samples of the Lac du Bonnet granite. Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario TR 223, 20 p.
- DANIELS J.J., OLHOEFT G.R., SCOTT J.H. (1983). — Interpretation of core and well log physical property data from drill hole UPH 3 Stephenson County Illinois. *J. Geophys. Res.*, **88**, pp. 7346-7354.
- GABLE R. (1985). — Étude thermique préliminaire. Programme Géologie Profonde de la France. Thème 8. Documents BRGM n° 100, pp. 280-292.
- HEARD H.C., PAGE L. (1982). — Elastic moduli, thermal expansion and inferred permeability of two granites to 350 °C and 55 Mega-Pascals. *J. Geophys. Res.*, **87**, pp. 9340-9348.
- KOWALLIS B.J., WANG H.F. (1982). — Microcrack study of granitic cores from Illinois deep boreholes UPH 3. *J. Geophys. Res.*, **88**, pp. 7373-7380.
- LIN C., PIRIE G., TRIMMER D.A. (1986). — Low permeability rocks : laboratory measurements and three dimensional microstructural analysis. *J. Geophys. Res.*, **91**, pp. 2173-2181.
- MELNYK T.W., SKEER A.M.M. (1986). — An improved technique for the determination of rock porosity. *Can. J. Earth Sci.*, **23**, pp. 1068-1074.
- STRAUB A. (1985). — Résultats complets des diagraphies du forage Échassières 1, Programme Géologie Profonde de la France. Thème 8. Documents BRGM n° 100, pp. 239-279.
- WADDEN M.M. (1979). — Porosity measurements by the immersion techniques for the WN-1,2 and CR-6,7 samples, Electrical seismic rock property Lab. Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario, TR 7879-D6, 14 p.
- N-B : les diagraphies détaillées sont reproduites dans le Document BRGM n° 124.