

Introduction

Le pétrole, cette denrée plus que jamais importante de nos jours suscite toujours des moyens énormes en ce qui concerne sa recherche, son exploitation ainsi que sa production. Ces moyens sont aussi bien financiers que techniques surtout au niveau de la recherche (exploration pétrolière) qui nécessite des technologies de pointe pour pouvoir trouver un puits de pétrole.

La diagraphie est l'une de ces techniques permettant l'exploration pétrolière. D'une manière générale, elle représente tout enregistrement d'une caractéristique d'une formation géologique traversée par un sondage en fonction de la profondeur. Selon la caractéristique enregistrée ou/et le moment de l'enregistrement par rapport au forage on a plusieurs types de diagraphies ; on en distingue deux grands types : les diagraphies instantanées qui sont enregistrées au cours du forage et les diagraphies différées qui sont enregistrées après le forage. L'une d'entre ces diagraphies est la diagraphie à potentiel spontané.

Il s'agira donc dans ce travail, de d'abord définir la diagraphie à potentiel spontané et étayer dans la mesure du possible son principe de fonctionnement et son utilisation dans la recherche pétrolière pour enfin conclure.

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.



Figure 11 : Calcul du pourcentage d'argile : déflexion P.S. sable = 60 mV, déflexion
P.S. sable argileux = 25 mV. $V_{sh} = (60-25)/60 = 0.58$

1. Définition et principe de la diagraphie à potentiel spontané

La diagraphie P.S. ou diagraphie à potentiel spontané, enregistre 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. La diagraphie 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'inhibition R_w , ce qui permet d'obtenir la salinité et donc la qualité chimique de cette eau.

2. Etude du paramètre enregistré

2.1. Origine du potentiel spontané

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 (Fig. 1).

2.2. 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 :

$$E_m = -K_1 \log\left(\frac{R_{mf}}{R_w}\right)$$

$K_1 = 59 \text{ mV}$ pour des solutions de NaCl à 25°C .

2.3. 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.

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.

$$E_j = -K_2 \cdot \log\left(\frac{R_{mf}}{R_w}\right)$$

$K_2 = 11,6 \text{ mV}$ pour des solutions de NaCl à 25°C .

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.

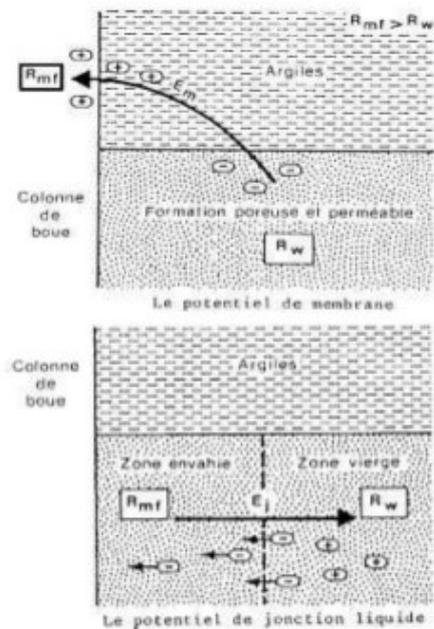


Figure 1 : Origine du potentiel spontané

2.4. Cas général

Finalement, on arrive au schéma suivant avec un potentiel positif en face des formations argileuses et un potentiel négatif en face de la formation poreuse et perméable (Fig. 2), 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 potentiel spontané statique (P.S.S.).

En réalité le voltage enregistré est presque toujours inférieur au P.S.S. Cette dernière peut être calculée de la façon suivante :

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.

$$\text{Valeur de la déflexion P.S [mV]} = -K \cdot \log\left(\frac{R_{mfe}}{R_{we}}\right)$$

- 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.

