

Chapitre 5

Diagraphies : Principe et méthodes

5.1 Introduction

Les levés géophysiques à partir de trous de forages sont utilisés dans les études hydrogéologiques, pétrolières, géotechniques et environnementales en permettant :

- La caractérisation des failles et fractures et la détection des cavités ;
- L'imagerie de la karstification et des zones de fractures ;
- L'évaluation de l'épaisseur des aquifères et la localisation des zones perméables ;
- La détermination de la qualité de l'eau souterraine et la délimitation des intrusions d'eau saline ;
- La cartographie et le suivi de panaches de contamination ;
- La localisation précise des fissures dans le roc et la mesure de leur ouverture ;
- L'acquisition in situ des propriétés mécaniques du roc et des dépôts meubles.

La reconnaissance des formations traversées par un sondage se fait en exploitant les informations obtenues en cours de forage. On enregistre les paramètres : poussée sur l'outil, vitesse d'avancement, poussée des fluides de forage, examen des déblais, examen qualitatif et quantitatif de la boue, indices de gaz ou d'huile, d'accès direct appelés les diagraphies instantanées. Une **diagraphie** est un enregistrement continu des variations d'un paramètre donné en fonction de la profondeur. 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.

Pour autant que l'on sache relier les paramètres mesurés et leurs variations aux propriétés physiques et chimiques des formations géologiques et des fluides connus, on dispose d'un instrument pour étudier les roches et leur contenu. Il existe des relations entre les paramètres physiques enregistrés et les paramètres géologiques. On peut définir un "faciès géophysique" qui est la somme des caractéristiques vues par les diagraphies. Il reste inchangé pour un même niveau au cours de plusieurs enregistrements successifs, dans le même trou. Il en résulte que la modification d'un paramètre géologique doit se répercuter sur un ou plusieurs paramètres physiques. De même, une variation de paramètre physique aura une signification géologique. Les diagraphies sont donc très utiles pour faire des corrélations de puits à puits et donnent des indications sur les variations lithologiques.

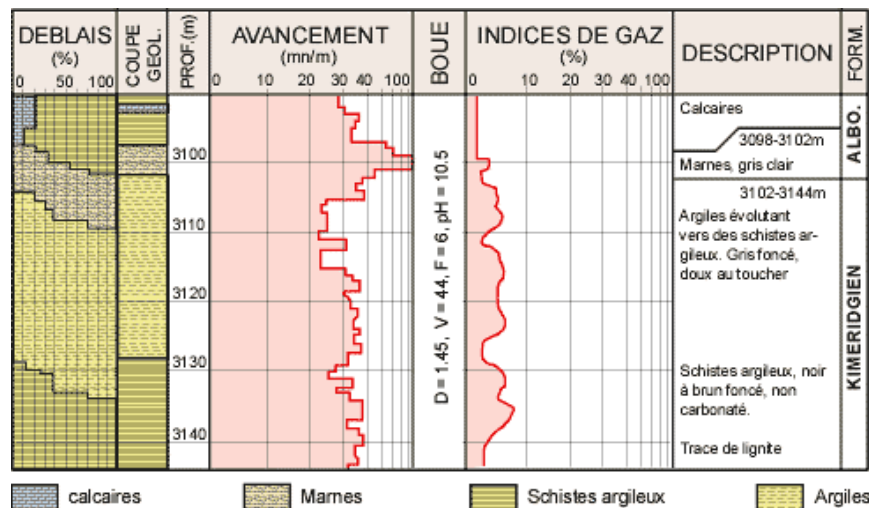


FIGURE 5.1 – Diagraphies instantanées sur un forage en Mer du Nord

5.2 Outils de mesure

Des outils (sondes) sont descendus dans le trou de forage à l'extrémité d'un câble qui assure la liaison avec les instruments de surface, et groupés dans un camion ou une cabine fixe. Parmi ces outils :

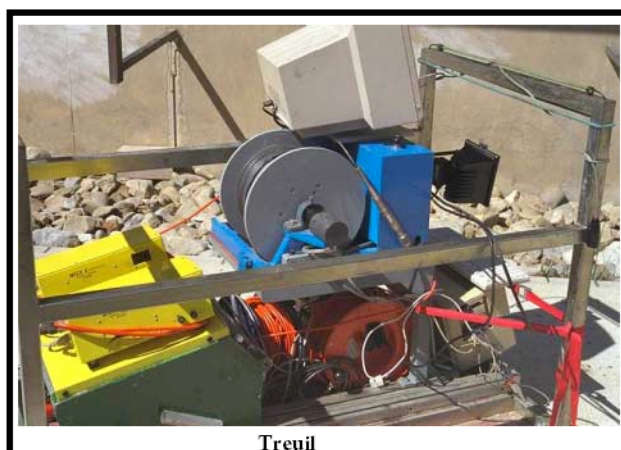
- Un treuil sur le tambour duquel est enroulé un câble. Fixé à une extrémité du tambour, le câble se termine à l'autre extrémité par un raccord qui permet la connexion mécanique et électrique avec la sonde descendue dans le trou. Le câble assure la transmission, vers l'outil, de l'énergie électrique et permet le retour en surface des signaux émis par l'outil.
- Les outils sont les appareils que l'on descend dans le trou de forage, à l'extrémité du câble. Cela peut aller de la simple électrode aux outils à plusieurs patins.
- Un système d'enregistrement où l'enregistrement se faisant en fonction de la profondeur.

L'exemple des outils monopôles utilisés en diagraphie acoustique. Les émetteurs et récepteurs sont multidirectionnels. L'émetteur génère dans le fluide une onde de compression qui donne naissance dans la formation à une onde de compression (onde P) et une onde de cisaillement (onde S) aux angles-limites des réfractions. Le log sonique mesure le temps de transit ΔT , entre deux récepteurs, d'ondes longitudinales envoyées dans la formation.

5.3 Mise en oeuvre du forage

Les qualités qui conditionnent le rendement potentiel d'un réservoir (aquifère ou pétrolier) sont : son volume, sa porosité, son taux de saturation, sa perméabilité et les différents fluides qu'il renferme (huile, gaz, eau). Les fluides qui remplissent le trou de forage ont des rôles multiples :

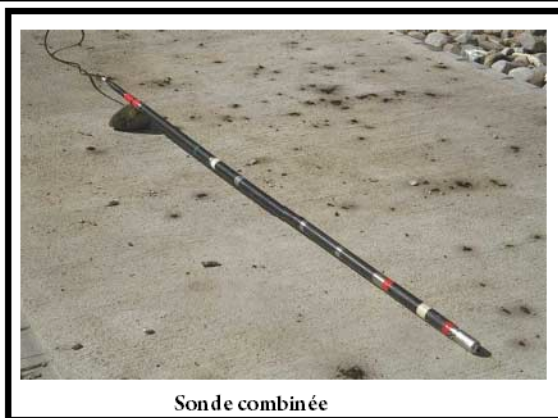
- Le nettoyage du trou, les déblais (cuttings) sont remontés à la surface ou ils sont partiellement récupérés et étudiés ;



Treuil



Boitier de commande et de digitalisation



Sonde combinée



Système d'acquisition

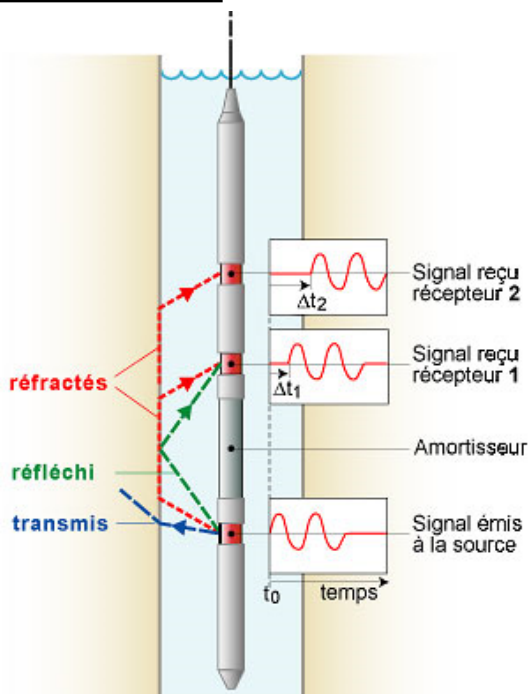


FIGURE 5.2 – Outils de mesure et exemple d'une sonde sonore utilisée en diagrapie acoustique

