

Cours de géophysique pour les étudiants de Master 1 (Hydrogéologie)

Matière : Diagraphie

Réalisé par : Dr. KHEDIDJA Abdelhamid

Chapitre I : Notions de base

1. Définition :

On désigne par diagraphie (du grec dia, « à travers », et graphein, « dessiner ») ou, plus couramment, par le terme américain log (qui signifie bûche, rouleau...) tout enregistrement continu des variations, en fonction de la profondeur, d'une caractéristique donnée des formations traversées par un sondage.

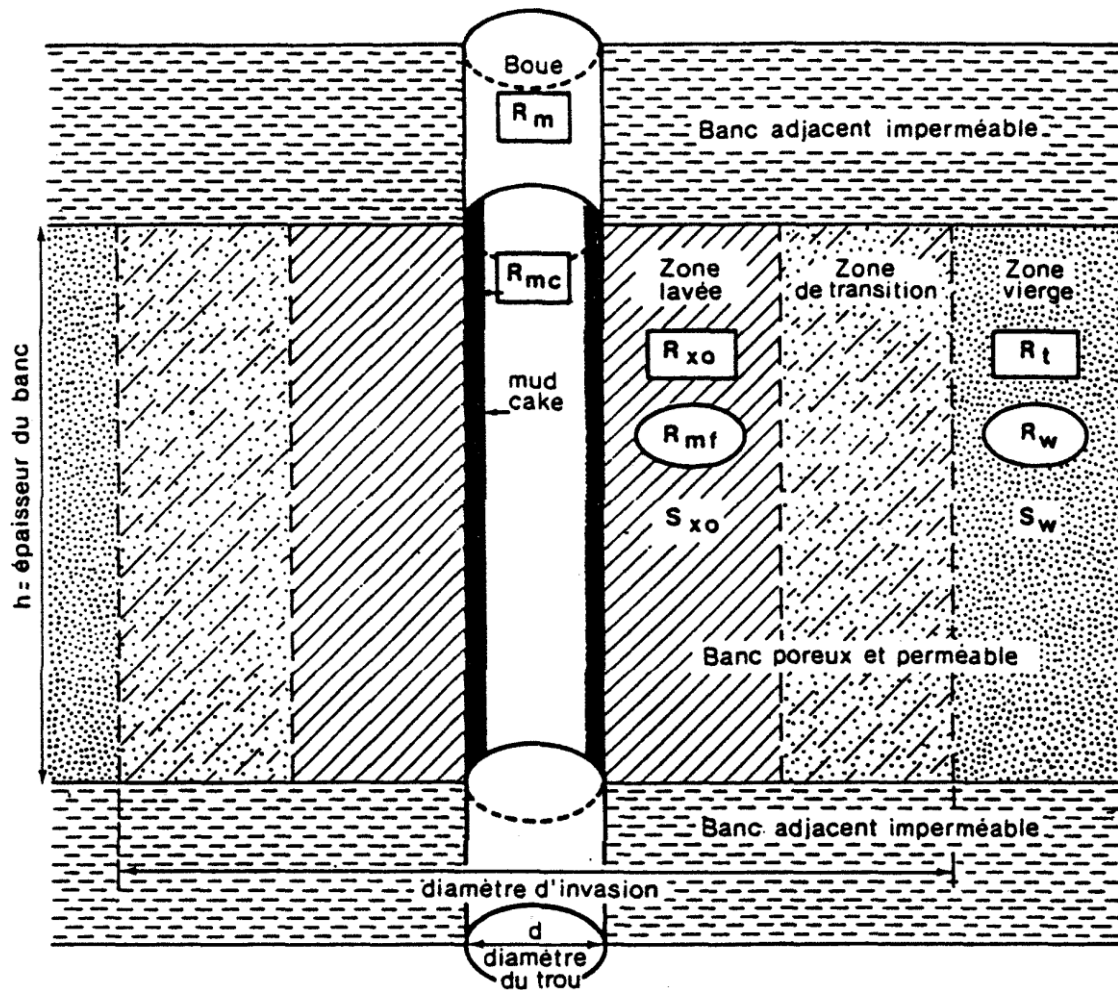
Les diagraphies sont enregistrées lors d'un arrêt ou en fin de forage, et les paramètres mesurés ne sont accessibles qu'avec un certain retard sur l'exécution du forage d'où le nom de diagraphies différées.

2. Représentation schématique 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

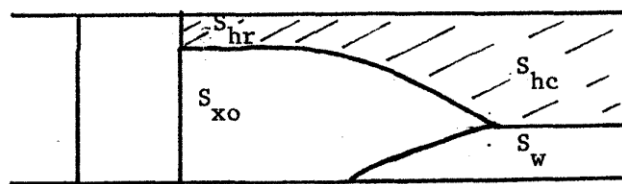
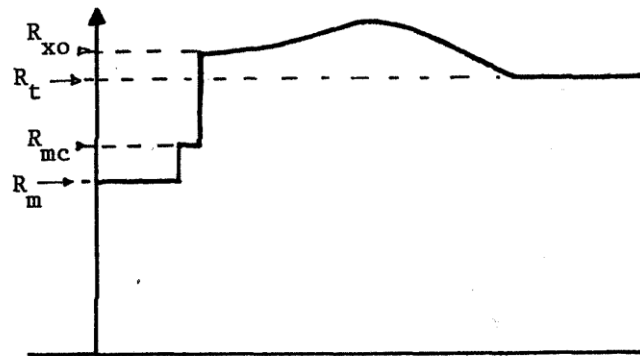
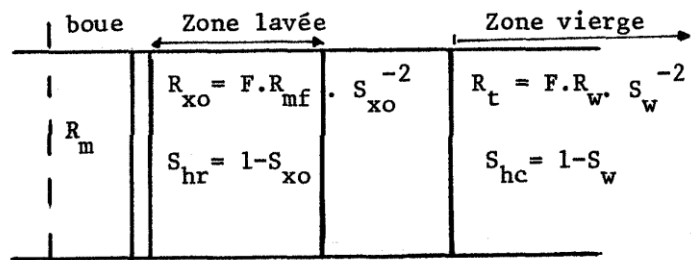
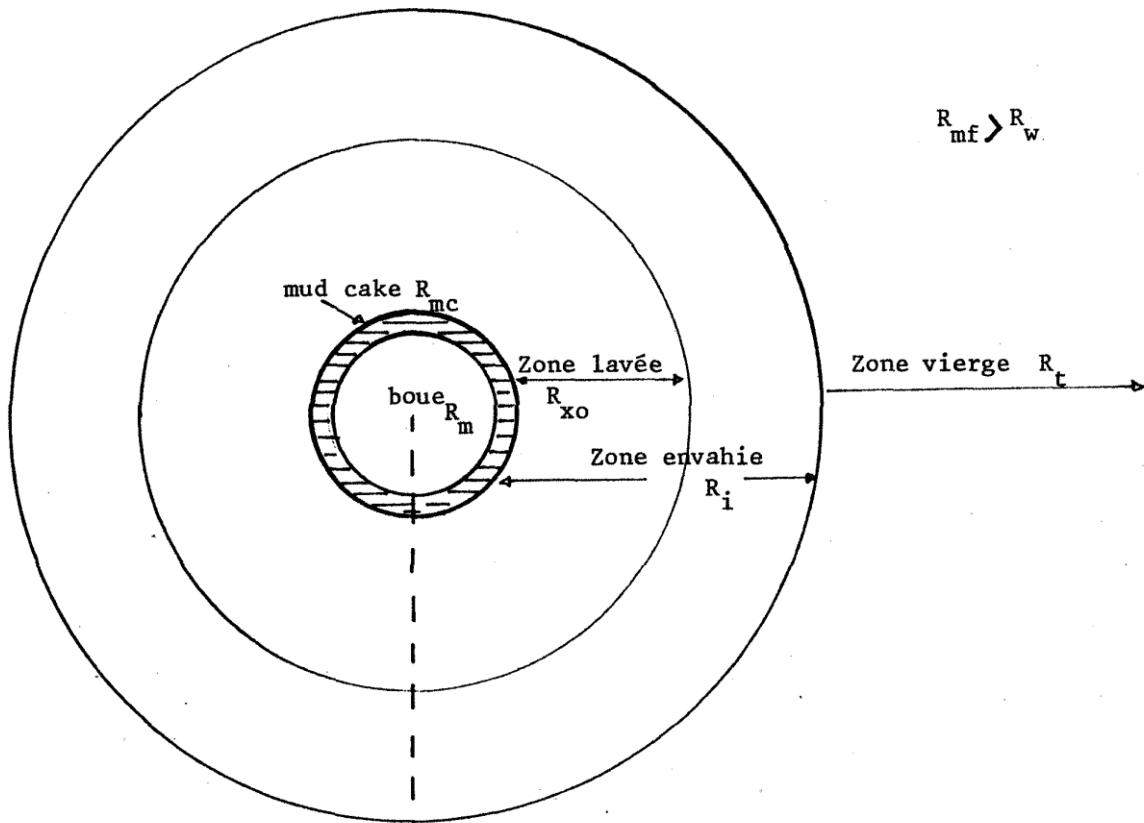
physiques contribuent à modifier celles des formations. La figure ci-dessous (Voir Fig.1) montre la représentation schématique de l'invasion d'une formation par le filtrat de boue :