$$K = 0,133 \cdot T(^{\circ}F) + 61$$

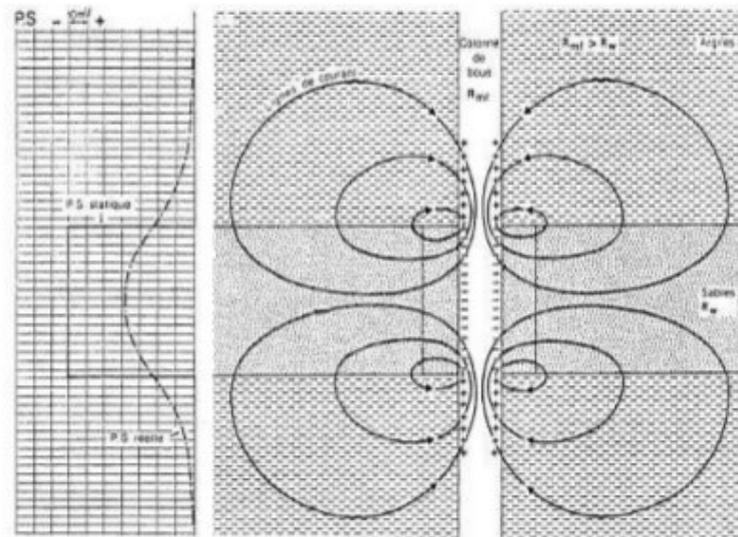


Figure 2 : Distribution schématique des courants de P.S.

3. La mesure

3.1. La mise en œuvre

On mesure à l'aide d'un voltmètre la différence de potentiel entre deux électrodes, l'une mobile dans le trou et l'autre fixe en surface (Fig. 3).

Le zéro est arbitraire, il s'agit de valeurs relatives.

L'échelle est donnée en millivolts par division, par convention, le positif est toujours à droite et le négatif à gauche.

Ladiagraphie P.S. ne peut être enregistrée que dans les forages contenant un liquide conducteur en contact avec les parois du trou.

3.2. Facteurs parasites

Divers facteurs parasites peuvent affecter les mesures, ce sont :

- la nature des électrodes,
- les courants parasites (Fig. 4 et 5),
- la dérive de la référence (Fig. 6).

4. Interprétation qualitative

La figure suivante représente une diagraphie P.S. enregistrée 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 baseline ou ligne de base des argiles (Fig. 7).

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.

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.

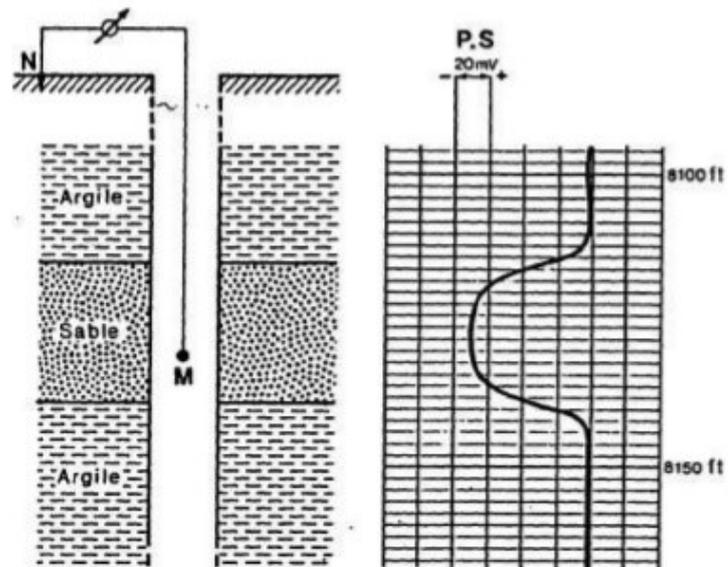
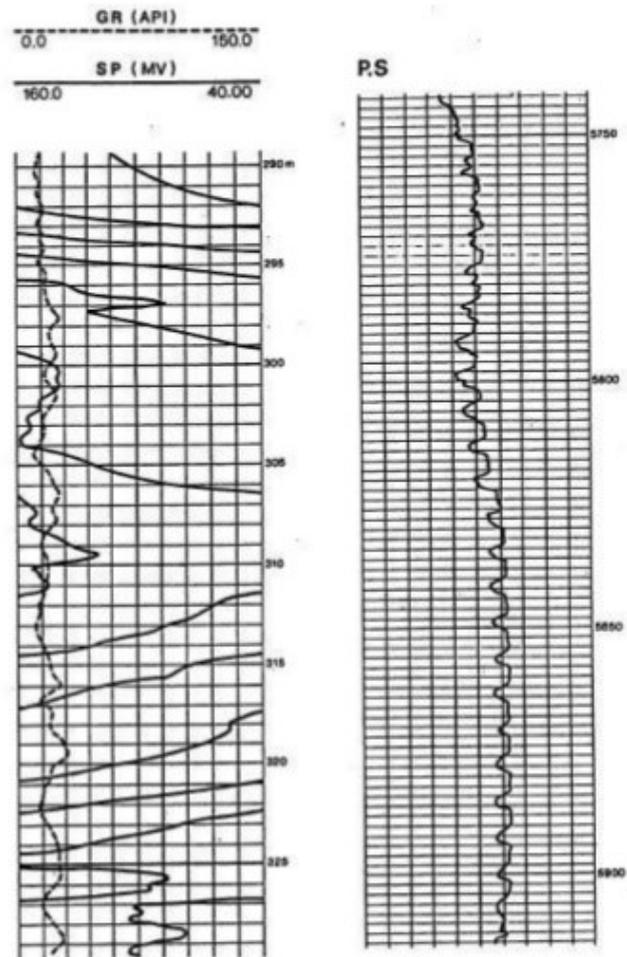


