

Diagraphies géophysiques dans les forages de Chassole.

A. Straub *

Mots-clés : Diagraphie, Altération, Lithofaciès, Eau souterraine, Puy-de-Dôme (Chassole).

Résumé

La disponibilité de deux forages à Chassole, l'un destructif et l'autre carotté, a permis une large expérimentation très complète de diagraphies physiques différées conventionnelles. Voici énumérées très rapidement les diverses grandeurs physiques mesurées dans le forage S2 et en partie dans le forage S1.

Premièrement, il y a des grandeurs caractéristiques principales de la fracturation et de l'altération du milieu : résistivité, porosité neutron, sonique.

Deuxièmement, il y a des grandeurs caractéristiques de la nature pétrophysique : densité gamma, gamma-ray.

Troisièmement, il y a des grandeurs caractéristiques des circulations de fluide dans le forage : résistivité de l'eau du forage, température de précision et gradient thermique. Ces données géophysiques ont été confrontées par voie informatique à des données géologiques : densité et caractérisation de la fracturation, degré d'altération et degré de présence de sulfures. Cet ensemble a permis une interprétation détaillée des mesures et grâce à leur caractère continu (la couverture étant totale, sauf exceptions dues à la présence de tubage ou à l'obstruction du trou) a apporté une information originale, réductible à aucune autre.

Abstract

Geophysical logging in Chassole boreholes

The Cezallier GPF project involving two boreholes in Chassole, the first one destructive (S1) and the second cored (S2) gave the opportunity for a comprehensive logging study. The various measurements of physical parameters made on this site may be split in three groups :

- a first set, influenced by fracturation and alteration : electrical resistivity, neutron porosity, sonic velocity and waveform analysis ;
- a second set relevant to petrographic features : gamma-gamma density, gamma-ray ;
- a third set influenced by water circulation : borehole water resistivity, temperature and temperature gradient.

These geophysical data have been complemented by geological ones : fracturation density log (fracture count per meter with classification according to various criteria such as alteration filling), alteration rate log, sulfides occurrence rate log. It has thus been possible to obtain a detailed interpretation of the physical measurements, leading to the following main conclusions :

- the fracturation itself cannot be assessed from the geophysical logs because of the frequent occurrence of siderite ; but the associated alteration appears as the main factor involved in neutron porosity, resistivity and, to a lesser extent, sonic velocity ; a change in the type of alteration below 850 m in hole S2 is clearly visible on the resistivity log with characteristic transition zones due to pervasive alteration ;
- in several instances, the fractures induce converted waves on the sonic waveform ;
- the various facies can be sorted from their radioactivity level ;
- the most permeable structure are two breccias (at 695 and 957 m) which surprisingly are radioactive ;
- all the open permeable zones are visible on the temperature gradient log and the water resistivity log gives clues on the related water circulations.

Introduction

Nous examinerons ici les résultats des diagraphies géophysiques réalisées par le département Géophysique, la thermographie de précision réalisée par l'IMRG et le sonique réalisé par la société SEMM. Ces mesures ont été faites soit pendant la période de foration, soit après l'achèvement de celle-ci. Compte tenu du calendrier complexe des diverses interventions, la couverture totale des forages Chassole 1 et 2 n'a pu être réalisée, d'une part en raison de la présence de tubages (d'où résistivité non disponible), d'autre part en raison de l'obstruction du forage Chassole 2 à 1038 m (en octobre 86). En dehors de ces restrictions, les diverses cam-

* Département Géophysique, BRGM, Orléans.

pagnes menées en 1985 et 1986 ont permis de constituer un ensemble homogène et systématique de données.

Parallèlement aux mesures de terrain, une collaboration avec le service de Géologie structurale du BRGM a abouti à l'établissement de logs géologiques définissant la densité de fracturation (en fonction aussi du type de remplissage et de l'ouverture des fractures), le degré d'altération de la formation, le degré de présence des sulfures.

Toutes ces données géophysiques et géologiques sont présentées dans le document du BRGM n° 125, où nous reportons aussi les divers renseignements techniques : équipement final des forages, chronologie des mesures, classement des structures géologiques, codification de l'altération, codification de la minéralisation sulfurée.

