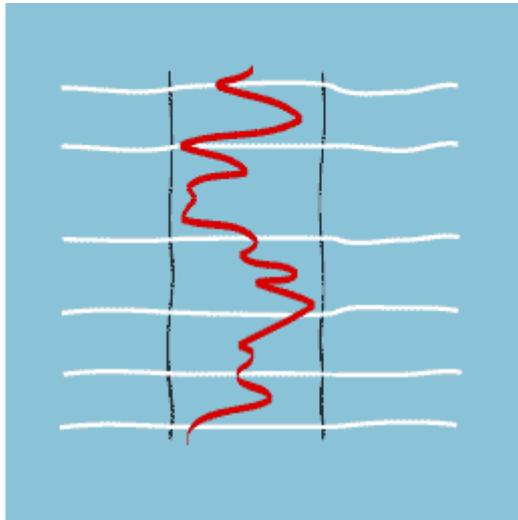


# **DIAGRAPHIES PETROLE**



**Cours online de géophysique**  
**Université de Lausanne · Institut Français du Pétrole**

**Professeur**

**D. Chapellier**

**Assistant L. Baron**

## Chapitre 1 INTRODUCTION

### 1 Introduction

Lorsque l'on a repéré un réservoir potentiel souterrain par des méthodes de surface, géologiques et géophysiques, il faut en étudier les qualités.

Les qualités qui conditionnent le rendement potentiel d'un réservoir, qu'il soit aquifère ou pétrolier, sont principalement :

- Son volume ;
- Sa porosité ;
- Son taux de saturation ;
- Sa perméabilité ;
- Les différents fluides qu'il renferme (huile, gaz, eau).

La première approche consiste à faire des **forages** (Voir Fig. 1.1). Lorsqu'il s'agit de forages à but hydrogéologique ils sont le plus souvent carottés, par contre en prospection pétrolière il s'agit en général de forages destructifs.

### 2 Le forage

Un forage est une cavité, approximativement tubulaire, ayant un diamètre nominal défini par l'outil de forage. Le diamètre peut varier énormément, on parle de forage petit diamètre pour des diamètres allant jusqu'à 250 mm puis de forages à gros diamètres.

Le forage est généralement rempli d'un fluide qui peut être de nature variable : boue à la bentonite, eau, mousse, boue à l'huile, air etc. La boue qui remplit le trou de forage a des rôles multiples qui sont ;

- **Le nettoyage du trou**, les déblais (cuttings) sont remontés à la surface ou ils sont partiellement récupérés et étudiés par les géologues.
- **Le maintien des parois du trou** et des fluides contenus dans les formations. La boue en effet de par ses caractéristiques physiques et chimiques, exerce sur les formations une **contre pression**. Cette contre pression a bien évidemment une influence sur le comportement des fluides dans le 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 que l'on appelle **mud-cake**. Ce mud-cake finit par empêcher toute circulation de fluide entre le trou de forage et la formation.

Une boue ne peut jouer convenablement tous les rôles que nous avons énumérés que si elle est bien conditionnée, c'est-à-dire que si ses principales caractéristiques physiques et chimiques sont maintenues à des valeurs appropriées.

La reconnaissance des formations traversées par un sondage se fait tout d'abord en exploitant les informations obtenues pendant le cours du forage, on enregistre les paramètres suivants : 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 etc. tous ces renseignements sont d'accès

pratiquement direct. On appelle l'ensemble de ces enregistrements **les diagraphies instantanées** (Voir Fig. 1.2).

