



Les Diagraphies

Introduction

Les diagraphies sont des techniques géophysiques mises en œuvre à l'intérieur d'un forage. Le rayon du volume d'investigation n'est pas beaucoup plus grand que celui du forage. Elles servent à mesurer en place un paramètre physique caractéristique du terrain, avec la meilleure résolution verticale possible. Elles ne permettent pas (contrairement aux techniques géophysiques de forage) d'augmenter le rayon d'investigation du forage ni de porter un jugement sur le caractère représentatif des informations obtenues à partir du forage. Elles sont complémentaires des techniques géophysiques de surface qui elles, permettent d'obtenir des informations représentatives d'importants volumes de terrain mais avec une résolution moins fine (on connaît le terrain « en gros » mais on ne distingue pas les détails).

Pour le géotechnicien la diagraphie est un outil parmi beaucoup d'autres mis à sa disposition pour l'aider à résoudre les problèmes qui lui sont posés. Ainsi, l'emploi des diagraphies sera quelquefois primordial, d'autre fois complémentaire.

1. Classification

On peut classer les diagraphies en 2 grandes catégories qui sont :

1.1/ Diagraphies instantanées : Elles sont réalisées pendant la foration, durant le processus même du forage, on réalise des mesures dont le résultat est fonction de la profondeur de l'outil de forage. Les diagraphies instantanées sont soit l'enregistrement des paramètres de forage, soit des diagraphies géophysiques. Les diagraphies instantanées permettent de mesurer les paramètres de forage elle se caractérise par leur faible coût et les renseignements complémentaires qu'elles apportent sont souvent très utiles. Lorsque l'on réalise un forage, on se prive d'une information riche si l'on n'enregistre pas en même temps ne serait-ce que la vitesse d'avancement instantanée.

1.2/ Diagraphie différées : c'est l'ensemble des méthodes géophysique effectuée dans un forage. Elles consistent à mesurer depuis l'intérieur du forage des grandeurs physiques caractéristiques du terrain.

2. Forage et Diagraphies

Les diagraphies ne peuvent être employées que là où existent des forages ; les forages peuvent se faire de diverses façons que l'on peut répartir en deux groupes principaux : les forages destructifs et les forages non destructifs.

2.1/ les forages non destructifs : la foreuse découpe dans le terrain un cylindre appelé carotte, puis le remonte à la surface en évitant, dans la mesure du possible, de la modifier, ce qui permettra aux techniciens d'effectuer des mesures de porosité, de perméabilité, etc.

2.2/ Les forages destructifs : ces forages peuvent être exécutés par percussion, ou par rotation. Les échantillons recueillis sont appelés cuttings, ces forages destructifs sont rapides et relativement bon marché, mais l'examen des échantillons qu'ils fournissent ne procure qu'une information très limitée.

2.3/ Le fluide de forage : le fluide qui circule dans le forage et à l'intérieur des tiges et de l'outil peut être de différentes sortes :

- De l'eau douce ou salée
- De la mousse
- De la boue à l'huile
- De la bentonite

Les boues sont les fluides les plus utilisés dans les forages et il ont de multiples fonctions parmi les quelles :

- Remonter à la surface les fragments de roche.
- Equilibrer les pressions hydrostatiques.
- Lubrifier et refroidir les outils de forage.
- Consolider les parois du forage.