- 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 ;
- La zone s'étendant de la paroi du trou jusqu'à la limite atteinte par le filtrat est la zone envahie de résistivité R_i , son extension est symbolisée par son diamètre d_i . Lorsque la formation contient des hydrocarbures et de l'eau l'invasion prend une allure un peu différente. En raison des phénomènes capillaires, le filtrat de boue n'est pas en mesure de repousser la quantité totale d'hydrocarbures présente dans la formation. Dans la zone lavée, l'eau de formation et une partie seulement des hydrocarbures seront remplacée par le filtrat. Puis, jusqu'à la limite de la zone envahie (Voir Fig2), la quantité de filtrat diminue, l'eau et les hydrocarbures revenant progressivement à la saturation primitive que l'on retrouve dans la zone vierge, dont la résistivité est R_t . La profondeur d'invasion est très variable, elle dépend de l'eau libre de la boue, de la différence de pression entre la colonne de boue et la formation, de la porosité etc.



Résistivité de la formation
 Résistivité du fluide d'imbibition

Figure1: Représentation schématique de l'invasion.



FORMATION CONTENANT DE L'EAU ET DES HYDROCARBURES

Figure2: Représentation schématique de la zone envahie

Liste des termes utilisés en diagraphies

BHT	Température du fond du trou en °C ou °F
Tf	Température de la formation en °C ou °F
TD	Profondeur totale en mètres ou pieds
d	Diamètre du trou en inches ou cm
Di	Diamètre moyen de la zone envahie en inches ou cm
Rm	Résistivité de la boue en ohms.m
Rmc	Résistivité du mud-cake en ohms.m
Rmf	Résistivité du filtrat en ohms.m
Rw	Résistivité de l'eau d'imbibition en ohms.m
Rt	Résistivité vraie de la formation vierge en ohms.m
Ro	Résistivité vraie d'une formation saturée en eau en ohms.m
Rxo	Résistivité de la zone lavée en ohms.m
F	Facteur de formation sans unité
ϕ	Porosité effective en %
Sw	Saturation en eau dans la zone vierge en %
Sxo	Saturation en filtrat dans la zone lavée en %
Shr	Saturation en hydrocarbures résiduels en %
Shc	Saturation en hydrocarbures en %
ΔT	Temps de transit en microsec/pied
ρ_b	densité de la formation en g/cm ³
ρ_{ma}	densité de la matrice en g/cm ³
ρ_f	densité du fluide en g/cm ³
cps	coups par seconde
cpm	coups par minute

3. Loi d'Archi :

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

$$R_t = R_w \cdot a \cdot \phi^{-m}$$

R_t = résistivité de la roche en ohms.m ;

R_w = résistivité de l'eau d'imbibition en ohms.m ;

Avec :

ϕ = porosité (0 - 1) ;

m = facteur de cimentation, varie généralement entre 1,3 et 2,2 ;

a = facteur qui dépend de la lithologie et varie entre 0,6 et 2.

$$F = a \cdot \phi^{-m}, F : \text{Facteur de formation}$$

-Pour une roche saturée en eau $R_t = F \cdot R_w$

La loi Archie s'applique aux formations propres

-F est déterminé aussi par abaque

- La résistivité des roches dans la zone lavée

Dans la zone lavée la loi d'Archie s'écrit : $R_{xo} = F \cdot R_{mf}$.

R_{xo} = résistivité de la roche dans la zone lavée ;

R_{mf} = résistivité du filtrat qui remplit les pores de la roche ;

F = facteur de formation.

- La résistivité des roches dans la zone vierge

Dans la zone vierge la loi d'Archie s'écrit : $R_t = F \cdot R_w$.

R_t = résistivité des roches dans la zone vierge ;

R_w = résistivité de l'eau d'imbibition ;

F = facteur de formation.

- La saturation

Lorsqu'une partie des pores de la roche est remplie par des hydrocarbures, gaz ou huile de résistivité infinie ou air, cela va modifier la résistivité. Archie a établi une formule très largement utilisée :

$$S_w = \sqrt[n]{R_0/R_t}$$

Résistivité de la roche dans la zone saturée en eau R_t

R_0 : résistivité de la roche dans la zone sous-saturée

En général $n = 2$ pour la plupart des roches meubles, on obtient alors pour la zone vierge :

$$R_t = R_w \cdot a \cdot \phi^{-m} \cdot S_w^{-n}$$

pour la zone lavée :

$$R_{xo} = R_{mf} \cdot a \cdot \phi^{-m} \cdot S_{xo}^{-n}$$

Avec S_{xo} : saturation en filtrat et S_w : saturation en eau.

On définit aussi

S_{hc} : saturation en hydrocarbures dans la zone vierge

S_{hr} : saturation en hydrocarbures résiduels dans la zone lavée.

Dont : $S_{xo} + S_{hr} = 1$ dans la zone lavée et $S_w + S_{hc} = 1$ dans la zone vierge.