Figure 3 : Schéma de principe de mesure du P.S.

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.



Figures 4 et 5 : Effet des courants parasites et effet du magnétisme sur le câble.

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.

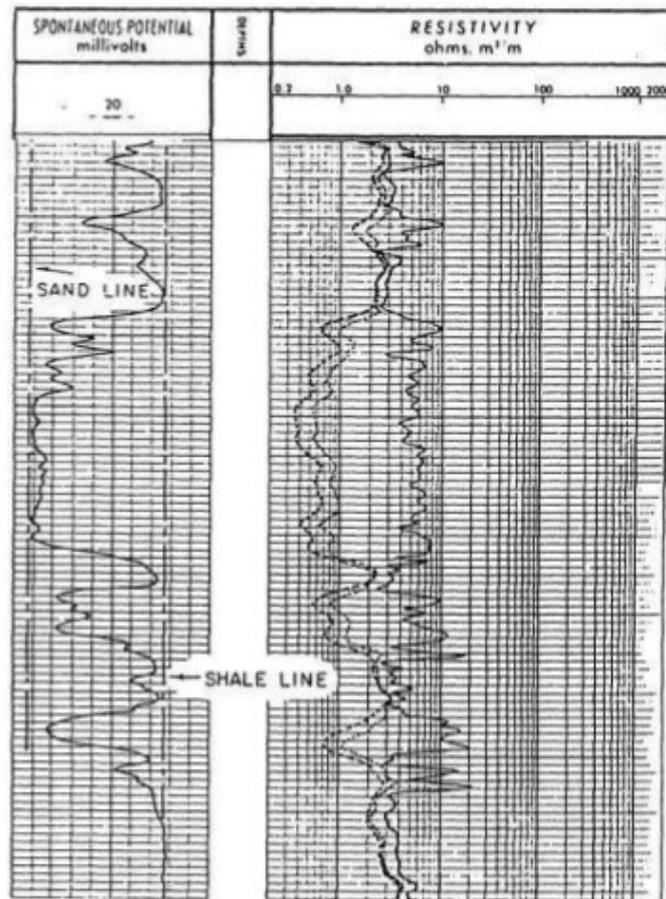


Figure 7 : Exemple de P.S. dans une série de sables argileux.

4.1. 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 :

- Influence de la salinité des fluides en présence (Fig. 8)

Le 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 :

- Eau de formation plus salée que le filtrat de boue $R_{mf} > R_w$.

Le P.S. est dit normal 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 moins salée que le filtrat de boue $R_{mf} < R_w$.

Dans ce cas 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 de 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.

- Influence de l'épaisseur des bancs (Fig. 9)

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.

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.

- Influence de la résistivité (Fig. 9)

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.

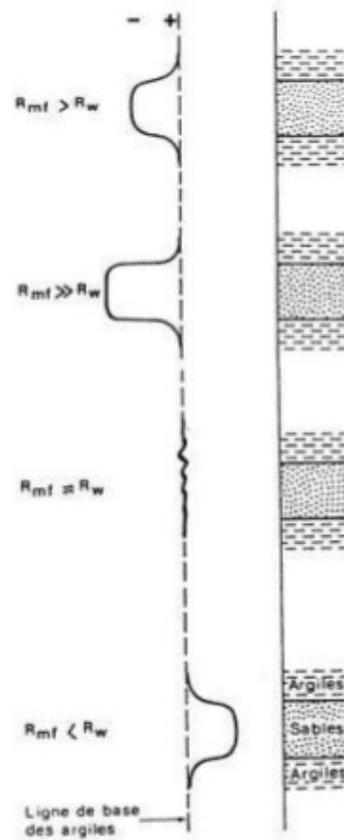


Figure 8 : Influence de la salinité.