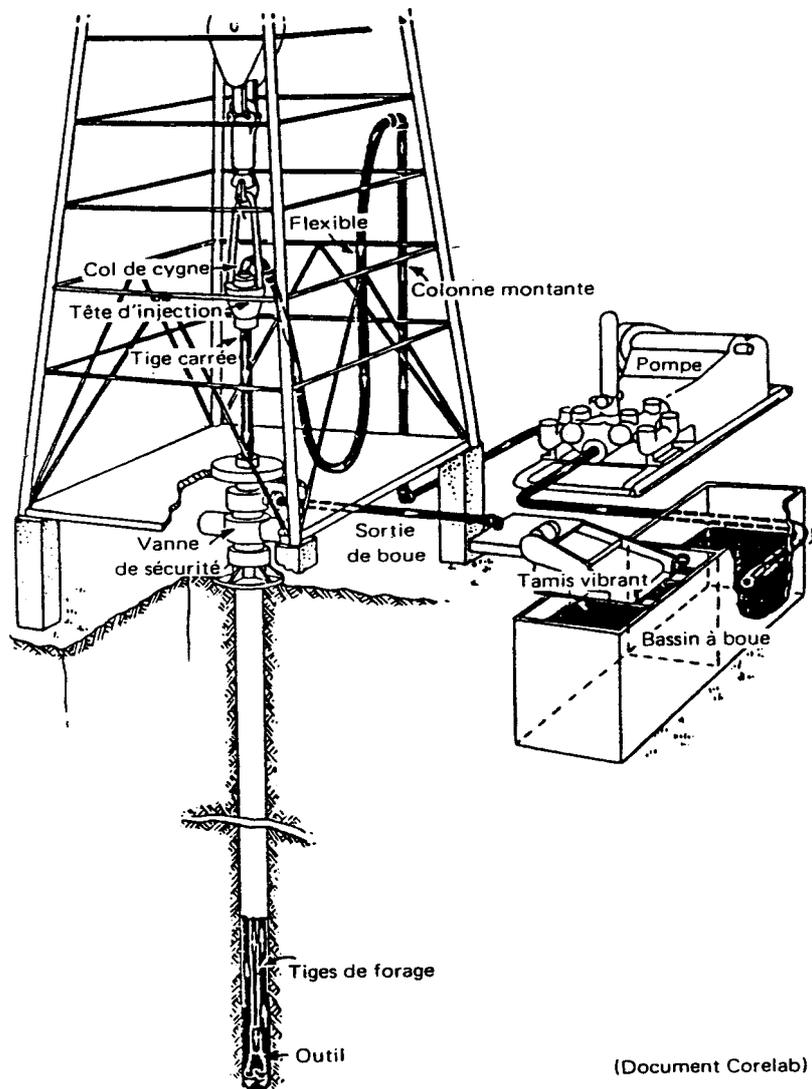


Figure 1.1 : Le forage.