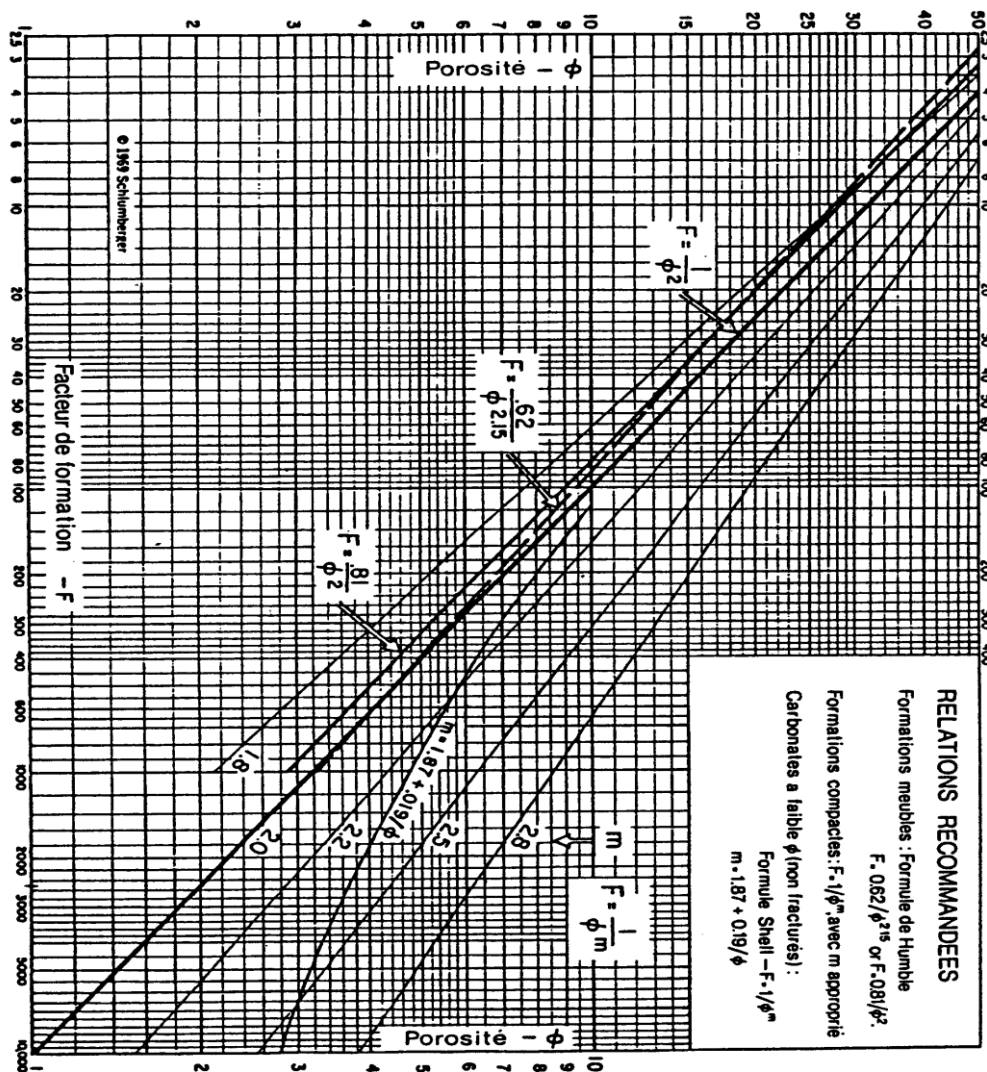
Remarque

- En général, plus la porosité est grande, plus la profondeur d'invasion est faible. C'est en effet le mud-cake qui règle la quantité d'eau qui peut pénétrer. Si l'on exprime(di) en fonction du diamètre (d) du sondage, on peut dire que pour les boues habituelles $di < 2d$ pour les sables très poreux.

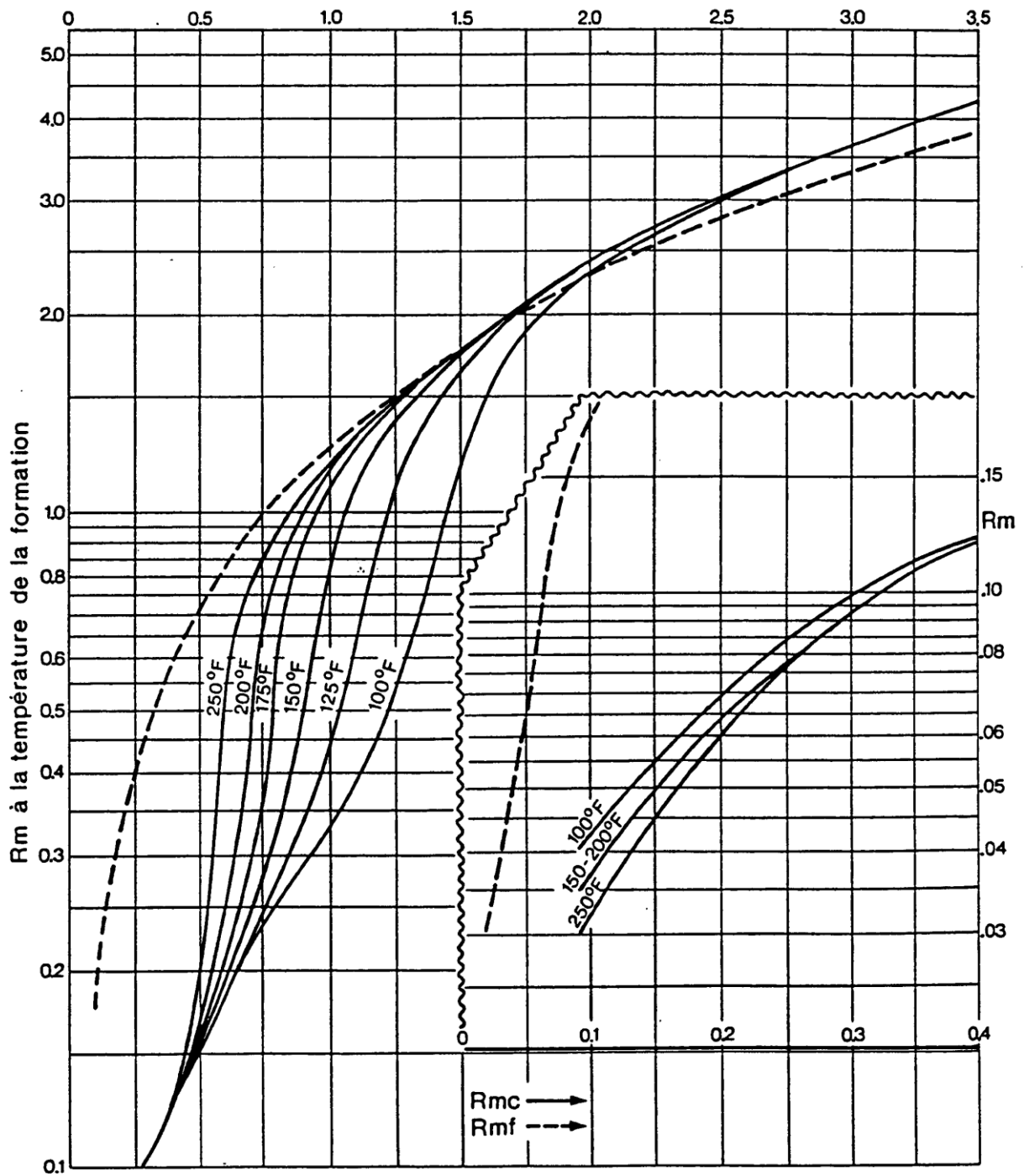
Un abaque permet lorsque on connaît la résistivité de la boue en peut déduire la résistivité du mud cake et celle du filtrat , où appliquer la relation approximative suivante:

$$R_{mc} = 1,5 \cdot R_m \text{ et } R_{mf} = 0,75 \cdot R_m.$$

- Lors des interprétations quantitatives, il ne faut pas oublier de ramener les diverses résistivités R_m , R_{mf} , R_{mc} , R_t , etc. à la température de la formation considérée.