Les diagraphies géophysiques ont donné lieu à divers traitements, afin d'aboutir à des grandeurs normalisées indépendantes des conditions de trou : correction de boue pour les diagraphies de résistivité, correction de diamètre et de tubage pour les diagraphies nucléaires, calcul d'une porosité neutron, calcul d'une densité gamma, calcul d'une température différentielle (ou gradient thermique), correction de température pour la résistivité de fluide. Ce sont ces diagraphies traitées, calées en profondeur en fonction de certains marqueurs géologiques, qui ont servi de base aux observations qui suivent. Leur confrontation avec les données géologiques (logs structuraux, log pétrographique) a servi de base à leur interprétation. Nous passons donc en revue, pour en analyser la réponse, chacune des grandeurs physiques mesurées.

1. — Résistivité

Parmi toutes les diagraphies électriques enregistrées (polarisation spontanée, monoélectrode, résistivité 16" et résistivité 64"), nous retenons la seule résistivité 16" car elle est la plus significative dans ce contexte. En effet, il y a dans ce cas un bon compromis entre la définition verticale et l'effet de boue. D'un point de vue quantitatif, la résistivité se caractérise par une très grande dynamique. Les niveaux les plus conducteurs ont une valeur approximative de 100 ohm.m, quelles que soient leurs profondeurs. Les niveaux les plus résistants par contre sont variables avec la profondeur : de l'ordre de 500 ohm.m vers 200 m, ils atteignent 50 000 ohm.m au fond du forage. Les facteurs potentiellement susceptibles d'influencer la résistivité sont : la fracturation, l'altération, la lithologie, les sulfures. A l'exception de ces derniers, ce sont là les mêmes facteurs qui interviennent pour la porosité neutron. Ceci explique la bonne corrélation entre ces deux paramètres. Celle-ci est illustrée par le crossplot de la figure 1, d'où l'on peut déduire de manière approchée un comportement du type relation d'Archie :

$$R = \frac{a}{\phi^m}$$

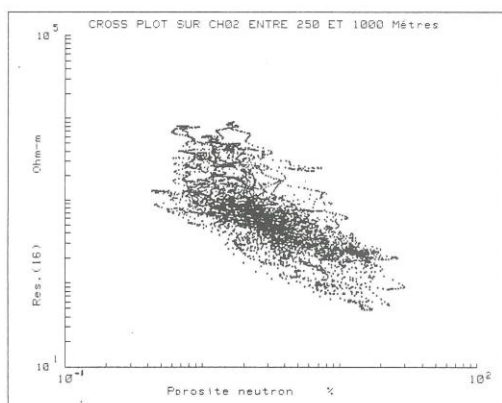


Fig. 1 — Diagramme résistivité-porosité neutron à Chassole S2.
Resistivity-Neutron porosity crossplot in Chassole S2.

où a est une constante, ϕ est la porosité neutron, l'exposant m est proche de 0,7. Il faut noter toutefois ici le caractère très imprécis de la porosité neutron qui recouvre autant la porosité de fracturation ou la teneur en eau des interstratifiés que la porosité intergranulaire.

Nous détaillons à présent les différents facteurs cités. Il n'existe pas de relation systématique avec la densité de fracturation. En effet, les structures rencontrées présentent un remplissage assez fréquent de sidérite, des remplissages argileux relativement rares jusqu'à 400 m et presque inexistant au-delà, des ouvertures rares (sauf vers 673-674 m et vers 688-689 m). Leur effet direct sur la résistivité est donc limité. Le facteur prédominant et largement présent tout au long du forage est le phénomène d'altération. L'argilisation en particulier est bien marquée par les niveaux les plus conducteurs. Une hydrothermalisation moins poussée manifeste une influence variable suivant la paragenèse de cette altération. On peut remarquer en particulier un net changement de comportement de la résistivité au-dessous de 850 m. Il apparaît dans cette zone inférieure des transitions très régulières (d'extension plurimétrique), avec une résistivité linéaire entre les niveaux les plus altérés et les niveaux les moins altérés (voir fig. 2). Ceci est caractéristique d'une altération pervasive ou diffuse sélective. D'un point de vue lithologique, on peut reconnaître de grandes zones résistantes qui s'individualisent bien dans les orthogneiss grossier ou fin, dans les leucogranites et dans les métaaplites. On observe, par contre, que la présence de paragneiss induit des baisses de résistivité (accompagnées d'anomalies de porosité neutron). Ceci doit être attribué à la texture lépidoblastique de ces paragneiss riches en interstratifiés. Par contre, la présence de sulfures ne s'individualise pas nettement, car leur effet ne peut se dissocier de l'altération qui les accompagne systématiquement.