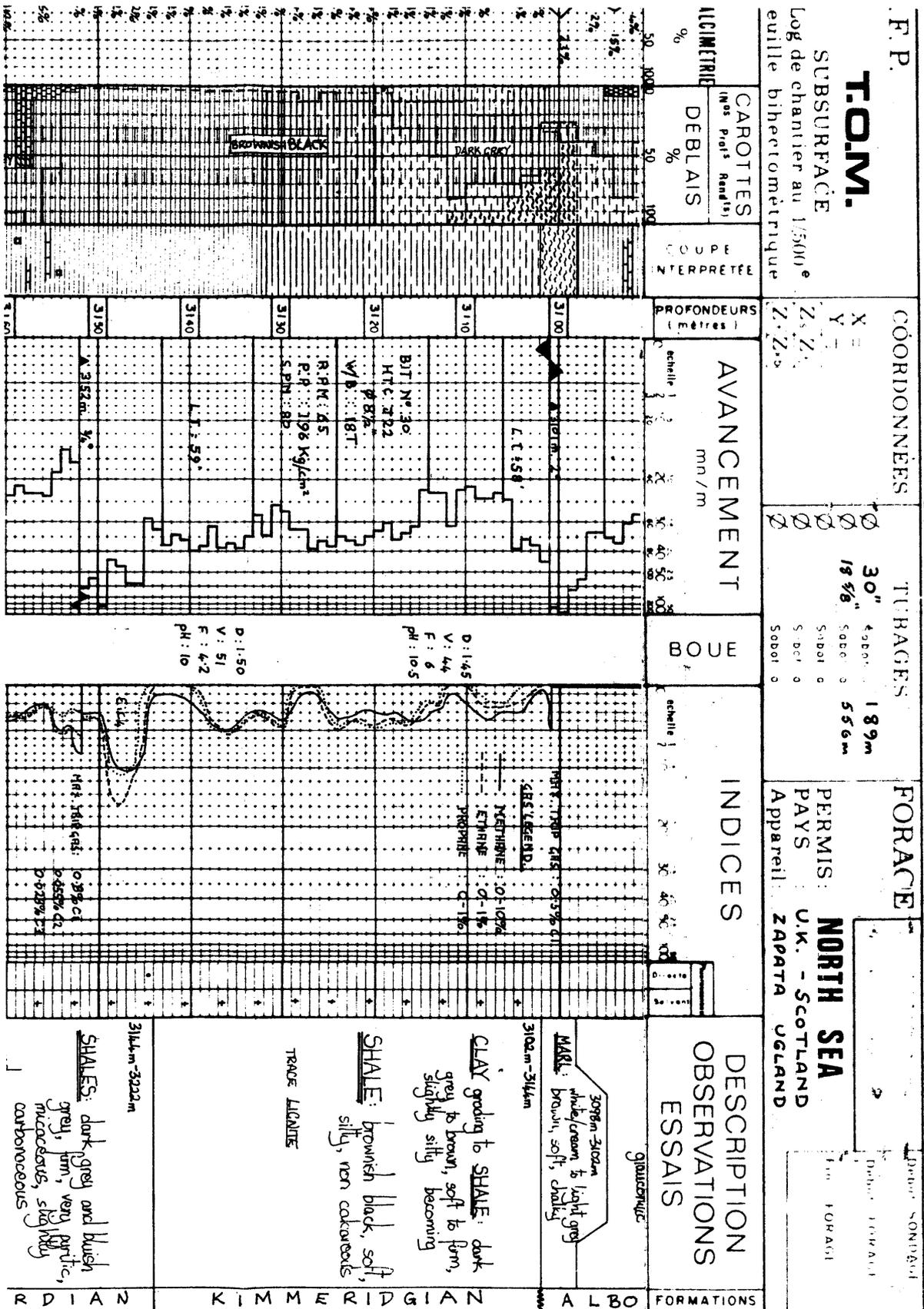


Figure 1.2 : Diagraphies instantanées.