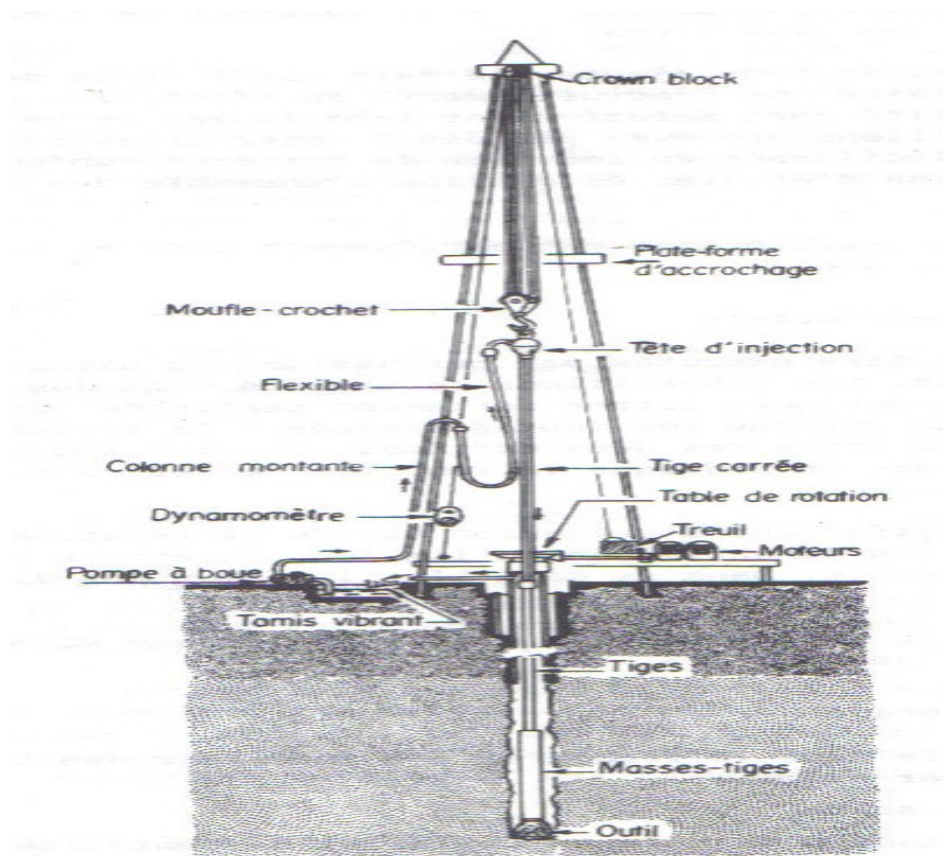


FIG : Disposition schématique d'un atelier de forage Rotary

3. Etude des paramètres physiques des réservoirs

Parmi les paramètres physiques mesurés par les divers outils de diagraphie, il en est un qui intervient à maintes reprises, il s'agit de la résistivité électrique des roches notée (R_t).

3.1/ La résistivité électrique des roches : la résistivité électrique R (qui s'exprime en ohm.m) en diagraphie est presque toujours de type électrolytique et elle dépend essentiellement :

- de la qualité de l'électrolyte, c'est-à-dire de la résistivité de l'eau d'imbibition R_w .

- de la quantité d'électrolyte contenue dans l'unité de volume de la roche.
- du mode de distribution de l'électrolyte.

3.1.1/ Le rôle de la qualité de l'électrolyte

● La salinité

Quand un sel se dissout dans l'eau, il se dissocie en ions chargés positivement et ions chargés négativement. Sous l'effet d'un champ électrique, les ions se déplacent, donnant naissance à un courant électrique. La conductivité (inverse de la résistivité) dépend de :

- de sa teneur en ions.
- de la mobilité des ions en solution.

On peut écrire : $C = \frac{1}{R} = f(c_1 v_1 + c_2 v_2 + \dots)$ avec C : conductibilité, R : résistivité,

c : concentration, v : mobilité de l'ion.

3.1.2/ La qualité et la quantité des sels dissous

La résistivité électrique d'une eau dépend de la quantité de sels dissous, mais aussi de la nature de ces sels. La quantité des sels en solution dans l'eau d'imbibition varie avec de nombreux facteurs parmi les quelles la salinité des eaux originelles et l'âge de la roche et son histoire et elle dépend aussi de la température, une augmentation de la température augmente la mobilité des ions ce qui a pour effet de faire diminuer la résistivité.

3.1.3/ Mode de distribution de l'électrolyte

La résistivité électrique d'une roche dépend essentiellement de sa teneur en eau et de la qualité de cette eau ainsi que de son mode de distribution.