Abaque : Facteur de formation ($m=1.87+0.019/\phi$ et non pas $m=1.87+0.19/\phi$).



Abaque : Détermination de R_{mf} et R_{mc} .

Chapitre 2. LOG PS

1. Introduction

Le log P.S. ou log de polarisation spontanée (P.S. en anglais), 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.

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.

2. 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 (Fig.1).

2.1. 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 :

$$E_m = -k_1 \log (R_{mf}/R_w)$$

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

2.2. 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.

$$E_j = -k_2 \text{Log} (R_{mf}/R_w)$$

$K_2 = 11.6 \text{ mV}$ pour des solutions de NaCl à 25°C .

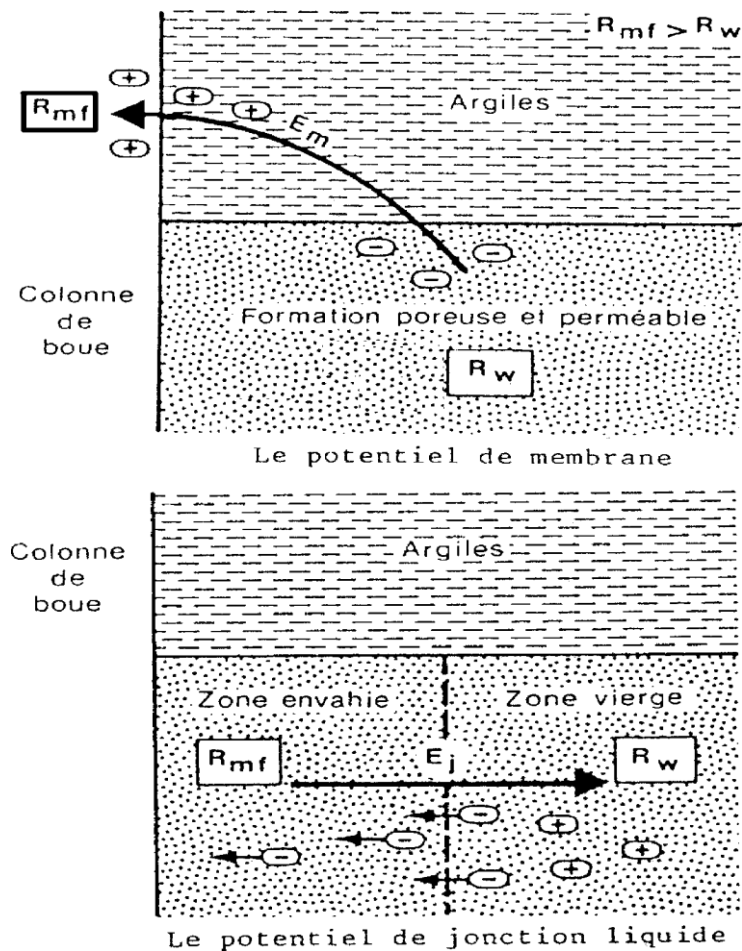


Fig 1 . Origine de la polarisation spontanée.

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 P.S. statique (P.S.S.). (Fig. 2)

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

$$\text{Valeur de la déflexion P.S. [mV]} = -k \cdot \text{Log} (R_{mf} / R_w)$$

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

K = constante qui tient compte de la température

$$K = 0.133 \cdot T(^{\circ}\text{F}) + 61$$

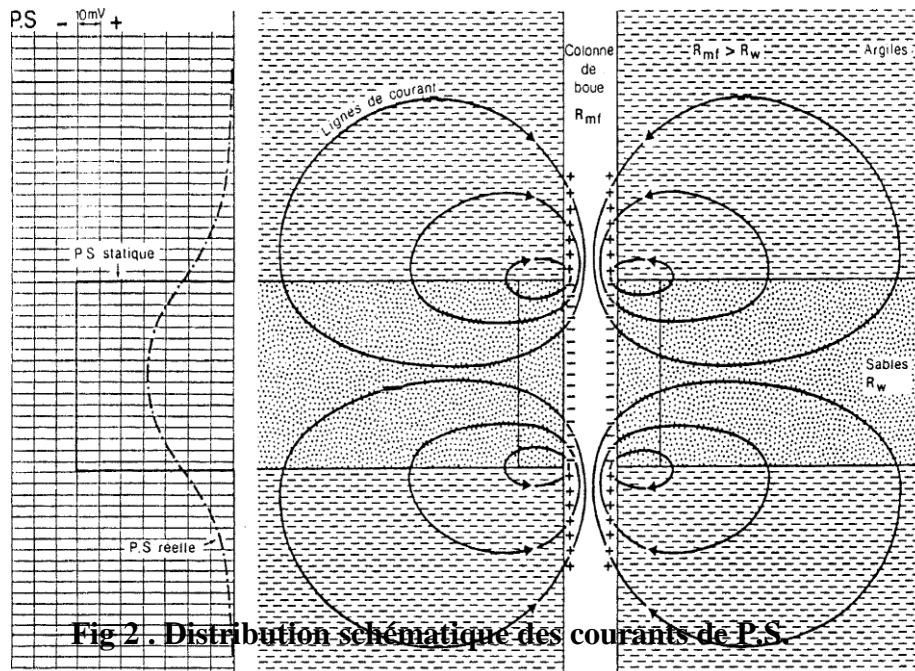


Fig 2. Distribution schématique des courants de P.S.

3. Principe de mesure :

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.

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

4. Interprétation de la PS

4.1. 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 ou ligne de base des argiles (Fig. 3.).

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.