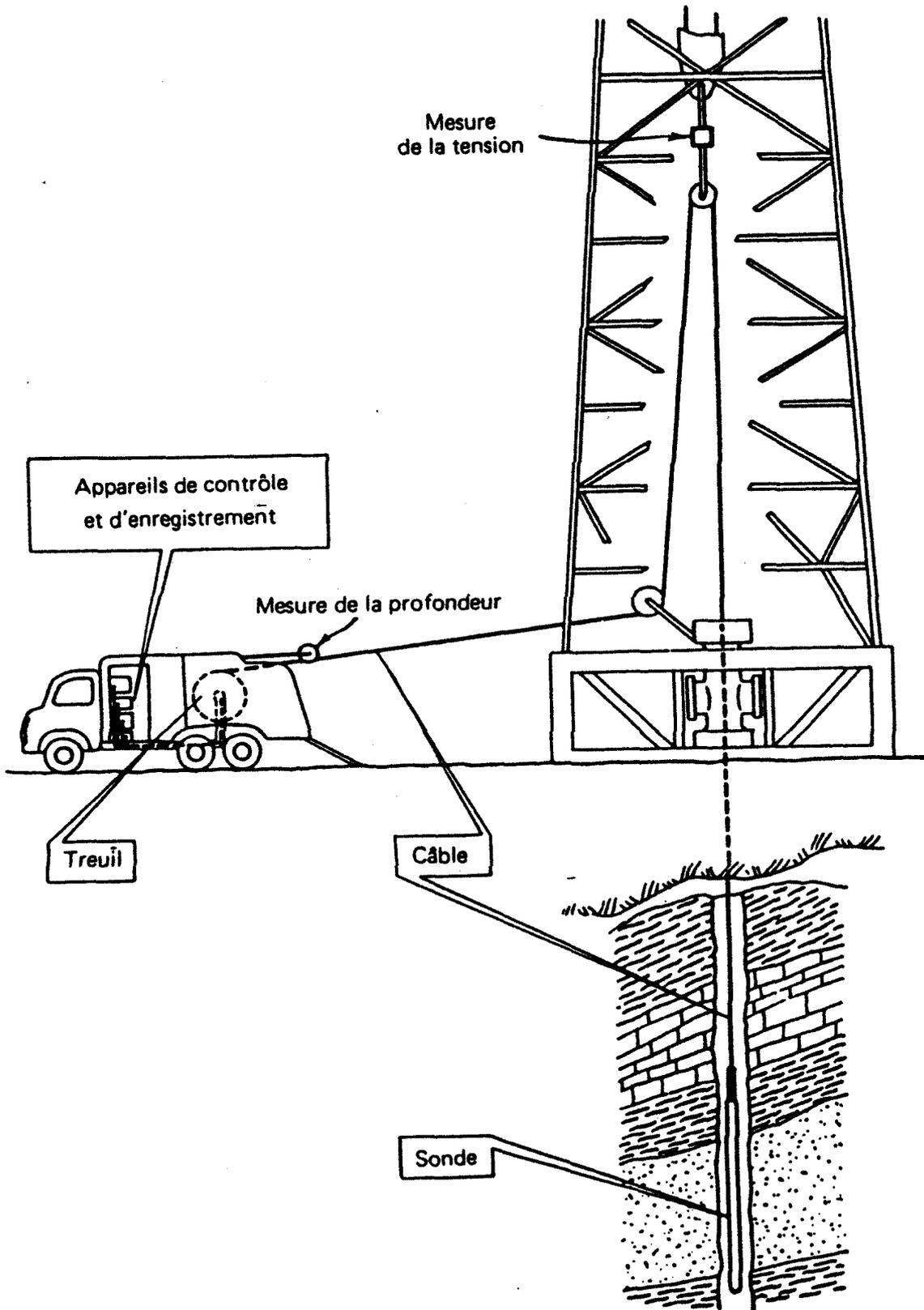
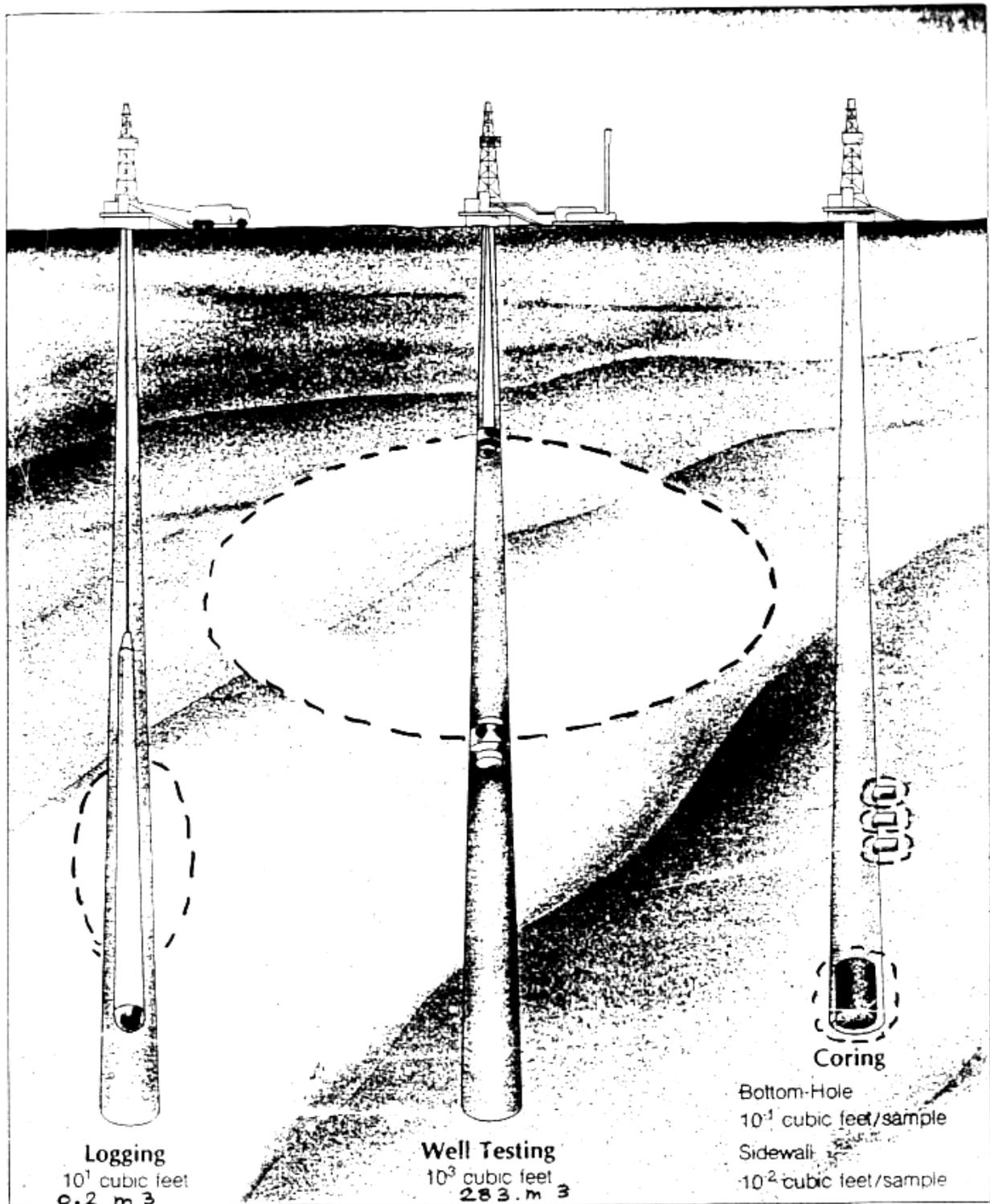