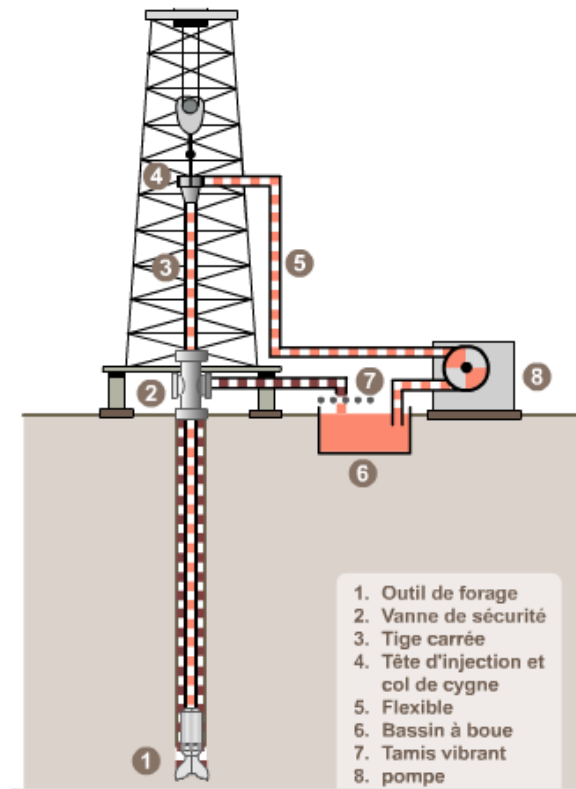


FIGURE 5.3 – Mise en oeuvre et fonctionnement d'un forage en Diagraphie

- Le maintien des parois du trou et des fluides contenus dans les formations ;
- La boue, par ses caractéristiques physiques et chimiques, exerce sur les formations une contre pression qui aura une influence sur le comportement des fluides au voisinage du trou.
- La lubrification et le refroidissement des outils de forage ;
- La consolidation des parois du forage en déposant en face des zones perméables un dépôt de boue mud-cake qui finit par empêcher toute circulation de fluide entre le trou de forage et la formation.

La présence du fluide de forage est génératrice de perturbations. Les formations forées contiennent des fluides (eau et hydrocarbures) 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. Il se produit dans la formation une filtration de la phase liquide et des substances dissoutes : le filtrat. Les particules dispersées s'accumulent sur la paroi du trou, formant le dépôt de boue ou "mud cake". Son épaisseur varie entre 3 mm à 2.54 cm. Ce mud cake a une perméabilité faible, il conditionne la filtration qui 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 5.5 illustre 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

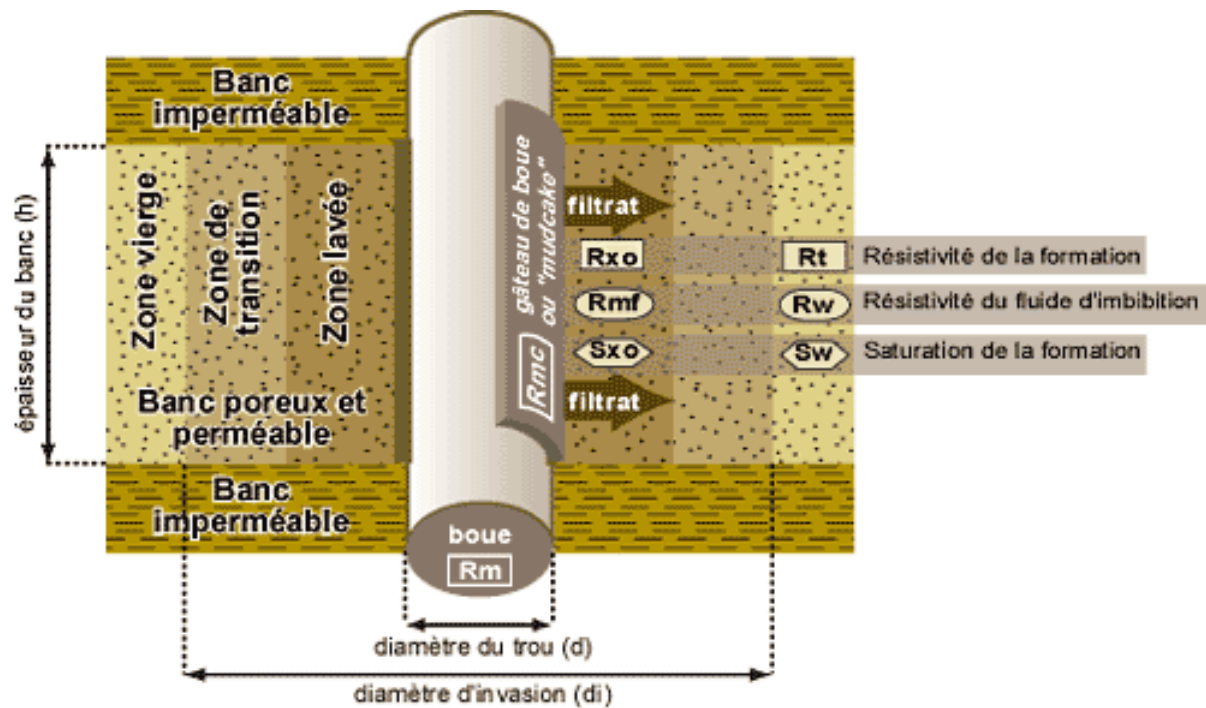


FIGURE 5.4 – Processus d'invasion de la formation par le filtrat de boue

refoulé 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 .

Sur l'en-tête du log on doit voir figurer un certain nombre de renseignements :

- Le nom de la compagnie
- Le numéro du forage et ses coordonnées
- L'outil utilisé
- Tous les autres logs enregistrés en même temps, pendant la même opération
- Depth-driller : la profondeur atteinte par le forage
- Depth-logger : la profondeur maximum atteinte par le log
- Btm log interval : la profondeur à laquelle le log commence véritablement
- Top log interval : la profondeur à laquelle le log est arrêté
- Type fluid in hole : le type de fluide remplissant le forage, type de boue et ses caractéristiques (densité, viscosité, pH)
- Source sample : l'endroit où l'on a prélevé l'échantillon de boue, généralement à la dernière circulation dans le bac à boue
- R_m (m : mud) : résistivité de la boue
- R_{mf} (mud filtrate) : résistivité du filtrat
- R_{mc} (mud-cake) : résistivité du mud-cake
- Diamètre du trou : cette information est communiquée par le foreur
- Température de surface et celle au fond du forage ; pour calculer la température des différentes formations.

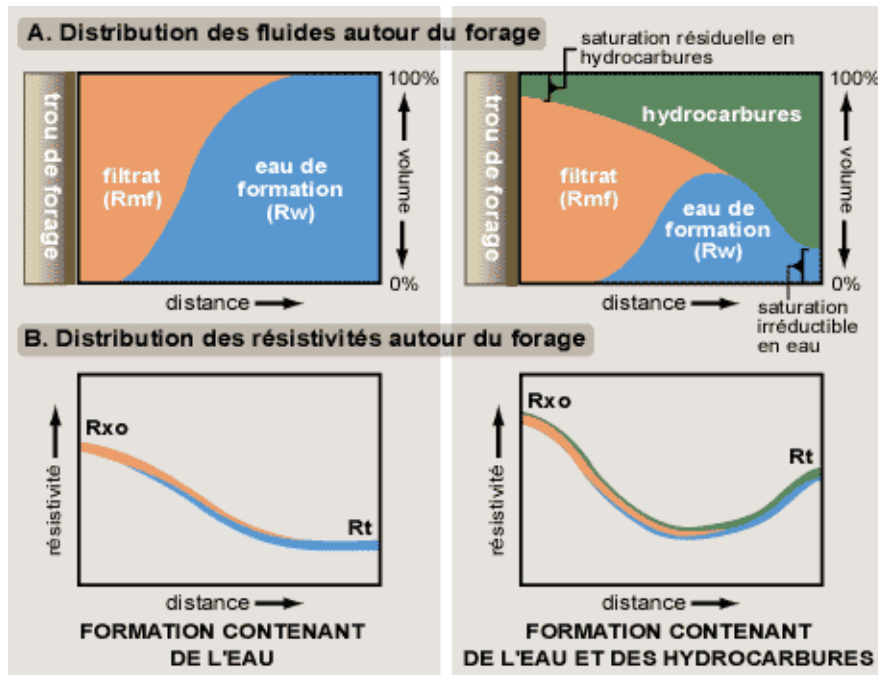


FIGURE 5.5 – Distribution de fluides autour du forage

5.4 Log de Polarisation Spontanée ou log PS

5.4.1 Introduction

Le log P.S. 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 et localiser certains niveaux imperméables,
- de calculer le pourcentage d'argile contenu dans la roche réservoir,
- de calculer la résistivité de l'eau d'imbibition ρ_w , ce qui permet d'obtenir la salinité et donc la qualité chimique de cette eau.