Dans le cas d'une roche saturée en eau, Archie a établi une relation expérimentale liant la résistivité de la roche, la porosité, le mode de distribution et la résistivité de l'électrolyte.

$$R_{roche} = R_w \cdot a \cdot \Phi^{-m} \text{ avec } R_{roche} : \text{résistivité de la roche en ohm.m}$$

R_w : résistivité de l'eau d'imbibition en ohm.m

Φ : porosité en %

m : facteur de cimentation et varie généralement entre 1,3 et 2,2.

a : facteur lithologique qui varie entre 0.6 et 2.

On a l'habitude de regrouper sous le terme de F (facteur de formation) ce qui caractérise précisément la structure de la roche

$F = a \cdot \Phi^{-m}$ l'expression d'Archie pour une roche saturée devient alors : $R_{roche} = F \cdot R_w$

On admet généralement les relations suivantes pour les formations meubles et les grès :

$F = 0,62 \Phi^{-2,15}$, $F = 0,81 \Phi^{-2}$ (formule de Humble)

Pour les carbonates et les formations bien cimentées et bien consolidées on admet :

$$F = 1 \cdot \Phi^{-2}.$$

Voici quelque valeur du facteur de formation F :

$F = 4 \text{ à } 10 \rightarrow$ sable non consolidé.

$F = 10 \text{ à } 30 \rightarrow$ sable peu consolidé.

$F = 30 \text{ à } 2000 \rightarrow$ sable consolidé.

3.2/ Le phénomène de l'invasion

D'une manière générale, la présence du fluide de forage est génératrice de perturbations dans les formations. Dans le cas le plus général, les formations forées contiennent des fluides

(eau et pétrole) qu'il est important de maintenir en place afin d'éviter leur venue en surface. Pour cela, la boue de forage, en phase liquide, exerce une pression hydrostatique supérieure à la pression des formations et des fluides qu'elles contiennent.

Dans ces conditions, il se produit dans la formation une filtration de la phase liquide et des substances dissoutes : c'est le **filtrat**. Les particules dispersées, elles, s'accumulent sur la paroi du trou, formant le dépôt de boue encore appelé "**gâteau de boue**" ou "**mud-cake**". La composition, l'épaisseur et la perméabilité du mud cake dépendent surtout de la nature de la boue. L'épaisseur du mud cake varie en général entre 1/8" et 1" (3 mm à 2,54 cm). Ce mud cake a une perméabilité faible et c'est lui qui conditionne en partie la filtration, petit à petit la filtration va diminuer puis stopper.

Le filtrat, envahit la formation, perturbe la répartition des fluides en place, et ses caractéristiques physiques contribuent à modifier celles des formations.

- La boue de résistivité R_m remplit le trou de forage ;
- La filtration a laissé un mud cake de résistivité R_{mc} ;
- Le filtrat de boue, phase aqueuse de résistivité R_{mf} , a sur une certaine distance refoulée toute l'eau de formation créant la **zone lavée**. Cette zone a pour résistivité R_{xo} ; Puis la quantité de filtrat diminue jusqu'à ce que l'on retrouve dans la **zone vierge** la saturation complète des pores par l'eau de formation dont la résistivité R_w contribue à donner à la formation sa résistivité R_t ;