Figure 1.3 : Diagraphies différées.



□ Volumes of investigation for well logging, well testing, and bottom-hole and sidewall coring.

**Figure 1.4 : Les volumes d'investigations en géophysique de gisement.**

Mais on se heurte à un obstacle inévitable : la dispersion dans le temps et dans l'espace qu'impose le transit par la boue de tout échantillon venant du fond du trou, aggravée souvent par la contamination due à l'éboulement plus ou moins important des parois, il peut en résulter une grande confusion. Seul le carottage mécanique continu donne l'image exacte de la succession des couches géologiques et certaines de leurs caractéristiques physiques.

Pour les forages profonds il faut de plus remarquer que l'étude des carottes n'est faite que ponctuellement sur des échantillons prélevés parfois à intervalles réguliers, d'autres fois sélectionnées en fonction de critères subjectifs.

Certaines informations ne peuvent être fournies par le carottage (Voir Fig. 1.4) : la valeur et la direction des pendages, la nature et la quantité exacte des fluides en place, etc. D'autre part, les opérations de carottage sont d'un prix de revient très élevé.

### 3 *Les diagraphies*

Pour pallier ces inconvénients est apparue, en 1927, la technique des enregistrements dans les forages. On parle de **diagraphies ou logging**.

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** (Voir Fig 1.3).

Des **outils**, ou **sondes**, conçus dans ce but, sont descendus dans le trou de forage à l'extrémité d'un câble qui assure la liaison avec les instruments de surface commandant les opérations, et groupés soit dans un camion, soit dans une cabine fixe pour les forages en mer.

Pour autant que l'on sache relier les paramètres mesurés et leurs variations aux propriétés physiques et/ou chimiques des formations géologiques et des fluides contenus dans ces formations, on dispose d'un instrument sans égal pour étudier les roches et leur contenu éventuel.