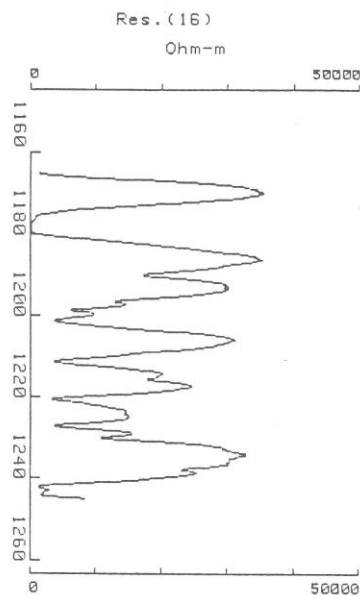


Fig. 2. — Transitions régulières en résistivité dues à une altération pervasive.
Linear transitions of the resistivity caused by pervasive alteration.

2. — Porosité neutron

Dans le forage Chassole S 2, la zone déconsolidée et altérée de surface s'étend environ jusqu'à 380 m, avec une porosité moyenne de 20 à 30% environ, avec des extremums pouvant aller à 70-90% dans les zones argilisées. Au-delà, la porosité moyenne baisse très fortement, les zones les moins poreuses ayant une valeur de 1% environ. Dans le forage Chassole S 1, on observe une répartition quantitative sensiblement identique. L'anomalie importante à 222 m est liée à des incidents de forage, ayant conduit à une cavité à cette profondeur.

Il existe une bonne corrélation avec la résistivité, les facteurs d'influence étant ceux déjà cités pour la résistivité.

3. — Vitesse sonique

L'évolution de la vitesse des ondes P avec la profondeur ressemble à l'évolution constatée en résistivité ou en porosité neutron : la vitesse des niveaux les plus rapides (donc les moins altérés) passe de 5 000 m/s vers 300 m à 6 000 m/s au fond du forage. Les valeurs, pour les niveaux les plus lents, se situent entre 3 500 et 4 000 m/s. Le facteur essentiel à l'origine de ces variations est le phénomène d'altération. Ceci explique la bonne corrélation observée entre la vitesse et la résistivité autant pour Chassole S 1 que pour Chassole S 2, avec toutefois une sensibilité nettement moindre pour la vitesse. On peut noter une particularité lithologique : la vitesse plus lente des anatexites schisteuses vers 337 mètres.

4. — Analyse des trains d'ondes soniques (société SEMM)

Ce sonique confirme les résultats précédents (obtenus par le BRGM) et apporte une information intéressante sur les diverses ondes se propageant dans le milieu : ondes P, ondes S et ondes de Stoneley (qui peuvent être aussi des ondes pseudo-Rayleigh). Nous examinerons successivement leur vitesse et leur amplitude.

Dans les formations les moins altérées, vers le fond de Chassole 2, on observe les vitesses respectives suivantes pour P, S et Stoneley : 5 800, 3 680 et 1 640 m/s. La connaissance de V_p et de V_s permet le calcul des paramètres élastiques. Nous trouvons (avec une densité de 2,7) pour le modèle d'Young une valeur élevée mais réaliste de 85 GPa et pour le coefficient de Poisson une valeur de 0,16. En présence d'altération, il y a diminution régulière des vitesses V_p et V_s , tandis que la vitesse Stoneley reste plus stable. De manière simultanée, on observe une diminution sensible des amplitudes P et S. L'amplitude Stoneley n'est affectée que si l'intervalle altéré est suffisamment épais.