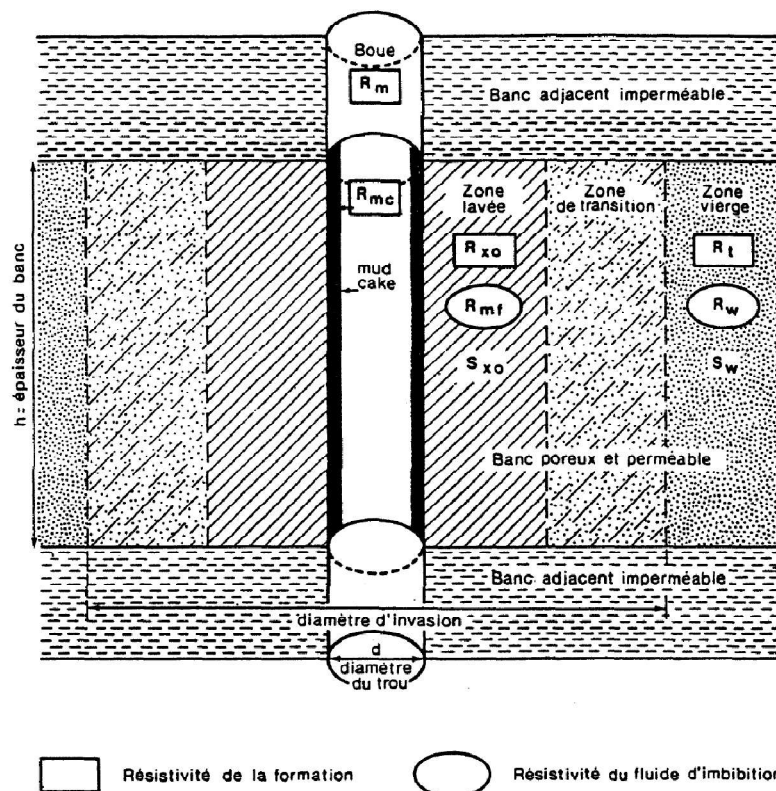


FIG: représentation schématique de l'invasion

Les résistivités électriques mesurées par différentes diagraphies dépendent pour une part des conditions géologiques naturelles et pour une part de l'action des fluides de forage. Les caractéristiques de la boue sont prise en compte dans la plus part des mesures.

Le log P.S

Introduction

Le log P.S. ou log de la polarisation spontanée, est l'enregistrement des différences de potentiel électrique dues à des causes naturelles. Ces différences sont mesurées entre une électrode de référence fixe, placée en surface, et une électrode mobile qui parcourt toute la longueur du forage.

Le log P.S. permet :

- De mettre en évidence les bancs poreux et perméables ;
- De localiser certains niveaux imperméables ;
- De calculer le pourcentage d'argile contenu dans la roche réservoir ;
- De calculer la résistivité de l'eau d'imbibition R_w , ce qui permet d'obtenir la salinité et donc la qualité chimique de cette eau.

1. Le paramètre enregistrée

1.1/ Origine de la P.S

Le liquide employé lors de l'exécution d'un forage (eau, boue, air, etc.) diffère presque toujours chimiquement de l'eau renfermée dans les formations traversées. C'est la mise en contact de ces fluides dissemblables qui provoque l'apparition de potentiels naturels.

1.2/ Le potentiel de membrane

Considérons une formation poreuse et perméable, contenant un électrolyte R_w , cette formation est limitée en haut comme en bas par des argiles jouant le rôle de membrane. Lorsque cet ensemble est traversé par le forage, l'électrolyte naturel est mis en présence du filtrat de résistivité R_{mf} . Généralement l'eau de la formation est plus saline que la boue de forage, de ce fait $R_{mf} > R_w$. Les argiles en présence de deux fluides de salinités différentes se comportent comme une membrane cationique, c'est à dire qu'elles laissent passer librement les cations Na^+ , mais sont imperméables aux anions Cl^- . L'ensemble constitue une pile de concentration dont le pôle positif correspond à la formation la moins saline, le filtrat dans cet exemple. Une telle pile donne naissance à une force électromotrice E_m , on appelle le potentiel ainsi créé potentiel de membrane, shale potentiel. Lorsqu'il s'agit de solutions de NaCl, ce potentiel est relié à la résistivité des solutions par la relation suivante :

$$E_m = -K_1 \log \frac{R_{mf}}{R_w} \text{ avec } K_1 = 59 \text{ pour des solutions de NaCl à } 25^\circ C.$$