Le liquide employé lors de l'exécution d'un forage (eau, boue, air) diffère 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. Il y apparaît deux types de potentiel : un **potentiel de diffusion** qui se manifeste en face d'une paroi poreuse et perméable, il est défini ainsi :

$$E_d = -K_d \log \frac{\rho_{mf}}{\rho_w} \quad (5.1)$$

avec E_d est le potentiel de diffusion défini à une température de 25° et K_d est le coefficient du potentiel de diffusion, il est égale à 11.6 pour des solutions de NaCl à 25°.

Et un **potentiel de membrane** (ou shale potential) qui se manifeste en face d'une membrane imperméable, il est défini ainsi :

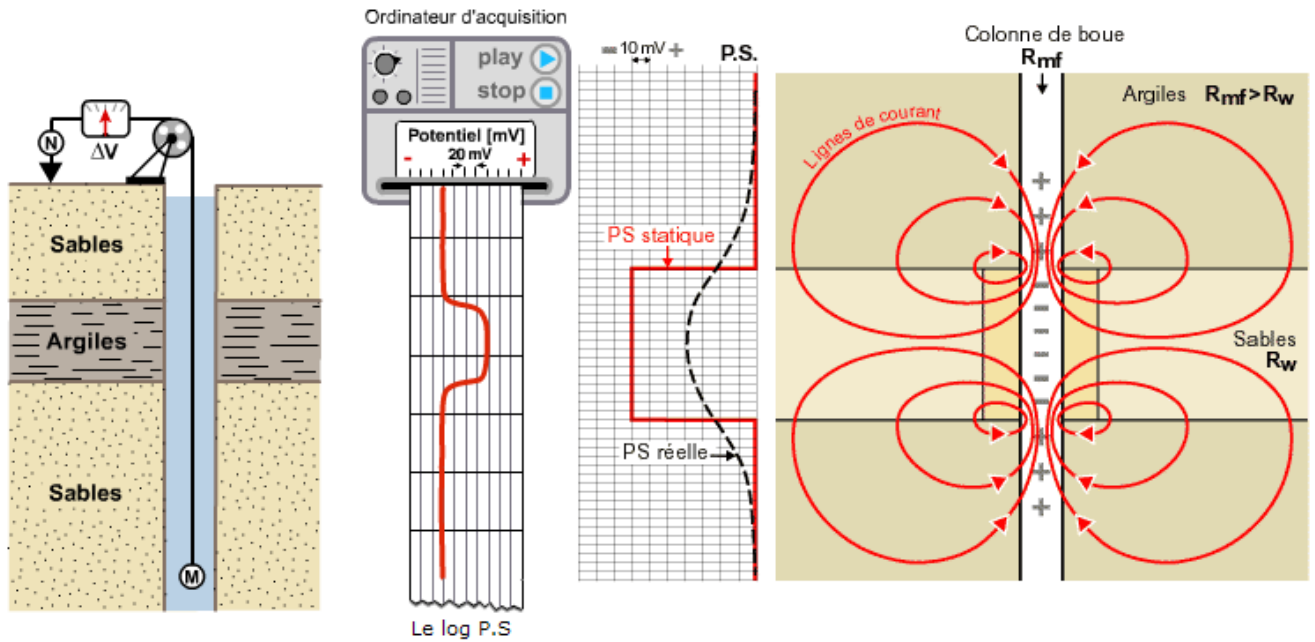


FIGURE 5.6 – Distribution des courants de PS

$$E_m = -K_m \log \frac{\rho_{mf}}{\rho_w} \quad (5.2)$$

avec E_m est le potentiel de membrane défini à une température de 25° et K_m est le coefficient du potentiel de membrane, il est égale à +59.1 pour des solutions de NaCl à 25°.

On arrive au schéma général avec 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 $\rho_{mf} > \rho_w$). La combinaison des effets dus au potentiel de diffusion et au potentiel de membrane donne le PS Statique ou PSS. La courbe en traits tirés correspond à l'enregistrement réel alors que la courbe en traits pleins représente le voltage théorique appelé PSS. En réalité le voltage enregistré est presque toujours inférieur à la PSS et est calculé :

$$PS = K \cdot \log \frac{\rho_{mf}}{\rho_w} \quad (5.3)$$

ρ_{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 ;

ρ_w : résistivité équivalente de l'eau de formation ;

K est une constante qui tient compte de la température, elle est donnée par les relations : $K = 0.133 T(^{\circ}F) + 61$ et $K = K_d + K_m$ (-11.6 - 59.1) = -70.7 mv à 25°.

avec K_d est un coefficient du potentiel de diffusion E_d et K_m est un coefficient du potentiel de membrane E_m .

5.4.2 Interprétation d'un log PS

- Interprétation qualitative

On peut observer qu'en face des couches d'argiles, les potentiels restent constants. L'enregistrement s'approche d'une droite appelée ligne de base des argiles (Shale base line). 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.

- Interprétation quantitative

Le log P.S. peut servir à calculer la résistivité de l'eau de formation ρ_w . L'interprétation quantitative 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 (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 $\rho_{mf} > \rho_w$.

5.4.3 Facteurs influençant la déflexion PS

- Influence de la salinité des fluides : La P.S. dépend 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 $\rho_{mf} > \rho_w$. La PS est dite normale. 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 $\rho_{mf} < \rho_w$. La PS est dite inverse, le positif est en face des sables et le négatif en face des argiles. Ce phénomène se produit assez souvent en prospection hydrogéologique.
- Eau de formation de même salinité que le filtrat $\rho_{mf} = \rho_w$. La PS 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 : 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. Une augmentation du diamètre du forage diminue la déflexion P.S. 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.

- 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.

- 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 demeure rectiligne en face des formations compactes.

- Dérive de la ligne de base : cette dérive 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.

- 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.