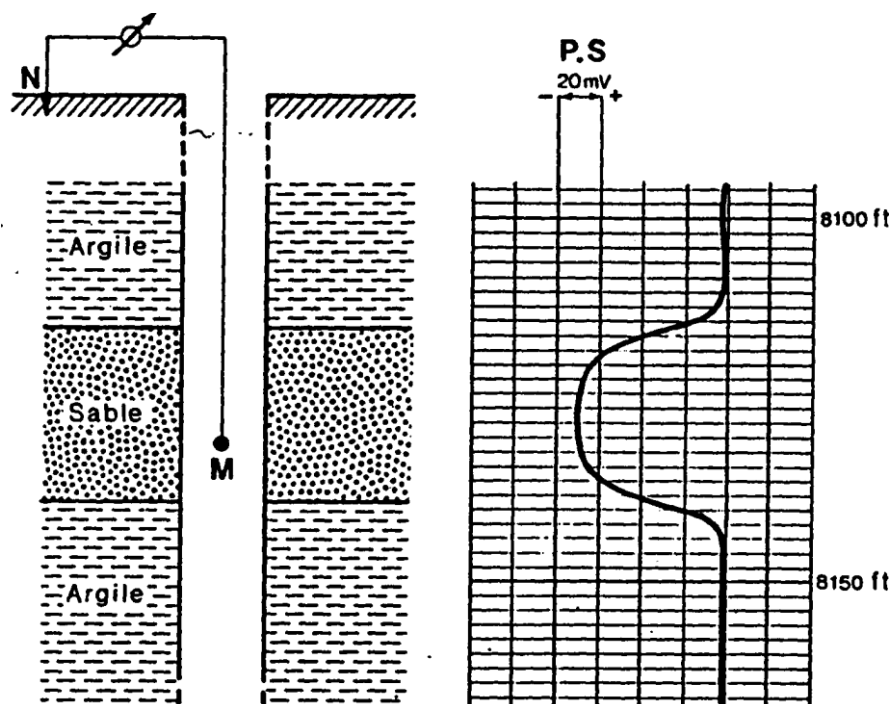


Fig 3 . Schéma de principe de mesure de la P.S.

Remarque

Divers facteurs parasites peuvent affecter les mesures , ce sont :

- la nature des électrodes,
- les courants parasites .
- la dérive de la référence .

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

La P.S. dépend essentiellement de la différence de salinité entre les fluides en présence,

filtrat de boue et eau de formation. (Fig. 4)

Divers cas peuvent se présenter :

- Eau de formation 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 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.

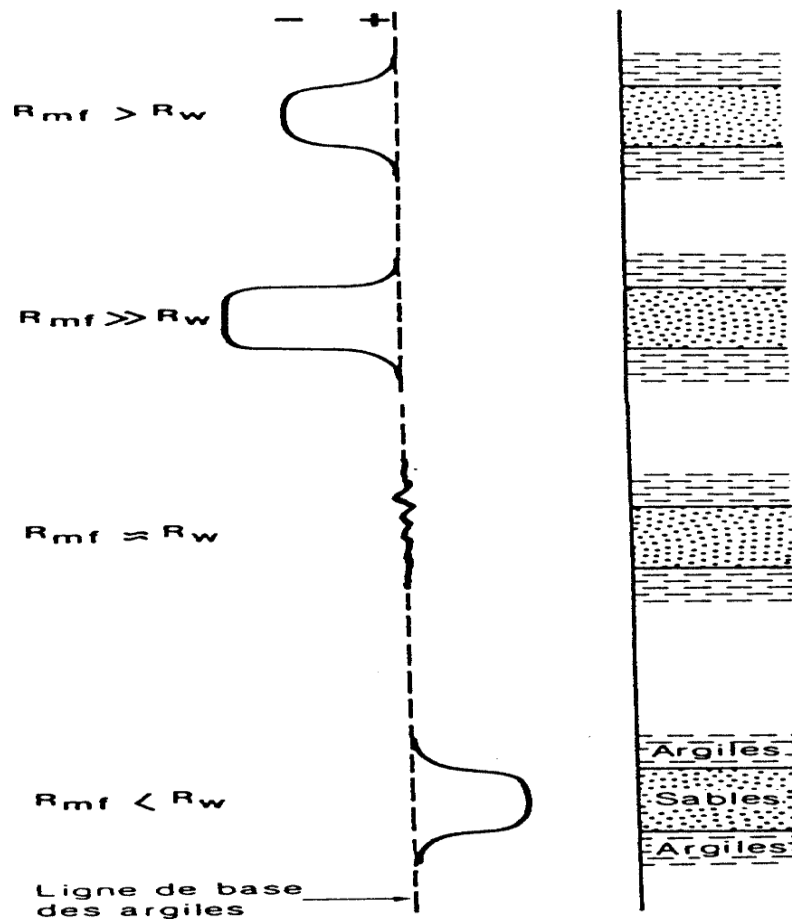


Fig 4. Influence de la salinité.

-Influence de l'épaisseur 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.

(Fig. 5). De même, lorsque la zone lavée s'agrandit la déflexion P.S. décroît

-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. (Fig. 5).

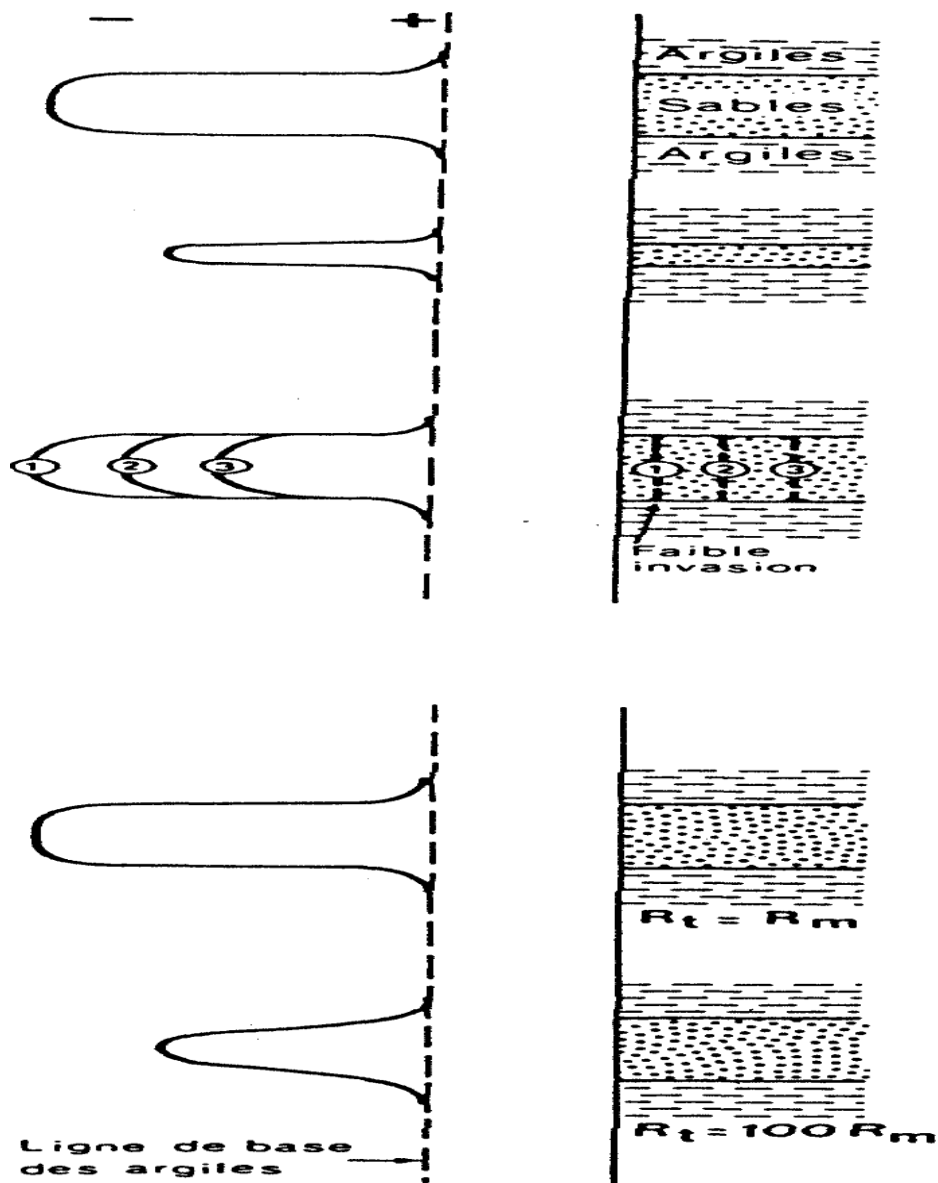


Fig 5 . Influence de l'épaisseur de banc et de la résistivité.