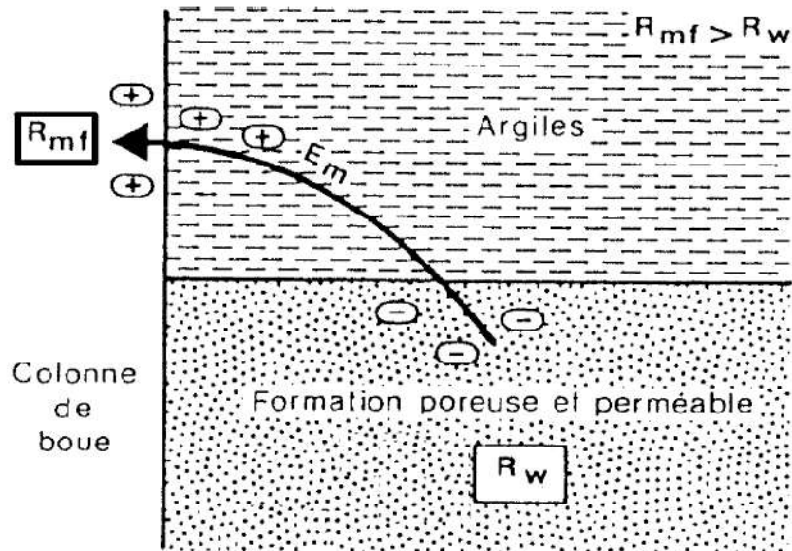


FIG : Potentiel de membrane

1.3/ Le potentiel de jonction liquide

Une autre force électromotrice naturelle apparaît dans les forages. Elle est associée au potentiel de jonction liquide qui prend naissance là où le filtrat et l'eau de formation sont en contact direct, c'est à dire à la limite de la zone envahie. En effet, lorsque deux solutions de salinités différentes sont en présence, on peut montrer qu'une force électromotrice de jonction liquide va apparaître entre ces deux solutions si la mobilité des anions et des cations n'est pas identique.

$$E_j = -K_2 \log \frac{R_{mf}}{R_w} \text{ avec } K_2 = 11,6 \text{ pour des solutions de NaCl à } 25^\circ\text{C.}$$

Dans le cas d'une solution de NaCl, la mobilité des anions est supérieure à celle des cations.

Il en résulte un flux de charges négatives vers la solution la moins concentrée (la boue en général) et la création d'une force électromotrice qui vient s'ajouter à celle associée aux membranes argileuses.