Facteurs d'influence

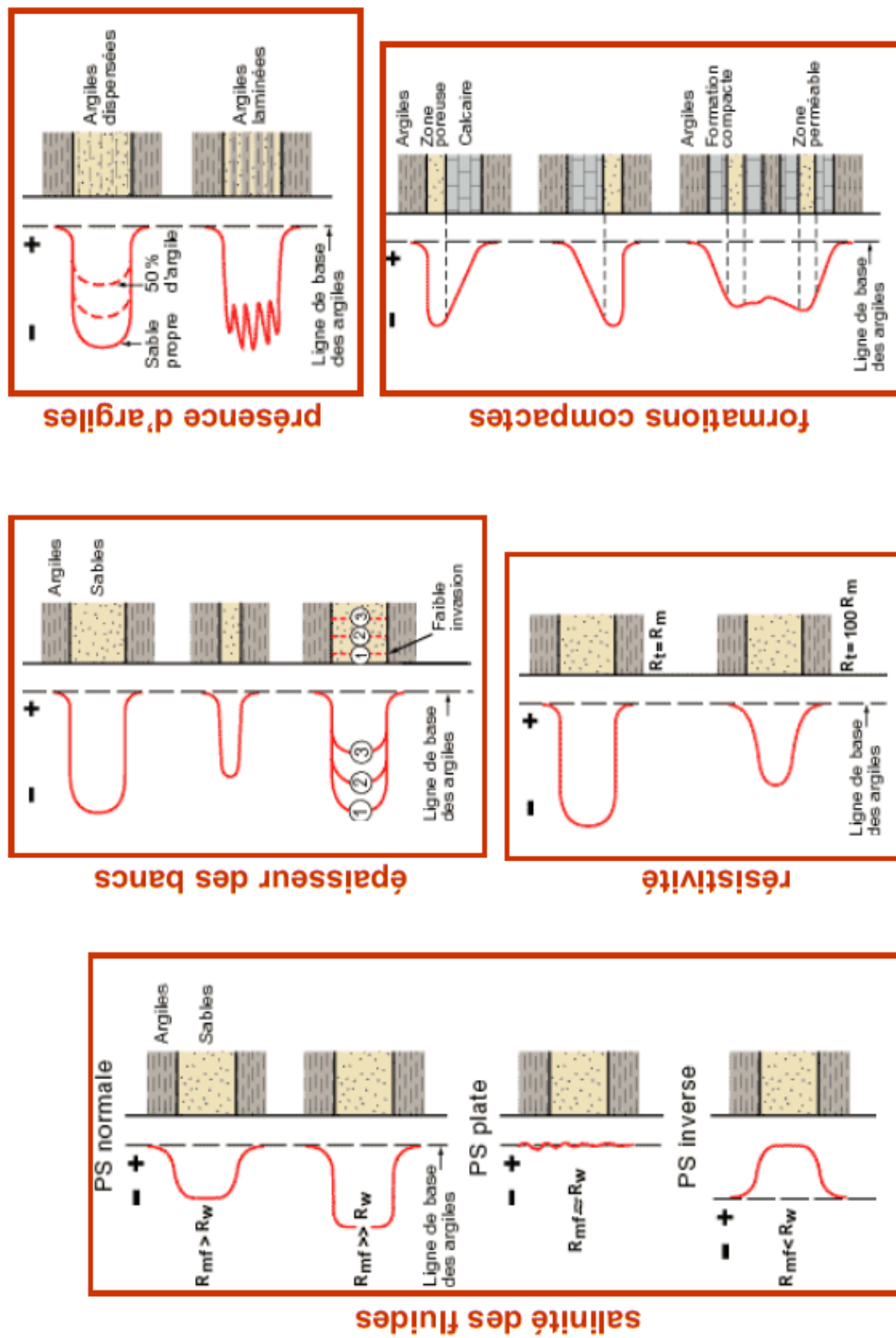
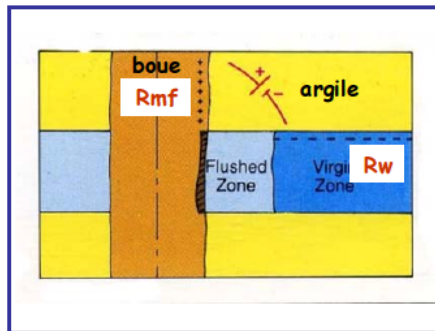


FIGURE 5.7 – Facteurs influençant la déflexion PS

Potentiel de membrane

→ potentiel lié à la présence d'argiles
 Argile = membrane cationique
 cations attirés anions bloqués



→ création d'une pile de concentration qui donne naissance à un courant

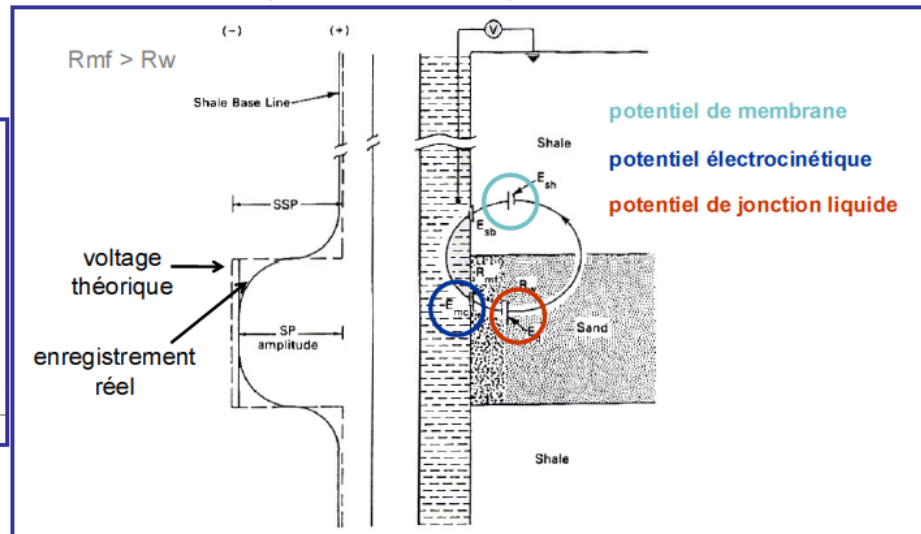


FIGURE 5.8 – Effet des argiles sur la déflexion

5.5 Logs électriques

Il s'agit d'une mesure active, qui se subdivise en méthodes galvaniques basées sur la loi d'Ohms et l'enregistrement de la réponse du milieu à l'injection de courant électrique et méthodes par induction électromagnétique. La première est utilisée en l'absence d'air dans le forage et de court-circuit, quand le fluide de forage est conducteur (boue ou eau) et en l'absence de tubage métallique ou PVC. En revanche, la seconde est plus adaptée à la présence de l'air dans le forage, de l'eau dans la roche, d'un tubage PVC dans le forage et la conductivité de la roche suffisante mais pas trop importante (résistivité entre 0.2 et 300 ohm.m).

Pour mesurer la résistivité électrique en forage, le principe est le même que pour les méthodes électriques de surface. On envoie un courant par des émetteurs (électrodes dans le cas d'une boue à base d'eau) ou bobines électromagnétique (dans le cas d'une boue à base d'huile) qui va pénétrer dans la formation et on reçoit un courant traduit en résistivité (on enregistre d'abord la conductivité, reconvertie en résistivité) par des récepteurs (électrodes ou bobines). La présence d'eau dans la formation facilite la conductivité, on a deux types de conductivité : une conductivité électronique qui est assurée par les métaux, et dans notre cas c'est la conductivité électrolytique qui nous intéresse.

K est appelé coefficient de sonde. C'est un facteur géométrique qui dépend du dispositif utilisé. Pour chaque outil utilisé, la distance entre électrode d'envoi de courant et électrode de mesure de potentiel est un espacement L. Plus L est grand, plus la profondeur d'investigation de l'outil sera grande. A chaque outil utilisé ayant un certain espacement, correspondra une lecture de résistivité à une certaine distance du sondage. Pour apprécier la valeur de la résistivité mesurée, il importe donc de bien connaître la contribution au signal recueilli de chacune des zones entourant le trou de forage.

Pour les levés dits de type conventionnel, on dénombre quatre configurations de me-

sure : P.S., 16" normal (sonde normale de 16"), 64" normal (sonde normale de 64") et sonde latérale 18' 8". Actuellement, les sondes permettent de faire plusieurs mesures simultanément : résistivité DC, PP, PS, EM (multi-fréquence), sismique et sonique, inclinaison, etc. La résistivité mesurée dans le forage dépend de la résistivité de la boue et de la résistivité de la formation avoisinante. Une série de règles de calcul ont été mises au point pour déterminer R_t selon une variation radiale de la résistivité autour d'un forage.

Parmi ses applications, en prospection pétrolière où les multiples mesures faites en forage permettent de caractériser les réservoirs. Par méthodes combinées des mesures de la résistivité, de densité, de la P.S., de la radioactivité naturelle, de la température et de la pression, on peut évaluer la porosité, la saturation, la perméabilité, le contenu en hydrocarbures et la géométrie des structures. Un logging classique d'un forage est donc composé par un log d'avancement du forage et un log des pertes de fluide de forage, un log gamma et un caliper log. Ces techniques sont également applicables en **recherche d'eau** mais elles demeurent coûteuses. Les résultats obtenus permettront de bien préciser les limites des formations, leur nature hydrogéologique voire même d'évaluer la porosité et la perméabilité des formations aquifères identifiées. Sur la base de ces loggings et même en l'absence de carottage, un bon plan d'équipement (position des crépines et des tubes pleins) du forage sera facile à établir.