-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. (Fig. 6).

-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. (Fig. 6).

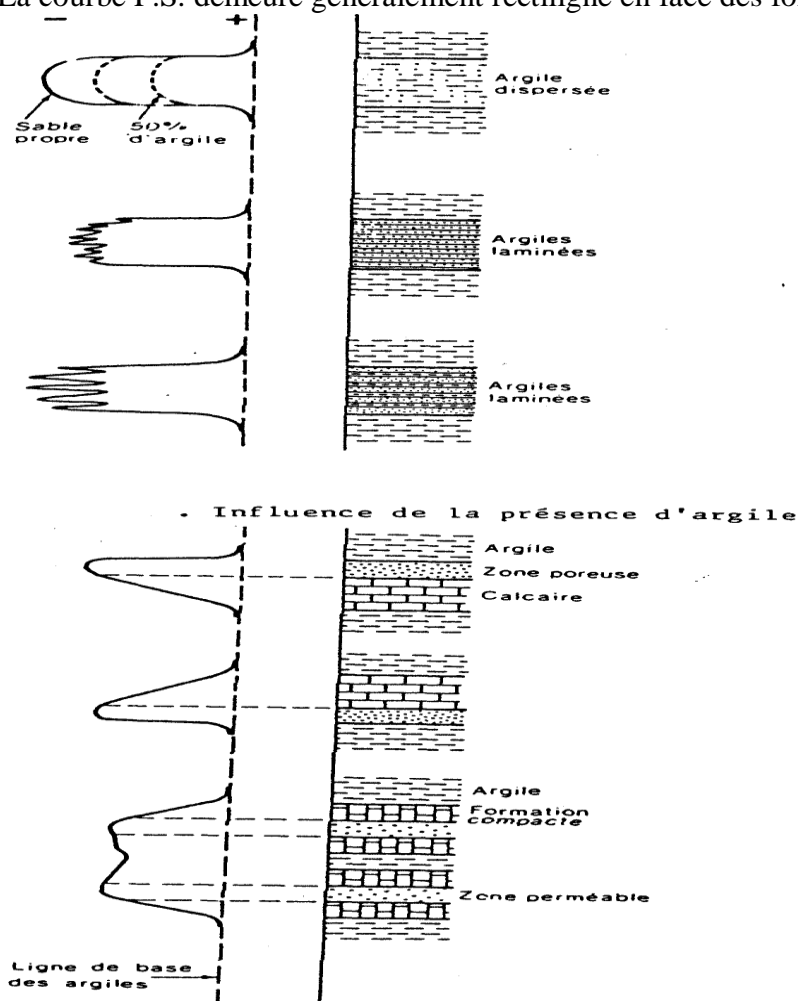


Figure 6 . Influence de la présence d'argile et effet des formations compactes.

-Dérive de la ligne de base

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. 7).

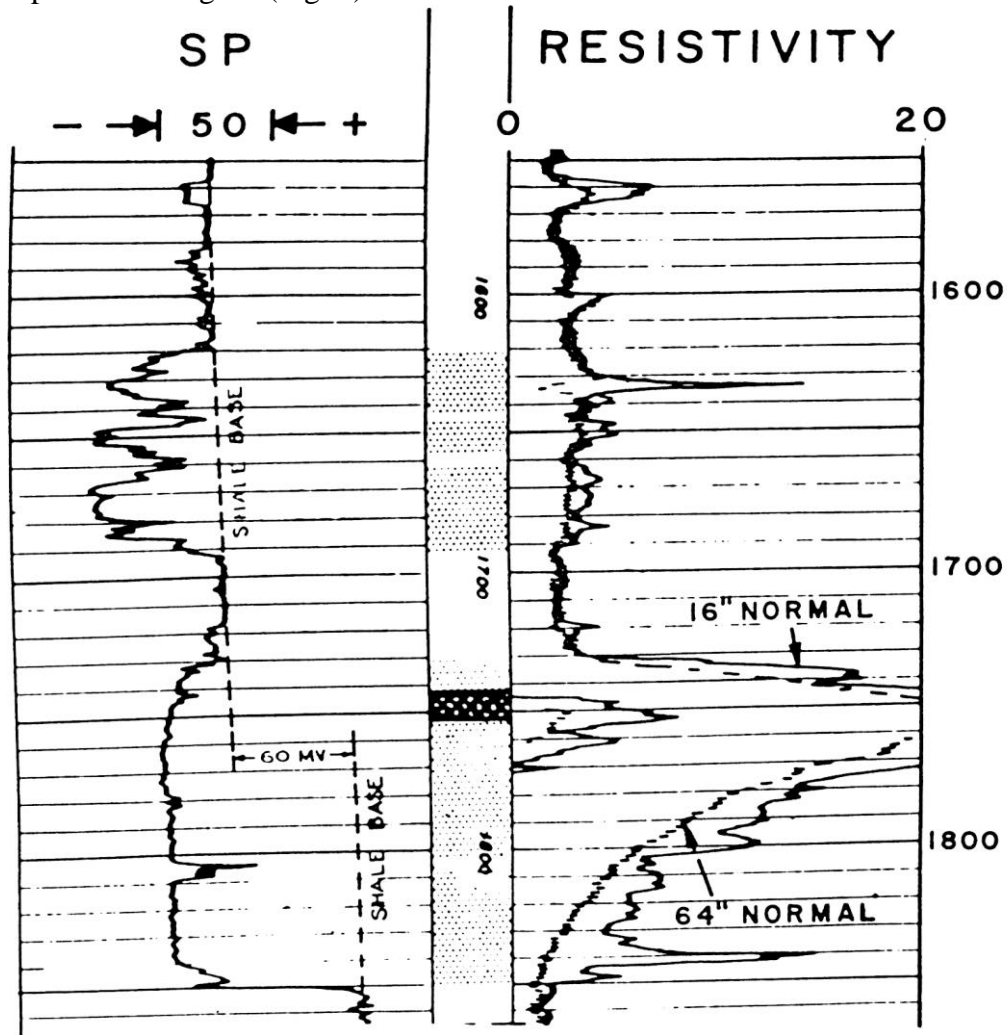


Fig 7. Changement de la ligne de base des argiles (D'après Guyod).

-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.

4.2. Interprétation quantitative

Le log P.S. s'il est bien développé 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 suivante :

- 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 $R_{mf} > R_w$.

Détermination de R_w à partir de la 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 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 6** fournit alors le facteur de correction par lequel il faut multiplier la valeur de la déflexion lue sur le log.

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.

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 (Fig. 8).

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

$$V_{sh} = (PSS - PS \text{ au point } X) / PSS$$

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.