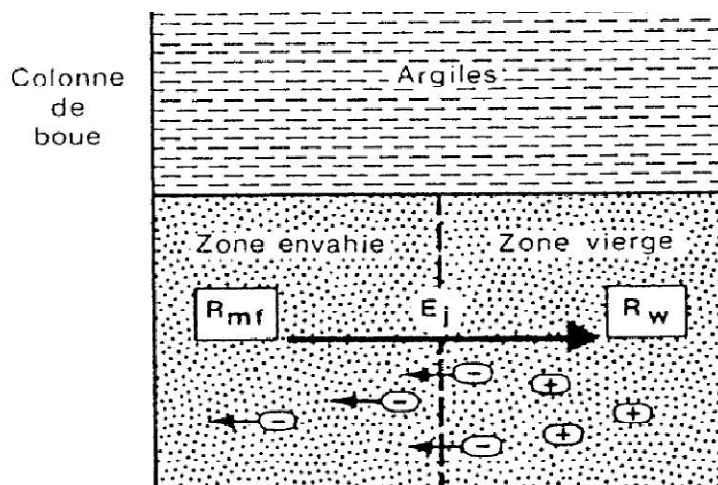


FIG : Potentiel de diffusion ou de jonction liquide

1.4/ remarque importante

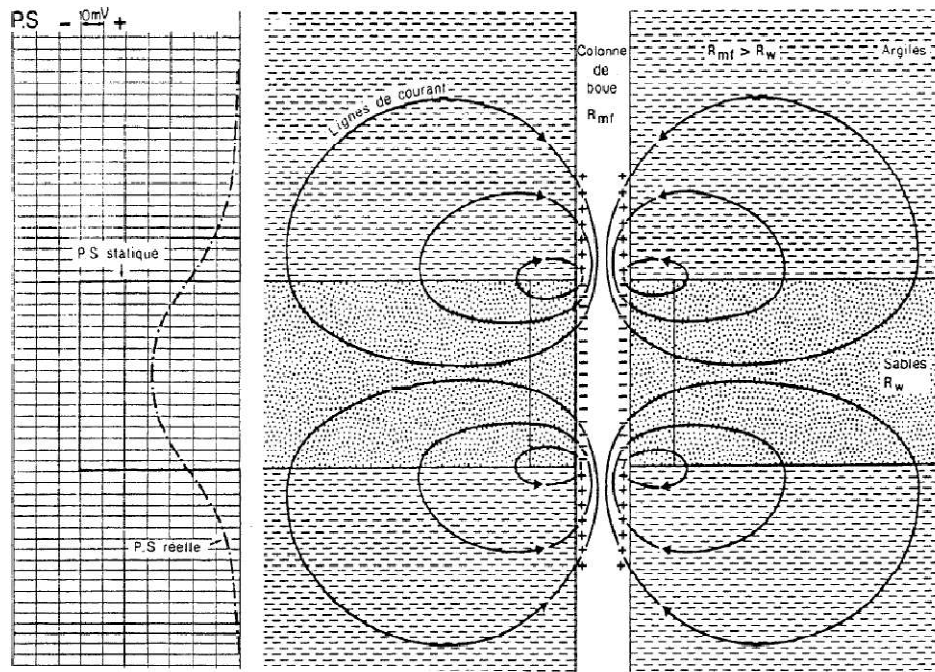


FIG : distribution schématique du courant P.S.

Le schéma au dessus montre un potentiel positif en face des formations argileuses et un potentiel négatif en face de la formation poreuse et perméable, le circuit se fermant par la boue. On suppose que la boue est moins saline que l'eau de formation et que par conséquent $R_{mf} > R_w$

La courbe en traits tirés correspond à l'enregistrement réel alors que la courbe en traits pleins représente le voltage théorique appelé P.S. Statique. En réalité le voltage enregistré est presque toujours inférieur à la P.S. Statique. Cette dernière peut être calculée de la façon suivante :

$$\text{Valeur de la déflexion } PS = -K \log \left[\frac{R_{mf}}{R_w} \right]$$

R_{mfe} = résistivité équivalente du filtrat, c'est à dire la résistivité qu'aurait le filtrat s'il n'y avait que du NaCl en solution.

R_{we} = résistivité équivalente de l'eau de formation.

K = constante qui tient compte de la température.

2. La mesure

2.1/ La mise en œuvre

Les circuits de mesure comprend 2 électrodes M et N, l'électrode N est mise à la surface du sol et l'électrode M se déplace le long du sondage.

A partir du moment de déplacement de cette dernière on enregistre des (d.d.p) ou différence de potentiel, variant en fonction de la profondeur. Ces (d.d.p) sont provoqué par la présence de champs électrique qui apparaît spontanément dans le sondage et son environnement, ce champ électrique est désigné par le nom de potentiel spontané.

(G) galvanomètre : instrument qui mesure l'intensité des courants électriques faible ou infini (μA) de façon à obtenir une mesure de potentiel.

3. Interprétation qualitative

La figure suivante représente un log P.S. enregistré dans une série de sables et d'argiles. On peut observer, c'est le cas le plus général, qu'en face des couches d'argiles les potentiels restent plus ou moins constants. L'enregistrement s'approche d'une droite. Celle-ci est appelée shale base line où ligne de base des argiles. En face des bancs poreux perméables, la courbe montre une forte déflexion vers la gauche.

Lorsque ces bancs sont assez épais, il est possible de tracer la ligne de base des sables, sand line. La limite des bancs est à l'inflexion de la courbe.

3.1/ Facteurs influençant la forme et l'amplitude des déflexions P.S

La forme et l'amplitude des déflexions P.S. peuvent être influencées par différents facteurs qui sont les suivants :

3.1.1/ Influence de la salinité des fluides en présence

La P.S. dépend essentiellement de la différence de salinité entre les fluides en présence, filtrat de boue et eau de formation. Divers cas peuvent se présenter ; parmi les quelles :

- Eau de formation est plus salée que le filtrat de boue $R_{mf} > R_w$. La P.S. est dite normale c'est le cas que nous avons envisagé jusqu'à présent. Le positif est alors en face des argiles et le négatif en face des formations propres. La déflexion est d'autant plus marquée que le contraste des salinités est important.

- Eau de formation est moins salée que le filtrat de boue $R_{mf} < R_w$. Dans on obtient une P.S. dite inverse, le positif est en face des sables et le négatif en face des argiles. Ce phénomène se produit assez souvent en prospection hydrologique.