5.5.1 Dispositif de single point (monoélectrode)

Le principe consiste en la mesure de la résistance entre une électrode descendue dans le forage et une électrode de référence en surface. Le volume qui intervient dans la mesure est une sphère de rayon 10 fois le diamètre de l'électrode, qui englobe une partie du fluide de forage ainsi qu'une partie de la formation. L'interprétation n'est que qualitative. Cependant, l'outil possède une très bonne définition verticale. La courbe est symétrique par rapport au milieu du banc et les limites des couches aux points d'inflexion. Cette mesure est très influencée par la résistivité du fluide de forage et les changements de diamètre du trou. L'échelle est en ohms par division augmentant vers la droite.

5.5.2 Dispositif de sonde normale

Les électrodes B et N sont placées à la surface alors que les électrodes A et M sont descendues dans le forage. La distance entre A et M est constante. Le potentiel mesuré en M est issu de A ; B et N étant considérés à l'infini. I étant maintenu constant, le potentiel mesuré varie avec R , on a :

$$V = RI \frac{1}{4\pi AM} \quad (5.4)$$

5.5.2.1 Interprétation qualitative

Le point de mesure de la résistivité O est le milieu de AM . Le rayon d'investigation d'une telle sonde est égal à $2AM$ qui est aussi la définition verticale ou profondeur d'investigation. Deux espacements sont utilisés : la petite normale, N16", short normal ($AM = 40.64$ cm) qui donne une valeur de R_{xo} et la grande normale, N64", long normal ($AM = 162.56$ cm) qui donne des valeurs comprises entre R_{xo} et R_t et tributaires de la profondeur d'invasion. Elles permettent donc d'estimer d'une manière simultanée les résistivités des

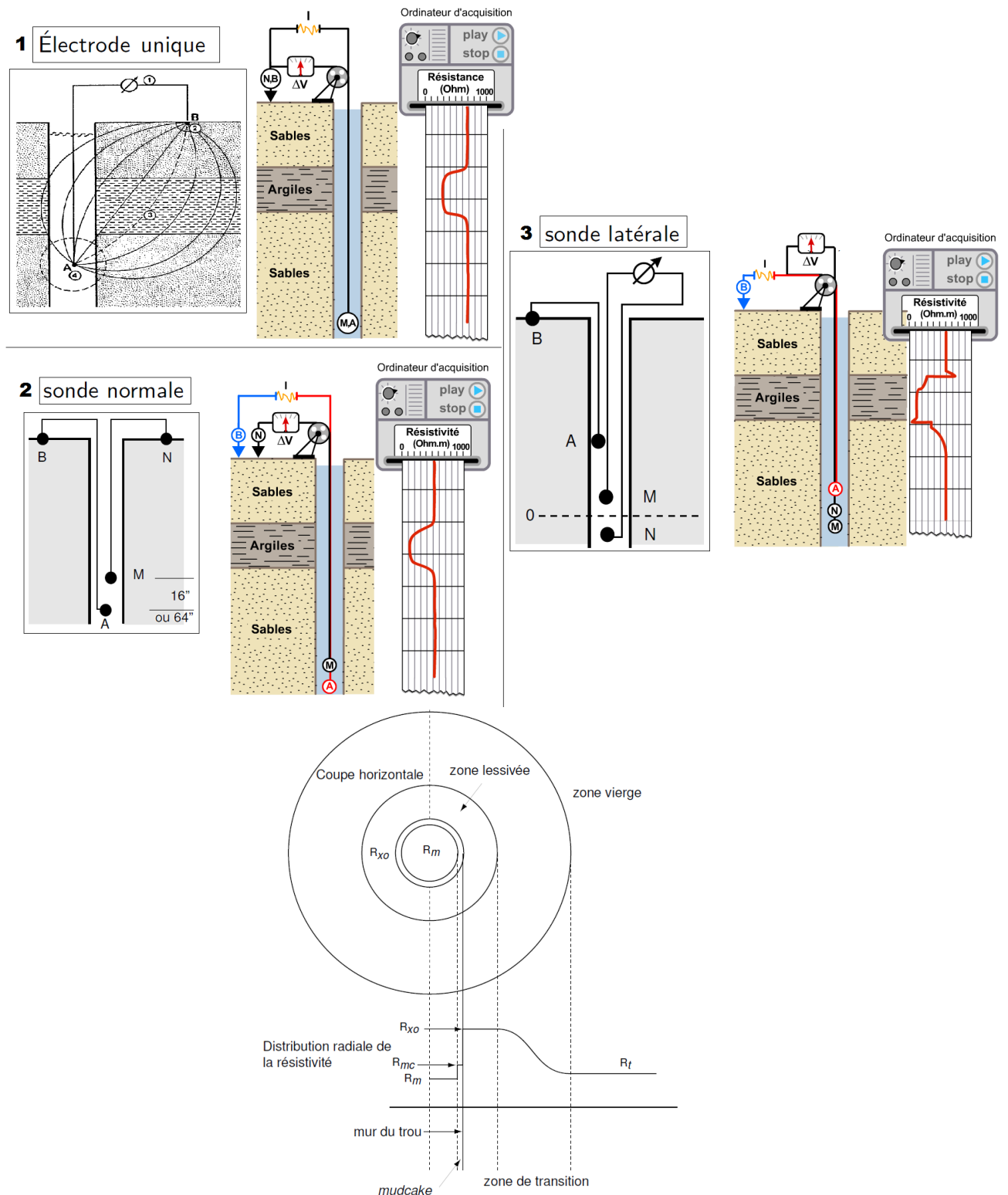


FIGURE 5.9 – Types de configuration, réponses associées et distribution radiale de la résistivité autour d'un forage

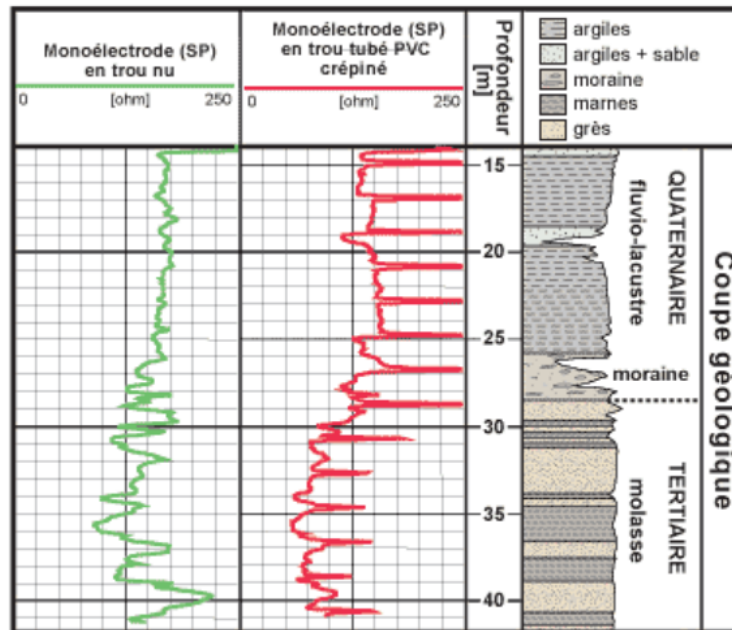


FIGURE 5.10 – Enregistrement de single point (Halle Fosse, 1998)

zones lavées et vierges, R_{x0} et R_t . Les sondes normales donnent une courbe centrée et symétrique sur le milieu du banc.

L'enregistrement par les diagraphies donne une résistivité apparente différente de la résistivité vraie, cette différence est fonction de l'épaisseur des bancs, de leurs résistivités, de l'espacement, du diamètre du trou de sondage, de la résistivité de la boue et de la profondeur de la zone lavée (x_0). L'épaisseur des couches aux points d'inflexion est plus petite que l'épaisseur vraie d'une longueur AM dans le cas de bancs épais résistants, et plus grande que l'épaisseur vraie d'une longueur AM dans le cas de bancs conducteurs. Pour les couches minces résistants, il se produit un phénomène d'inversion où la couche apparaît comme conductrice.