Une particularité intéressante est l'existence d'ondes réfléchies par certaines fractures, la réflexion touchant ici uniquement les ondes de Stoneley les plus intenses (par exemple à 765 m, voir fig. 3). Il est toutefois impossible d'isoler sur le log structural les fractures responsables de ces réflexions.

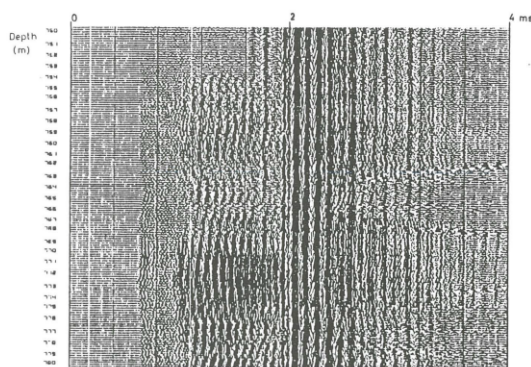


Fig. 3. — Représentation des trains d'ondes soniques à Chassole S 2. Sonic Waveform display in Chassole S 2.

5. — Densité gamma

Ce log présente d'abord une dérive évidente entre la surface et le fond, la densité passant de 2,5 en surface à 2,7 vers 1 000 m. Ce phénomène semble dériver de la baisse de la porosité avec la profondeur, le phénomène de compaction étant sans doute négligeable. On peut reconnaître d'autre part deux types d'anomalies :

- des anomalies légères liées soit à des zones cavées (visibles avec le diamètre) soit à des zones très poreuses, car argilisées (par exemple à 630 m) ;
- des anomalies lourdes liées soit à la présence de sulfures (vers 445 m), soit à l'existence d'une brèche avec cimentation de sidérite (vers 695 m).

6. — Radioactivité gamma-ray

Une analyse minutieuse de ce log montre l'intérêt pétrographique indéniable de ce paramètre. En effet, il est possible d'observer une différenciation entre divers faciès :

- un groupe dominant : orthogneiss, paragneiss et anatexites (35 à 40 cps),
- leucogranite moins radioactif (30 cps),
- métadiorite encore moins radioactive (20 cps) car pauvre en feldspath potassique,
- filons de quartz très peu radioactifs,
- métaaplite plus radioactive (50 à 60 cps) car riche en feldspath potassique.

Des analyses chimiques (en K, U et Th) permettraient d'éclairer l'origine de cette différenciation.

Il existe de plus des anomalies dues à des enrichissements locaux :

- altération de surface (avec excès ou déficit de potassium),
- orthogneiss à biotite (à 108 et 117 m),
- anatexites schisteuses (à 337-339 m),
- deux brèches importantes à 695 m et à 957 m : il s'agit là, d'après les essais hydrauliques, des niveaux les plus perméables. Leur forte radioactivité pourrait être due à une concentration d'éléments uranium et thorium par la sidérite.

7. — Susceptibilité magnétique

On peut reconnaître d'une part des variations assez nettes d'ordre lithologique avec une valeur moyenne relativement faible, d'autre part des zones magnétiques très perturbées et très locales. Parmi les faciès les moins magnétiques, il y a principalement des métaaplites (uniquement la zone 360-370 m), le leucogranite (par exemple entre 700 et 730 m), les pegmatites. Les orthogneiss constituent un milieu plus magnétique, avec une susceptibilité de l'ordre de 100 à $250 \cdot 10^{-6}$ SI. Il se surajoute à ces variations des anomalies très importantes dues à des enrichissements très locaux en magnétites ou en pyrrhotite. Des composés du fer, sous forme d'occurrences en sulfures, d'âge Carbonifère, ont ensuite été déstabilisés et oxydés et sont présents dans les phases à interstratifiés (sous forme d'oxyde) ou à sidérite, d'âge Oligocène. Il n'est donc pas surprenant d'observer que ces anomalies magnétiques se localisent dans les zones altérées. Aucune analyse en magnétite ou pyrrhotite n'est malheureusement disponible, pour mieux cerner les paragenèses d'altération en cause.