Il existe des relations étroites entre les paramètres physiques enregistrés et les paramètres géologiques. On peut définir un "faciès géophysique" qui est pour un niveau donné, la somme des caractéristiques vues par les diagraphies. Le "faciès géophysique" reste inchangé pour un même niveau au cours de plusieurs enregistrements successifs avec les mêmes outils, 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 très précieuses sur les variations lithologiques.

### 4 *Les moyens techniques d'enregistrement*

L'ensemble des équipements utilisés pour l'enregistrement des diagraphies comprend :

- **Un treuil** volumineux et puissant, sur le tambour duquel sont enroulés plusieurs milliers de mètres de câble. Le câble est un organe essentiel dont le rôle est à la fois mécanique et électrique. Fixé à une extrémité du tambour, il se termine à l'autre extrémité par un raccord rapide qui permet la connexion mécanique et électrique avec l'outil descendu dans le trou de forage. Le câble assure la transmission, vers l'outil, de l'énergie électrique assurant son fonctionnement, et permet le retour en surface des signaux émis par l'outil. C'est le défilement du câble qui permet la

mesure des profondeurs. La mesure des profondeurs est une mesure imparfaite ; le câble en effet, est soumis à des efforts considérables, il peut s'allonger sous l'effet de son poids ou par vieillissement, certains outils collent à la paroi du trou, il peut aussi y avoir des dépôts de boue sur le câble ou sur la molette. Une première chose à faire avant toute interprétation est donc de **recaler** les diagraphies entre elles.

- **Les circuits de contrôle et de commande** des appareils de mesure, ainsi que les équipements de traitement de l'information. Ils sont réunis dans des "**panels** " que l'on met en place dans des supports adaptés en fonction des outils utilisés.
- **Les outils**, ce 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 et aux outils de diagraphies de production en prospection pétrolière.
- **Un système d'enregistrement**, l'avancement du film ou du papier était synchrone du déroulement du câble et l'enregistrement se faisait en fonction de la profondeur. Dorénavant un enregistreur digital est utilisé.

## 5 *Présentation d'une diagraphie*

La présentation est très importante. 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 ces coordonnées ;
- L'outil utilisé ;
- Tous les autres logs enregistrés en même temps, c'est-à-dire 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 avec ses caractéristiques, densité, viscosité, PH, etc. ;
- Source sample = l'endroit où l'on a prélevé l'échantillon de boue, généralement à la dernière circulation dans le bac à boue ;
- Rm (de m = mud = boue) = résistivité de la boue ;
- Rmf (mud filtrate) = résistivité du filtrat ;
- Rmc (mud cake) = résistivité du mud cake.

Exemple de présentation d'une diagraphie

DATE : LOG :

COMPAGNIE :

FORAGE N° : Coordonnées : Pays :

Altitude :

Opérateur :

Origine des profondeurs :

Profondeur du forage :

Diamètre du forage :

Tubage :

Nature de la boue : Provenance de l'échantillon :

Densité : Viscosité :

R<sub>m</sub> : à T :

R<sub>mf</sub> : à T :

Roc : à T :

Température du fond du trou (B.H.T.) :

Température de surface :

Temps après la dernière circulation :

Autres logs effectués :

Echelle verticale choisie :

Vitesse d'enregistrement :

Remarques :

Time since last circulation = temps qui s'est écoulé après la dernière circulation jusqu'à l'enregistrement du log

Permanent datum = niveau de référence

Casing = tubage

KB= Kelly bush

## 6 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 suivante (Voir Fig. 1.5) 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 Fig. 1.6), 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. 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. Pour la même quantité d'eau,  $d_i$  sera plus petit si la porosité est forte.

Si l'on exprime  $d_i$  en fonction du diamètre  $d$  du sondage, on peut dire que pour les boues habituelles

$$d_i < 2d \text{ pour les sables très poreux.}$$

$d_i < 5$  à  $10d$  pour les formations à faible porosité comme les grès et les calcaires consolidés.