5.5.2.2 Interprétation quantitative

- Influence du diamètre du trou et de la résistivité de la boue : lorsque la boue est très résistante, le courant passe très mal et affecte les résultats. En revanche, si la boue est conductrice, le courant reste sous l'environnement du sondage, ce qui modifiera les résultats. Des effets semblables sont produits si le diamètre de sondage (dh) s'élargit, surtout avec des dispositifs courts, on procède alors à des corrections grâce à des abaques.

- Influence de h et Rs , on emploie des abaques qui fournissent des résistivités vraies à partir des résistivités apparentes lues sur les logs. Quand les bancs sont minces, cette détermination devient difficile, car l'effet des formations adjacentes sera très important.

- Influence de l'invasion, les conditions d'invasion sont responsables des réponses des sondes normales. Dans les formations à fortes porosité, la zone envahie est restreinte et à faible porosité, elle est étendue.

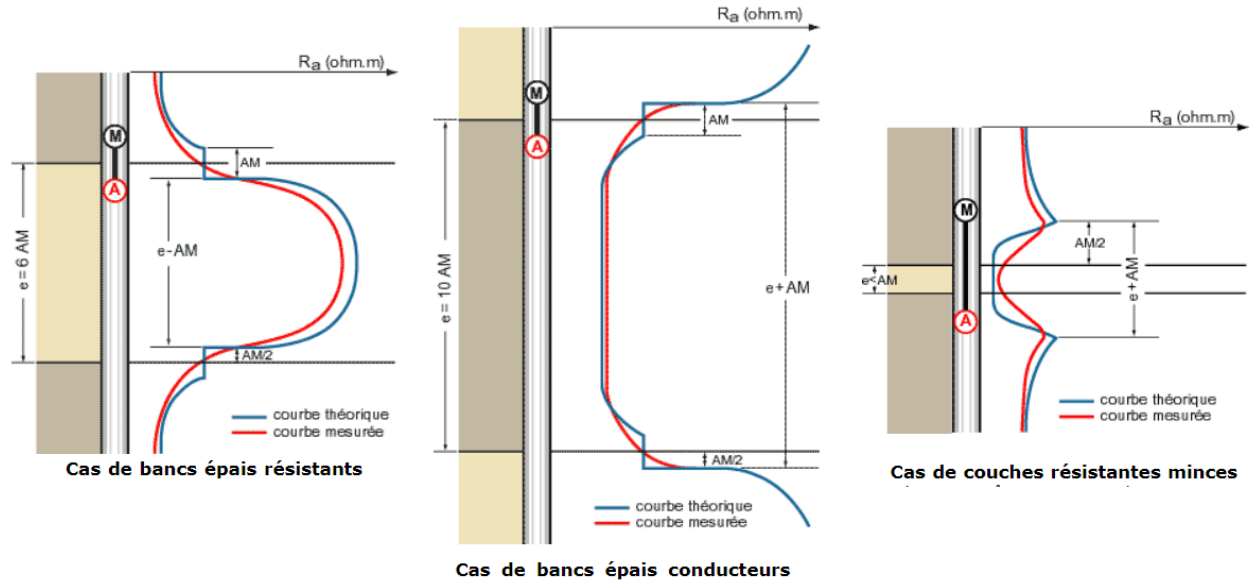


FIGURE 5.11 – Différentes réponses de la sonde normale

5.5.2.3 Anomalies observées lors des enregistrements

- Si $R_{mf} = R_w$, cela traduit l'absence d'invasion, on obtient alors, $R_{16''} = R_{64''}$ ($R_{x0} = R_t$).
- Si $R_{mf} < R_w$, cela entraîne que $R_{16''} < R_{64''}$ ($R_{x0} < R_t$).

$$F = \frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{\rho_{x0}}{\rho_{mf}} \quad (5.5)$$

- Si $R_{mf} > R_w$, cela entraîne que $R_{16''} > R_{64''}$ ($R_{x0} > R_t$).

Si ces relations ne sont pas considérées, il faut tenir compte des couches minces et de l'effet de l'inversion, recalibrer l'instrument de mesure, et prendre en considération les parasites électriques d'origine tellurique.

5.5.2.4 Estimation de la porosité

La porosité peut être estimée pour une formation totalement envahie par le filtrat de la boue, on a :

$$S_{x0}^2 = \frac{F \cdot \rho_{mf}}{\rho_{x0}} \quad (5.6)$$

avec S_{x0}^2 désigne la saturation en filtrat dans la zone lavée (en %), nous remplaçons F par :

$$F = \frac{1}{\phi^2} \quad (5.7)$$

$$S_{x0}^2 = \frac{\rho_{mf}}{\phi^2 \cdot \rho_{x0}} \quad (5.8)$$

$$\phi^2 = \frac{\rho_{mf}}{S_{x0}^2 \cdot \rho_{x0}} \quad (5.9)$$

$$\phi = \frac{1}{S_{x0}} \sqrt{\frac{\rho_{mf}}{\rho_{x0}}} \quad (5.10)$$

Lorsque la saturation est totale, $S_{x0} = 100\%$, soit 1, on aura donc la porosité de la formation :

$$\phi = \sqrt{\frac{\rho_{mf}}{\rho_{x0}}} \quad (5.11)$$

Les sondes normales, en l'absence de bancs minces, de parasites électriques et de dispositif mal calibré fournissent de meilleurs logs de résistivité. Ainsi donc, des épaisseurs seraient bien définies ($AM/2$) et les résistivités apparentes seraient corrigées. Leur limite réside dans l'effet d'inversion où les bancs résistants deviennent conducteurs.

5.5.3 Dispositif de sonde latérale

L'électrode B est maintenue à la surface alors que les trois autres électrodes (A, M et N) sont descendues dans le forage. Les deux électrodes de mesure M et N sont très proches dans le trou de forage entre lesquelles on mesure la différence de potentiel. Le point de mesure est O, le milieu de MN. L'expression de la résistivité est :

$$V = RI \frac{MN}{4\pi AMAN} \quad (5.12)$$

En réponse, la sonde latérale fournit une courbe dissymétrique qu'il s'agisse de couches résistantes ou conductrices. La limite inférieure du banc est bien définie. L'épaisseur dans le cas de bancs épais résistants est plus petite d'une longueur de dispositif AO. Dans le cas de bancs conducteurs épais cette épaisseur est exagérée de la longueur du dispositif AO. Si les couches ont une épaisseur suffisante on peut dire que la sonde latérale lit une résistivité proche de R_t . En effet si la couche est épaisse il existe un palier donnant la valeur de R_t . Pour les bancs minces il existe un certain nombre de règles empiriques qui permettent de trouver la résistivité.

5.5.3.1 Interprétation qualitative

- Profondeur d'investigation et définition verticale : l'espacement est de 18'8" (5m70), la profondeur d'investigation et la définition verticale sont égales à AO.

- Facteurs influençant la forme et l'amplitude de la déflexion : le but d'utiliser la sonde latérale est de déterminer la résistivité de la zone vierge R_t , du fait du grand espacement, l'influence de la zone lavée est négligeable. La détermination des résistivités apparentes et la délimitation des bancs sur les courbes obtenues est une opération extrêmement délicate.