8. — Résistivité de fluide

La résistivité de l'eau du forage, tout comme son pH, est un indicateur du chimisme de l'eau. Cette mesure, confirmée en cela par les pompages d'essai et les prélèvements d'eau, indique la prédominance d'une eau, de résistivité égale à 2 ohm.m, dont la minéralisation, au fond du forage, est identique à celle de la source Sainte-Marguerite distante de 60 m. Il n'est toutefois pas prouvé pour le moment qu'il s'agisse de la même zone aquifère. Il existe d'autre part des apports d'une eau plus résistante, donc moins minéralisée, dont les points d'origine pourraient se situer à 443 et 452 m, là où existent des anomalies thermiques. Il est par ailleurs intéressant de constater le déplacement global vers le bas de cette anomalie, en l'espace d'une année (voir fig. 4). Il faut noter qu'en septembre 1985 le forage s'arrêtait à 700 m, tandis qu'en octobre 1986 un tubage métallique supplémentaire était présent dans le forage. Ces changements ont pu perturber l'équilibre chimique de l'eau du forage.

9. — Température absolue et température différentielle

(d'après R. GABLE)

La thermographie de précision réalisée sur le forage Chassole S2 est intervenue en décembre 1985, soit un mois après la fin du forage. Bien que cette période n'ait pas permis un retour complet à l'équilibre thermique, il est possible d'extraire un certain nombre d'informations de ces mesures.

En température absolue, la température finale au fond du forage est de 58°C . La température différentielle révèle :
— un gradient moyen, présentant une dérive avec la profondeur ($40^\circ\text{C}/\text{km}$ en surface et $30^\circ\text{C}/\text{km}$ au fond), traduisant un non-retour à l'équilibre thermique du puits ou une instabilité thermique globale ;

— l'existence d'anomalies, représentatives de circulations d'eau :

- . à 443 et 452 m : venues chaudes,
- . à 713, 729, 827 et 955 m : venues froides.

Ces niveaux perméables ont été reconnus par ailleurs, notamment par les essais hydrauliques. Le niveau bréchique à 695 m n'est pas visible, car cette zone avait été colmatée avant la mesure.

— une agitation thermique jusqu'à 830 m environ, suivie par un comportement très stable.

La thermographie réalisée sur Chassole S1 est intervenue peu de temps après la fin du forage. De plus, un problème instrumental enlève toute valeur aux mesures dans la partie supérieure (jusqu'à 265 m). Au-delà, on retrouve un gradient moyen de $35^\circ\text{C}/\text{km}$, comparable à celui de Chassole S2. Aucune circulation d'eau n'y a été détectée.

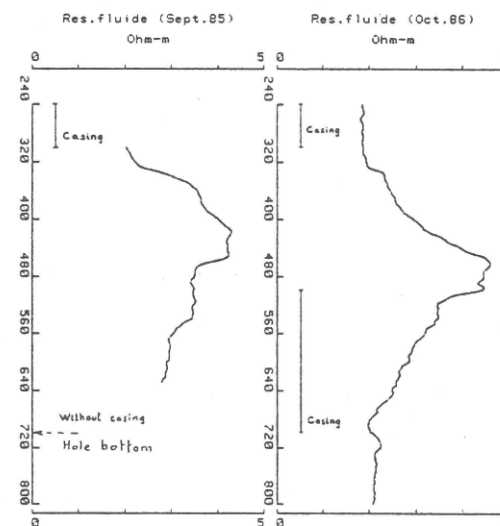


Fig. 4. — Évolution dans le temps de la diagraphie de résistivité de fluide à Chassole S2.
Variation with time of the borehole water resistivity log in Chassole S2.

Conclusion

L'examen des diverses diagraphies réalisées, leur confrontation avec les données géologiques, géochimiques et hydrauliques, permettent d'observer trois types de réponses spécifiques. Un premier groupe de diagraphies (résistivité et porosité neutron) s'avère surtout représentatif du degré d'altération de la formation. Par contre, dans ce contexte précis, la fracturation influe très peu sur ces paramètres. Un deuxième groupe de diagraphies (densité gamma, gamma-ray et susceptibilité magnétique) traduit surtout les variations lithologiques et permet de discriminer les faciès rencontrés. Le troisième et dernier groupe de diagraphies (résistivité de l'eau du forage, température différentielle) permet de reconnaître les apports de fluide à la faveur de certains niveaux perméables.