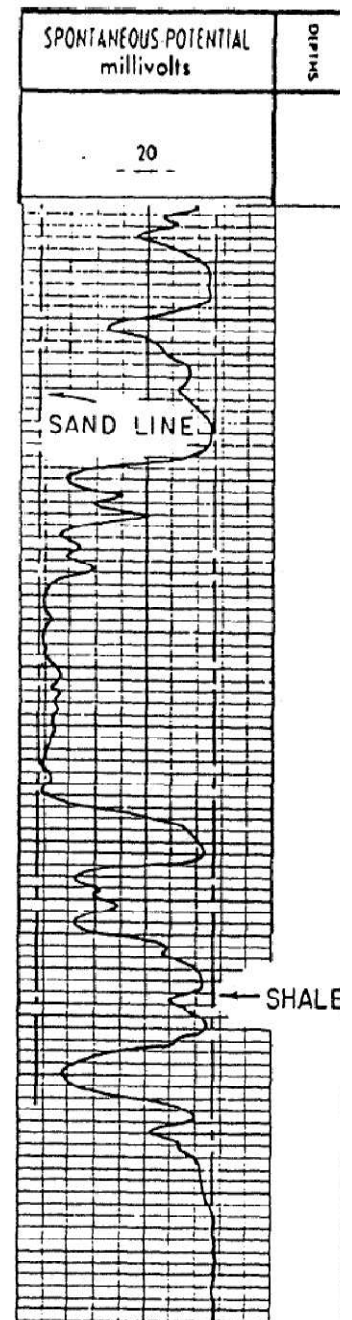
- Eau de formation a la même salinité que le filtrat $R_{mf} = R_w$. La P.S. est alors plate, l'enregistrement ne montre pas de différence entre les argiles et les bancs poreux et perméables.

3.1.2/ Influence de l'épaisseurs des bancs

Les limites correspondent aux points d'inflexion de la courbe P.S. Si le banc est épais la déflexion est maximum et montre une forme aplatie. Si le banc est mince la courbe dessine un pic, le potentiel statique n'est pas atteint. Dans ce cas pour connaître la valeur maximale de la P.S. il faut utiliser des abaques qui permettent de corriger en fonction de l'épaisseur du banc. Epaisseur que l'on détermine sur des autres diagraphies. Une augmentation du diamètre du forage diminue la déflexion P.S. De même, lorsque la zone lavée s'agrandit la déflexion P.S. décroît.

3.1.3/ Influence de la résistivité

Si les bancs perméables ont une résistivité élevée, les courants P.S. ont du mal à s'établir. Des abaques permettent de corriger cet effet.



3.1.4/ Influence de la présence d'argile

La présence d'argile dans un banc réservoir diminue l'amplitude de la déflexion P.S. L'atténuation est une fonction linéaire du pourcentage d'argile dispersée dans la roche. Cette propriété permet d'ailleurs de calculer le pourcentage d'argile présent dans un réservoir.

3.1.5/ Effet des formations compactes

Les niveaux argileux intercalés entre des bancs compacts se marquent par un changement de pente de la courbe P.S. La courbe P.S. demeure généralement rectiligne en face des formations compactes.

4. Interprétation quantitative

Le log P.S. s'il est bien développé peut servir à calculer la résistivité de l'eau de formation R_w .

En effet nous avons vu que la déflexion P.S est proportionnelle à la valeur de R_{mfe} et de R_{we} .

L'interprétation quantitative classique de la P.S. est basée sur les suppositions suivantes :

- L'eau de formation et la boue de forage sont toutes deux des solutions de NaCl.
- Dans la zone considérée les sables sont propres, c'est à dire dépourvus d'argile, et les formations argileuses sont de véritables bancs d'argile.

- La résistivité du filtrat est supérieure à la résistivité de l'eau d'imbibition $R_{mf} > R_w$.

Examinons les différentes étapes qui permettent d'obtenir la valeur de R_w .

4.1/ Détermination de R_w à partir de la P.S

1) Tracer la ligne de base des argiles. Cette ligne de base peut parfois présenter une légère dérive.

2) Repérer les zones poreuses et perméables. La valeurs de la déflexion P.S. étant influencée par l'épaisseur des bancs il faut si possible prendre dans l'intervalle intéressant un banc assez épais qui montre une anomalie P.S. maximum et constante.