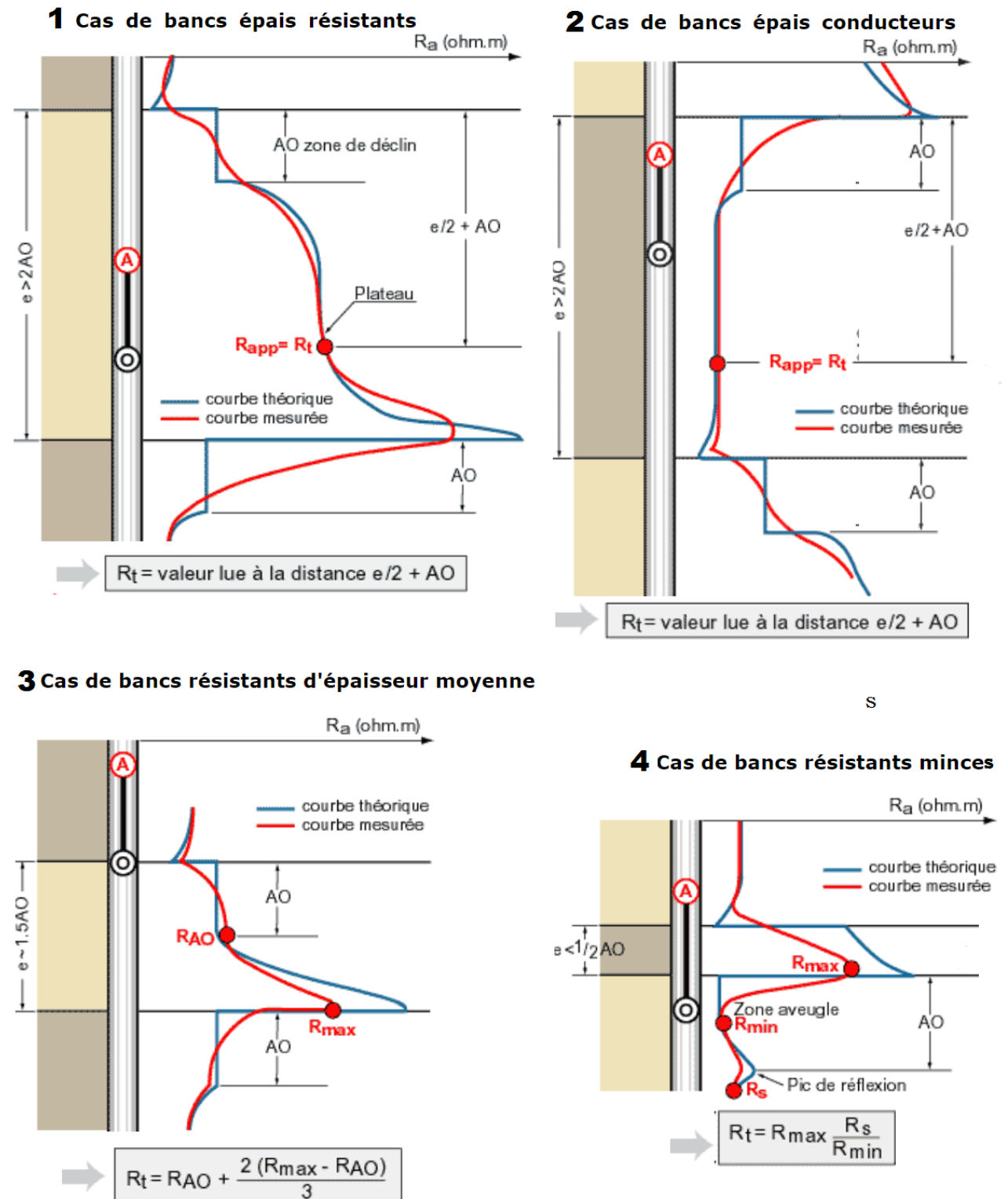


FIGURE 5.12 – Différentes réponses de la sonde latérale

5.5.3.2 Interprétation quantitative

- Influence du diamètre du trou et de la résistivité de la boue : il existe des abaques qui permettent la correction des lectures de la courbe latérale pour pallier aux effets du trou de sondage, ils nécessitent la connaissance du diamètre du trou ainsi que la résistivité de la boue.

5.5.3.3 Détermination de la résistivité des bancs

Pour obtenir d'une manière rapide les résistivités vraies R_t des formations, une série de règles a été établie. Tout d'abord, il convient de s'assurer des mesures et de vérifier les différentes lectures de résistivités qui devraient être dans le bon sens. 3 cas sont à envisager :

- Si $R_{mf} = R_w$, $R_{16''} = R_{64''} = R_{18'8''}$
- Si $R_{mf} < R_w$, $R_{16''} < R_{64''} \leq R_{18'8''}$
- Si $R_{mf} > R_w$, $R_{16''} > R_{64''} \geq R_{18'8''}$

La série de règles qu'il faut appliquer est la suivante :

- Faibles résistivités : $R_{16''}/R_m < 10$, la sonde normale 64'' permet de donner une valeur très proche de la résistivité vraie du banc considéré.

- Résistivités moyennes : $10 < R_{16''}/R_m < 50$, la résistivité fournie par la sonde normale 64'' doit être contrôlée par la courbe latérale.

- Fortes résistivités : $R_{16''}/R_m > 50$, la résistivité vraie est donnée par la courbe latérale.

5.5.3.4 Détermination du pourcentage d'argile

Pour la détermination du pourcentage d'argile dans les zones à faibles résistivités, on peut donc utiliser la formule empirique suivante :

$$V_{sh} = \sqrt{\frac{R_{sh}}{R_t}} \quad (5.13)$$

Où V_{sh} est le pourcentage volumique d'argile, R_{sh} est la résistivité dans les argiles et R_t dans le sable argileux.

5.5.4 Outils focalisés

Des dispositifs d'électrodes particuliers utilisant des électrodes supplémentaires permettent de canaliser le courant dans une région circulaire autour du forage, ce sont des dispositifs à focalisation de courant. On peut ainsi mesurer la résistivité d'un volume aplati, et déterminer la résistivité d'unités plus minces que ce qui est permis avec les sondes normale et latérale (Schlumberger, Laterolog). Il existe aussi des Micrologs qui sont des dispositifs de petite échelle (1.5 à 2'') permettant d'obtenir la résistivité de la boue et du mudcake. La pénétration est très faible.

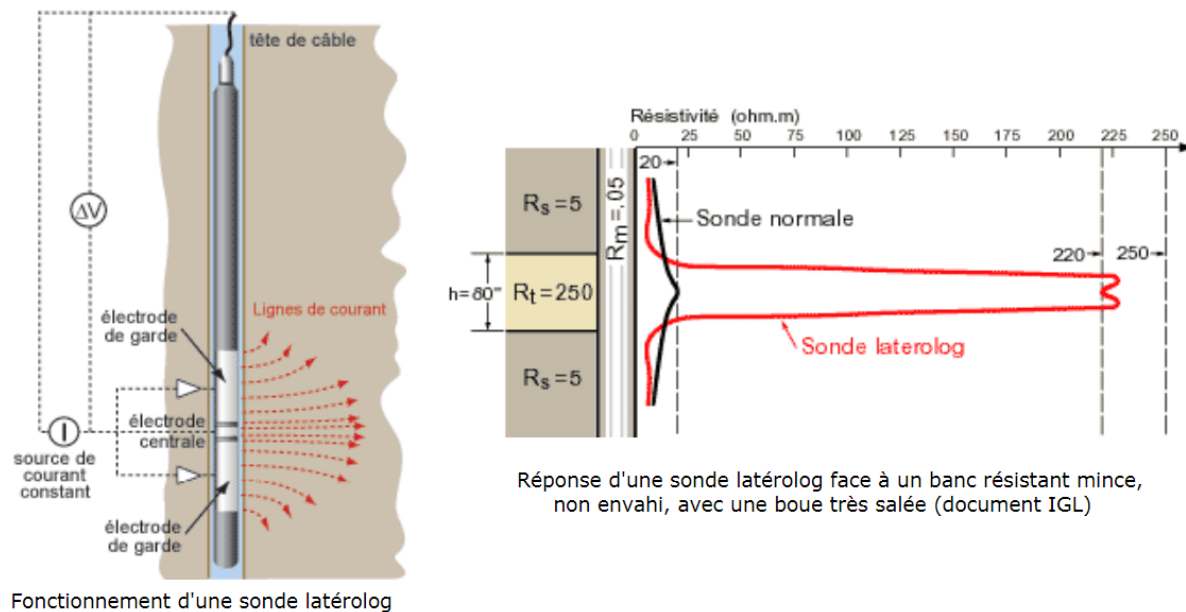
Un courant alternatif constant est injecté dans la formation entre l'électrode centrale et la tête de câble. Deux électrodes de garde maintenues au même potentiel que l'électrode

centrale permettent de focaliser le courant qui pénètre dans la formation. La connaissance de l'intensité du courant injecté ainsi que la différence de potentiel entre les deux électrodes d'injection permet de déterminer la résistivité apparente des formations traversées.