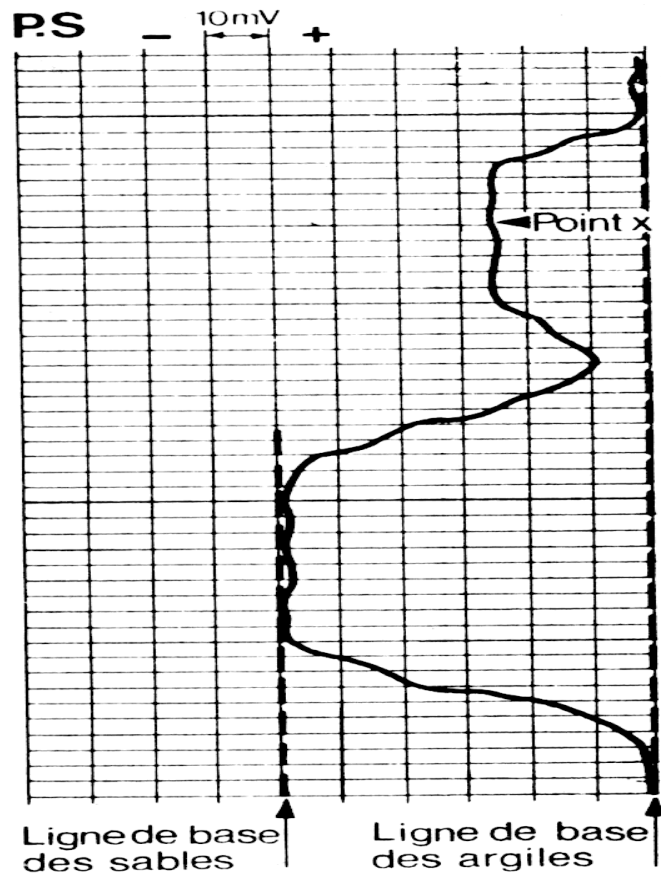
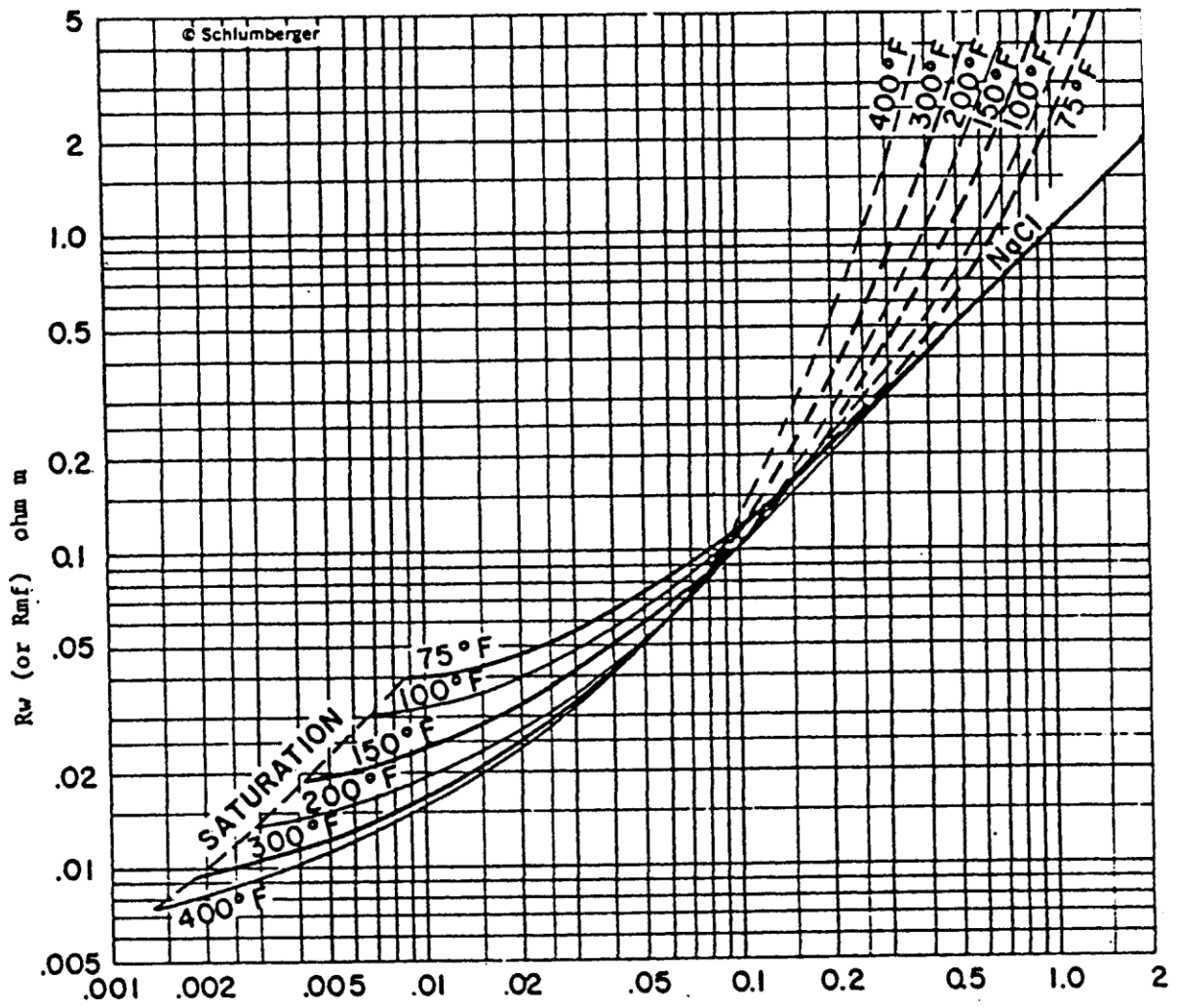
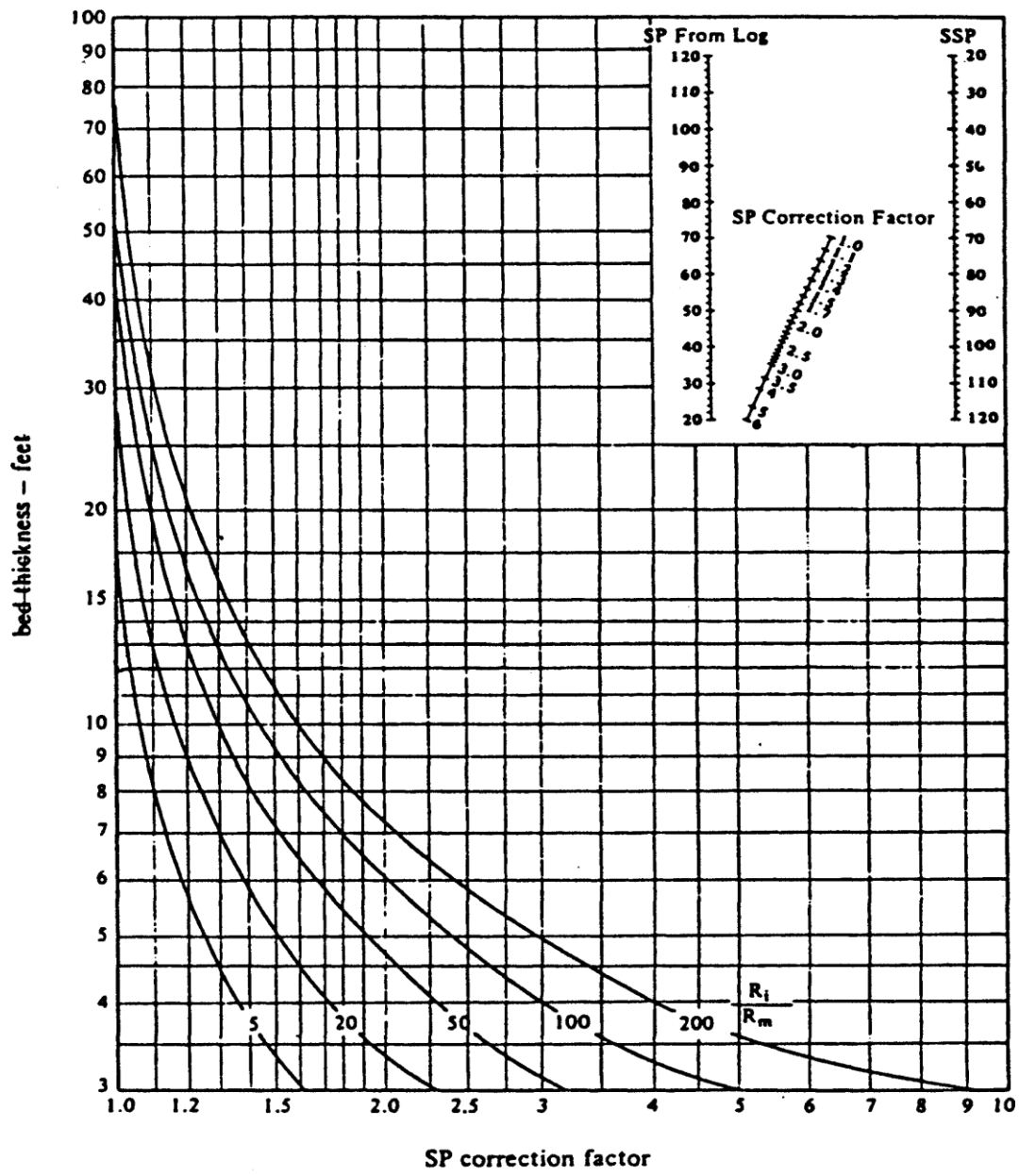