3) Déterminer la température de la formation à la profondeur choisie.

4) Ramener R_{mf} à la température de la formation. Si cette nouvelle valeur de R_{mf} est inférieure à 0,1 Ohm.m on doit transformer en R_{mfe} à l'aide de l'abaque 4.

5) Lire la valeur de la déflexion P.S., nombre de millivolts depuis la ligne de base.

Il y a lieu dans certains cas d'apporter une correction pour l'épaisseur du banc. Cette correction se fait de la façon suivante :

Déterminer l'épaisseur du banc à partir des points d'inflexion. Vérifier sur d'autres logs.

Sur un log électrique lire la valeur de la résistivité pour la profondeur considérée.

Ramener R_m à la température de la formation.

- L'abaque 5 fournit alors le facteur de correction par lequel il faut multiplier la valeur de la déflexion lue sur le log.

- L'abaque 6 permet maintenant de trouver R_{we} .

Si cette valeur est supérieure à 0,1 on la garde comme valeur de R_w .

Si R_{we} est inférieur à 0,1 ohms.m il faut utiliser l'abaque 4 pour obtenir R_w .

Cette valeur R_w permet de calculer la salinité de l'eau d'imbibition. Rappelons qu'il s'agit d'une salinité équivalente en NaCl.

4.2/ Calcul du pourcentage d'argile

Nous avons vu que l'on peut dans certaines conditions tracer sur le log P.S. la ligne de base des argiles qui correspond à un volume de 100% d'argile. Il est aussi possible de tracer la ligne de base des sables qui représente alors 0% d'argile. Cette particularité permet d'estimer le volume d'argile en un point donné.

Le volume d'argile au point X se calcule de la façon suivante :

$$V_{sh} = \frac{P.S.S - P.S.}{P.S.S}$$

V_{sh} = volume d'argile en %

P.S.S. = valeur maximum de la déflection P.S. dans l'intervalle considéré, valeur jusqu'à la ligne de base des sables. P.S. lue au point X = valeur de la déflection P.S. à la profondeur choisie.

P.S = lue au pont X = valeur de la déflection P.S à la profondeur choisie.

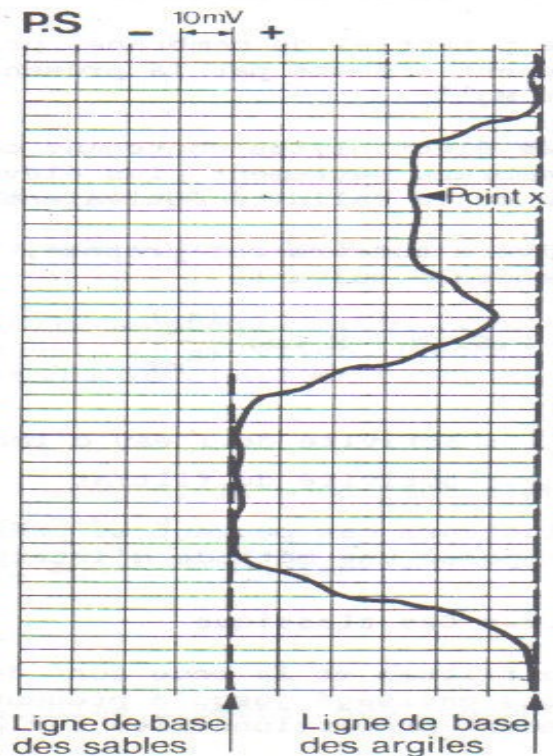


FIG : Calcul du pourcentage d'argile

5. Conclusion

Le potentiel spontané ou la polarisation spontanée est une technique utilisée par toutes les sociétés effectuant des diagraphies, avec des boues ordinaires ; le P.S. à partir de l'activité électrochimique permet de :

- Détecté des zones perméables
- Détecté des interfaces
- Détecté des corrélations de couches
- Déterminé la concentration de l'eau interstitielle des formations géologiques à partir de la résistivité de l'eau de formation
- Déterminé le pourcentage d'argile