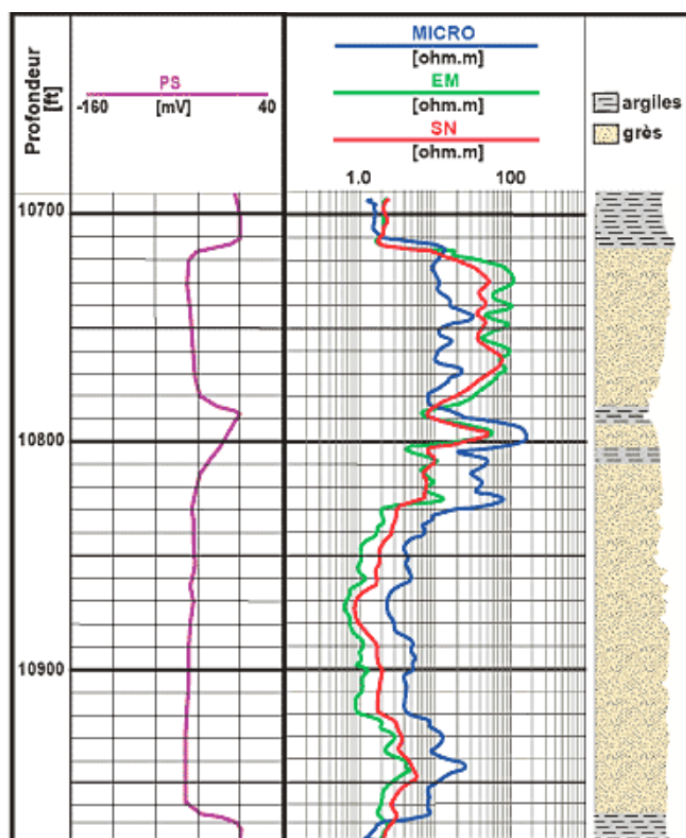
Les épaisseurs des couches sont données par les points d'inflexion des courbes. Les outils traditionnels sont en général enregistrés en échelle linéaire, mais il peut arriver que sur certains anciens logs, on trouve des échelles hybrides avec une partie en résistivité et une partie en conductivité. A l'heure actuelle, on enregistre avec une échelle standardisée logarithmique. Tous les outils électriques demandent un certain nombre de corrections pour les effets de trou. Elles se font à l'aide d'abaques donnés par le constructeur. On doit également faire des corrections en fonction de la résistivité des épontes. Lors de l'exécution de logs électriques (P.S. et résistivité), le fluide de forage participe à la mesure et cela introduit une limitation à la réalisation de ces mesures qui ne peuvent s'effectuer que si le fluide de forage est conducteur (boue ou eau) et en l'absence de tubage métallique.

5.5.5 Outils électromagnétiques

On les utilise lorsque le trou est rempli d'air ou que le tubage est en plastique plein (isolant). Ils ont pour principe d'envoyer dans une bobine émettrice un courant alternatif. Le champ électromagnétique qui en résulte induit dans la formation traversée des courants qui circulent en anneaux coaxiaux à la sonde (Courants de Foucault), qui à leur tour engendrent leur propre champ électromagnétique qui en traversant la bobine réceptrice y induisent une force électromotrice FEM proportionnelle au flux traversant la bobine. Le courant alternatif émis est d'amplitude et de fréquences constantes et l'intensité des courants de Foucault et la FEM induite dans la bobine sont proportionnelles à la conductivité des formations. Ces outils mesurent la conductibilité qui est par la suite transformée en résistivité. Leur profondeur d'investigation est à peu près celle d'une petite normale. Ils ne peuvent pas donner de bons résultats lorsque la résistivité est trop élevée, ou lorsque au contraire elle est trop faible. Des corrections sont apportés aux mesures électriques pour corriger l'effet du tubage PVC de 4".



Fonctionnement d'une sonde latérolog



Exemple de différents logs électriques dans un forage pétrolier

FIGURE 5.13 – Fonctionnement et réponse d'une sonde latérolog

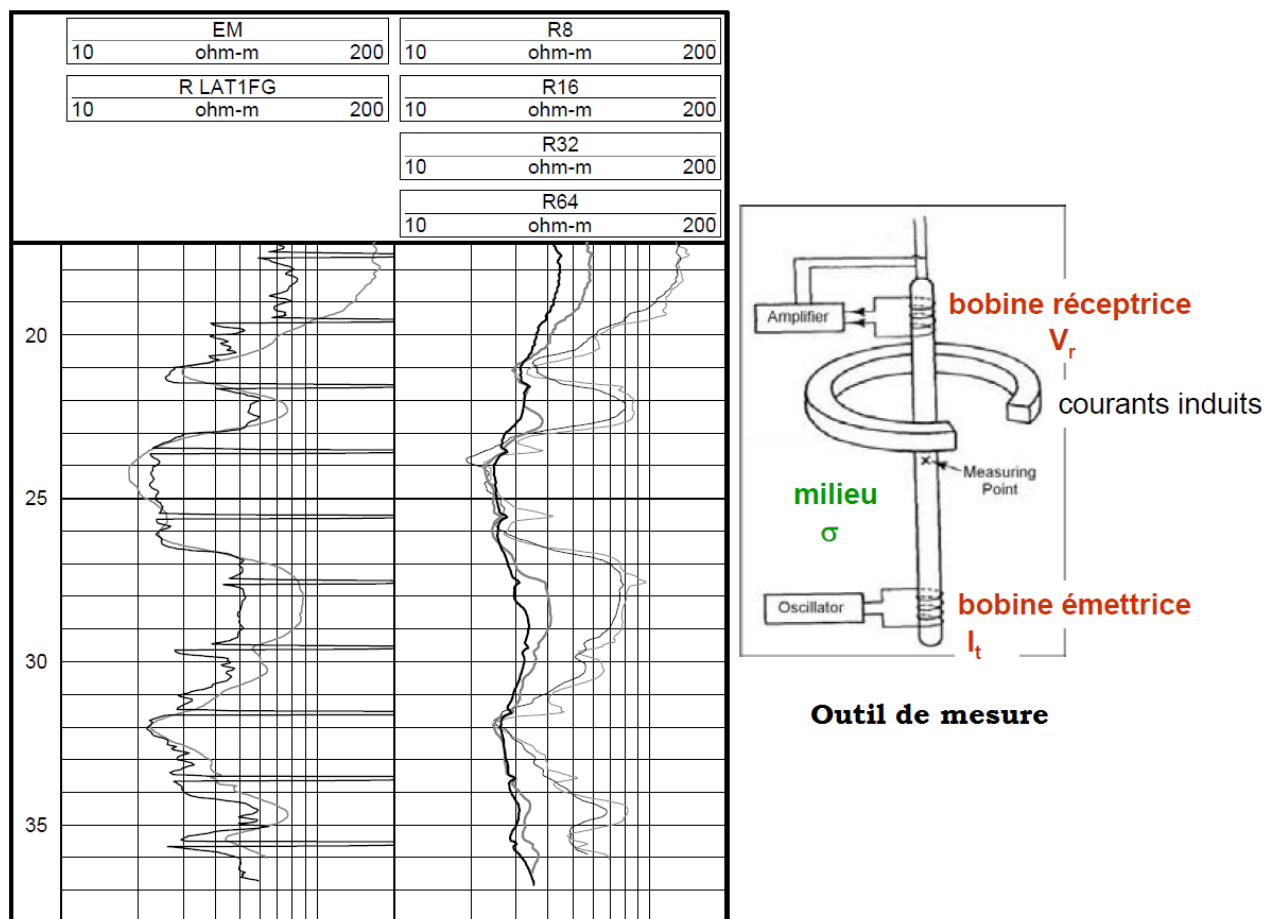


FIGURE 5.14 – Schéma de l'outil à induction et enregistrement de diagraphies électriques. EM : Electro Magnétique, R LAT1FG : Laterolog, R8 : Normale 8", R16 : Normale 16", R32 : Normale 32", R64 : Normale 64" (Cugy, 1998).