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.

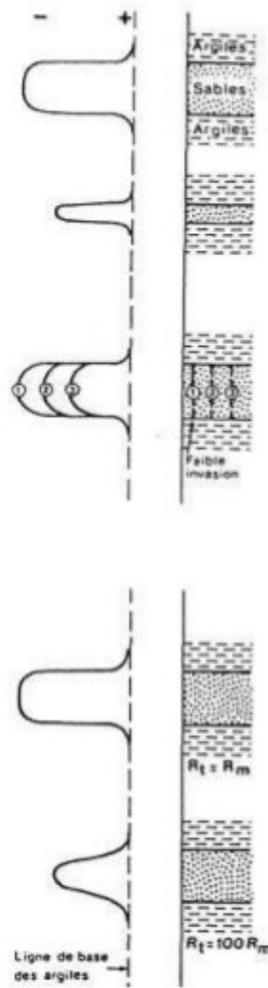


Figure 9 : Influence de l'épaisseur de banc et de la résistivité.

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.

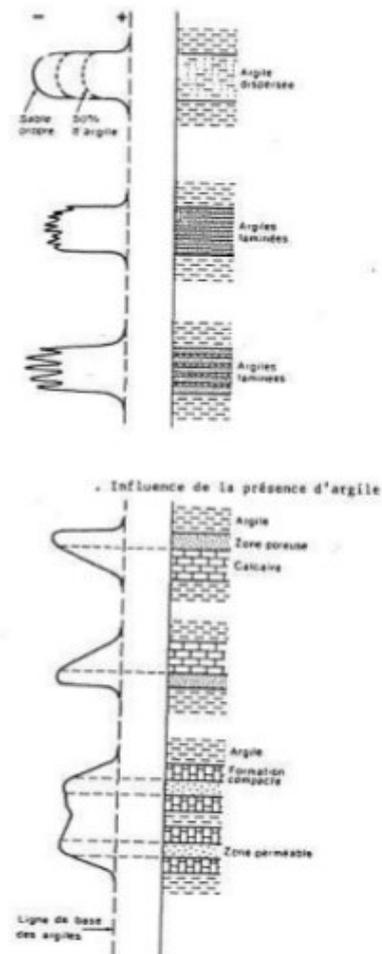


Figure 10 : Influence de la présence d'argile et effet des formations compactes.

- Influence de la présence d'argile (Fig. 10)

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.

- Effet des formations compactes (Fig. 10)

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.

- Dérive de la ligne de base (Fig. 6)

La dérive de la ligne de base est souvent provoquée par des modifications de l'électrode de référence. Un manque d'homogénéité de la boue peut provoquer des effets similaires. Parfois le changement de la ligne de base peut être imputé à des variations géologiques, soit une variation de la salinité de l'électrolyte saturant les roches, soit un changement des propriétés des argiles (Fig. 12).

- Effet de la perméabilité

Les courants ne peuvent se développer qu'en présence de bancs poreux et perméables cependant l'amplitude de la déflexion P.S. n'est pas une fonction simple de la perméabilité ou de la porosité.

5. Interprétation quantitative

Ladiagraphie P.S. s'elle est bien développée peut servir à calculer la résistivité de l'eau de formation R_w .

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 $R_{mf} > R_w$.

5.1. Détermination de R_w à partir du P.S.

- I) Tracer la ligne de base des argiles. Cette ligne de base peut parfois présenter une légère dérive.
- II) Repérer les zones poreuses et perméables. La valeur 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.
- III) Déterminer la température de la formation à la profondeur choisie.
- IV) Ramener R_{mf} à la température de la formation. Si cette nouvelle valeur de R_{mfe} est inférieure à 0.1 Ohm.m on doit transformer en R_{mf} à l'aide de l'abaque 5.
- V) 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 diagraphies.
 - Sur une diagraphie électrique lire la valeur de la résistivité pour la profondeur considérée.
 - Ramener R_m à la température de la formation.

L'abaque 6 fournit alors le facteur de correction par lequel il faut multiplier la valeur de la déflexion lue sur la diagraphie.

- VI) L'abaque 7 permet maintenant retrouver R_{we} .
 - Si cette valeur est supérieure à 0.1 Ohm.m on la garde comme valeur de R_w .
 - Si R_{we} est inférieure à 0.1 Ohm.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.