Fig 8 . Calcul du pourcentage d'argile : déflexion P.S. sable = 60 mV, déflexion P.S. sable argileux = 25 mV. $V_{sh} = (60-25)/60 = 0.58$.

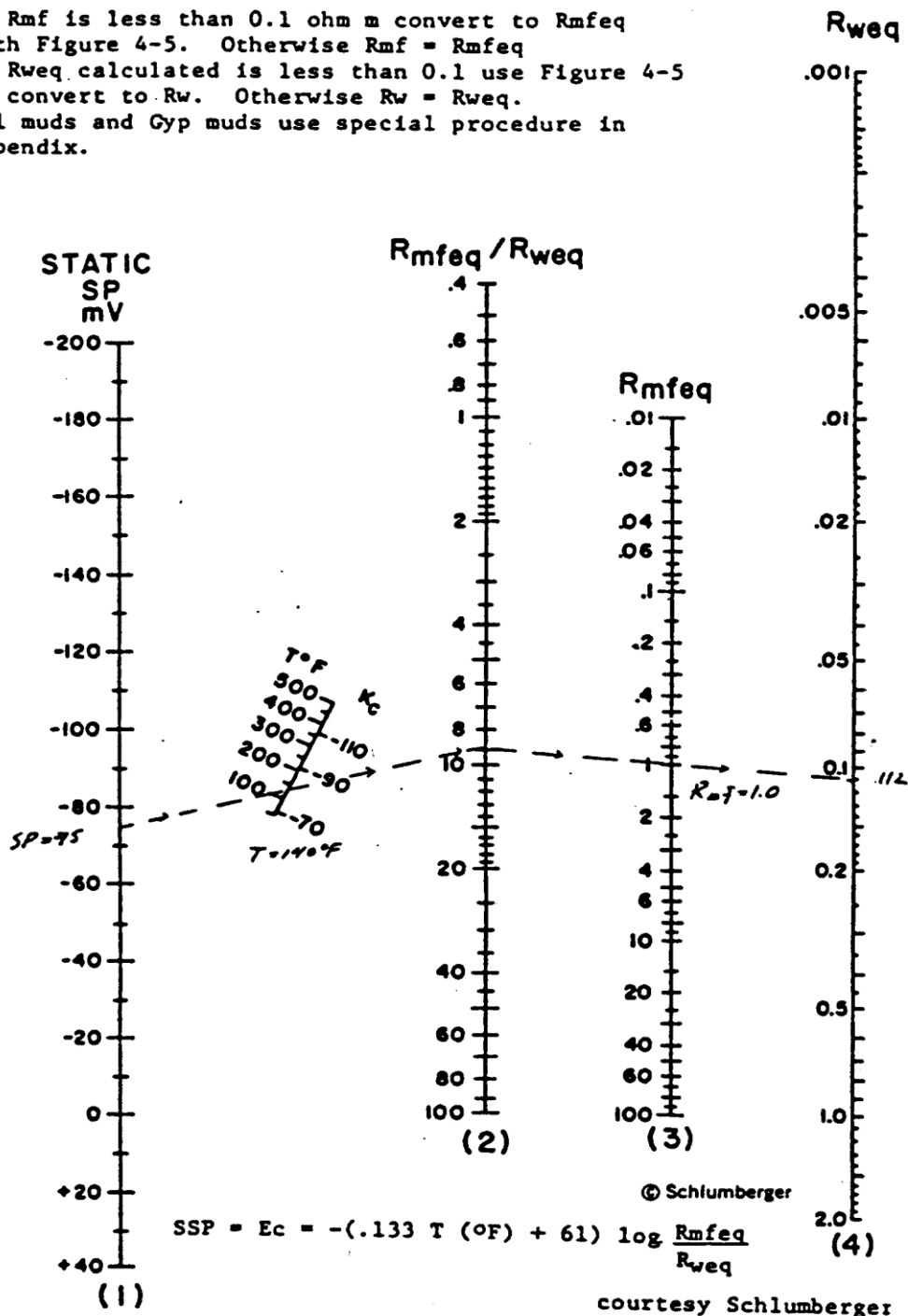


Abaque 5 : Transformation R_{weq} en R_w et R_{mf} en R_{mf} .



Abaque 6 : Correction de l'effet de banc pour le calcul de R_w , $S_{pcor} = SP \times Cor. F.$

- a) If R_{mf} is less than 0.1 ohm m convert to R_{mfeq} with Figure 4-5. Otherwise $R_{mf} = R_{mfeq}$
- b) If R_{weq} calculated is less than 0.1 use Figure 4-5 to convert to R_w . Otherwise $R_w = R_{weq}$.
- c) KCl muds and Gyp muds use special procedure in Appendix.



$$SSP = E_c = -(.133 T (^{\circ}F) + 61) \log \frac{R_{mf}}{R_{weq}}$$

Abaque 7 : R_{weq} à partir de la déflexion PS.