5.2. Calcul du pourcentage d'argile

Nous avons vu que l'on peut dans certaines conditions tracer sur la diagraphie 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 (Fig. 11).

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

$$V_{sh} = \frac{P.S.S. - P.S. \text{ au point } X}{P.S.S.}$$

V_{sh} = volume d'argile en %

P.S.S. = valeur maximum de la déflexion P.S. dans l'intervalle considéré, valeur qui correspond à la ligne de base des sables.

P.S. au point X = valeur de la déflexion P.S. à la profondeur choisie.

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.

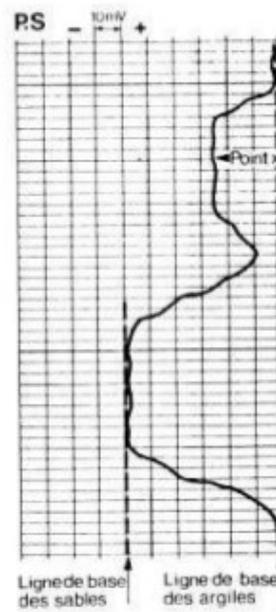


Figure 11 : Calcul du pourcentage d'argile : déflexion P.S. sable = 60 mV, déflexion
P.S. sable argileux = 25 mV. $V_{sh} = (60-25)/60 = 0.58$

DIAGRAPHIE PS

Diagraphie à potentiel spontané

ADJENIYA H. Achille, KONE Kouwelton P. F. O., TUO D. Yannick A.

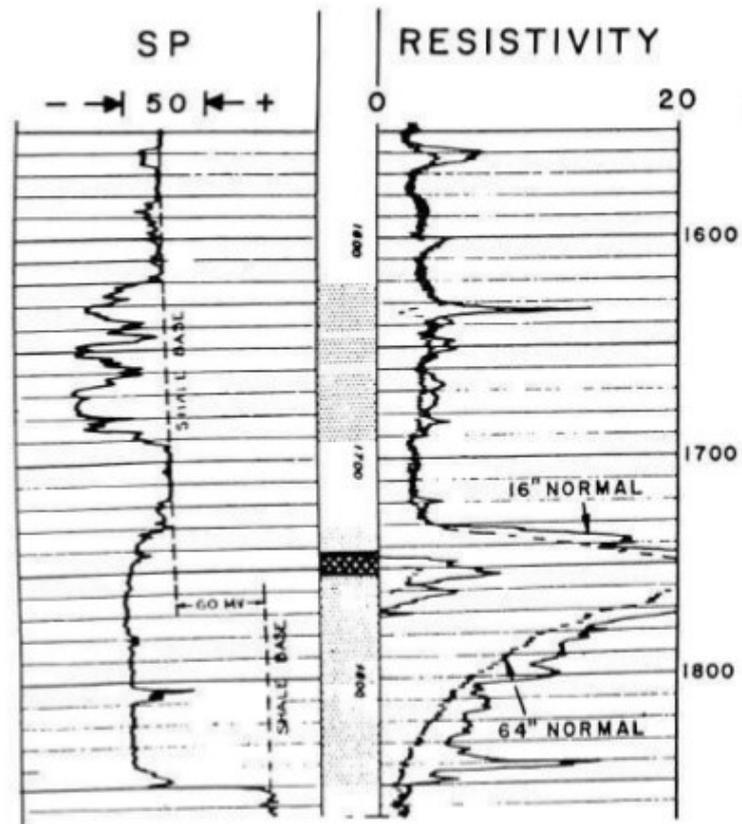


Figure 12 : Changement de la ligne de base des argiles (d'après Guyod)

Conclusion

En résumé, on peut dire la diagraphie et en particulier la diagraphie à potentiel spontané est un outil très important dans la recherche pétrolière, permettent de mieux connaître la nature de la roche forée, d'avoir de plus amples information sur le piège. La diagraphie utilise des méthodes qui sont en rapport avec les caractéristiques de la roche étudiée, ce qui fait de cette méthode, une technique fiable. Son amélioration donc en ce qui concerne sa pratique est importante pour améliorer les résultats qu'elle nous fournit.

Bibliographie

- ❖ Professeur D. Chapellier, « Diagraphie acquifère », France, cours online de géophysique, Université de Lausanne-Institut Français de Pétrole, pp 36-60.
- ❖ Professeur D. Chapellier, « Diagraphie pétrole », France, cours online de géophysique, Université de Lausanne-Institut Français de Pétrole, pp 24-42.