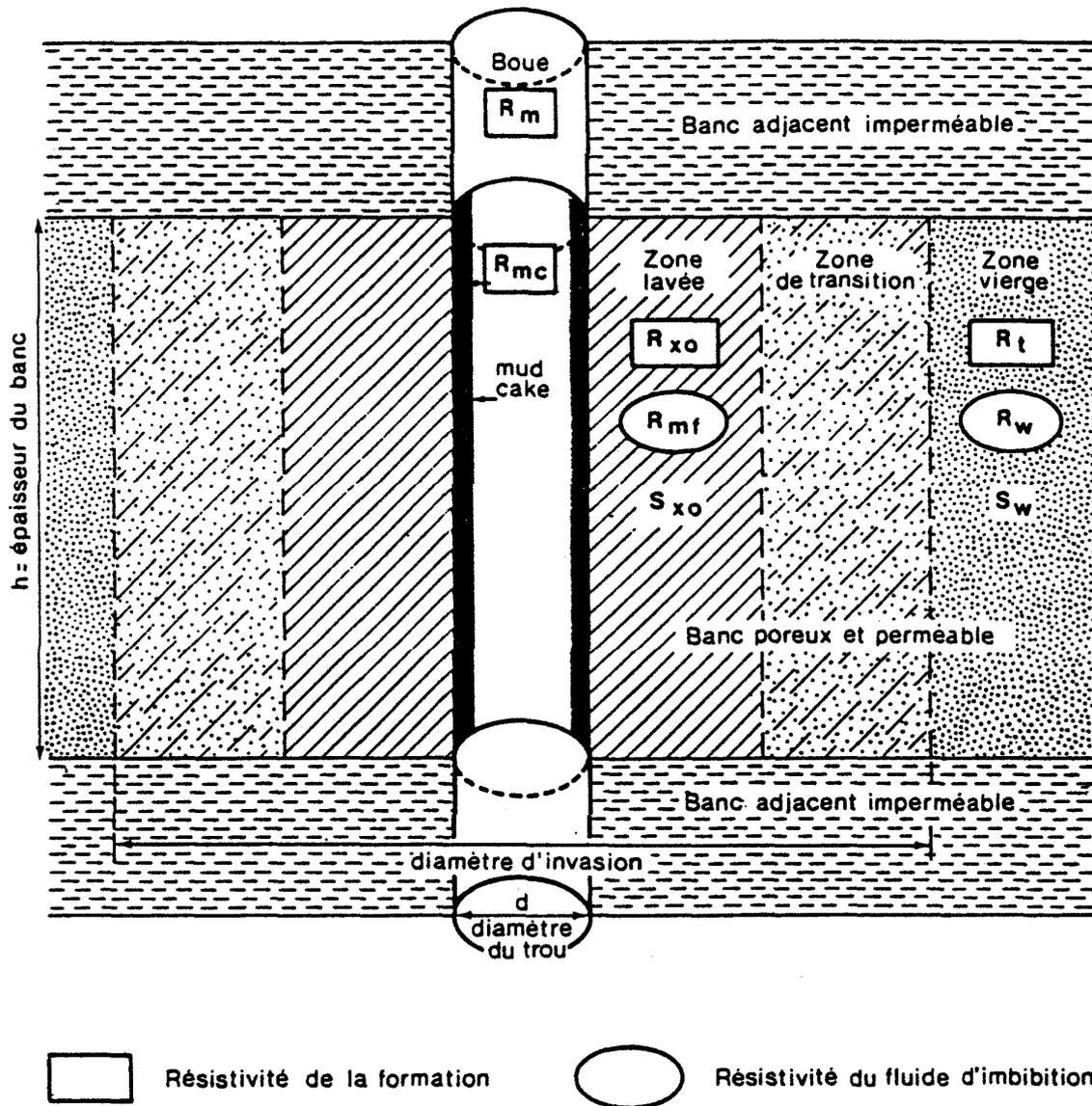
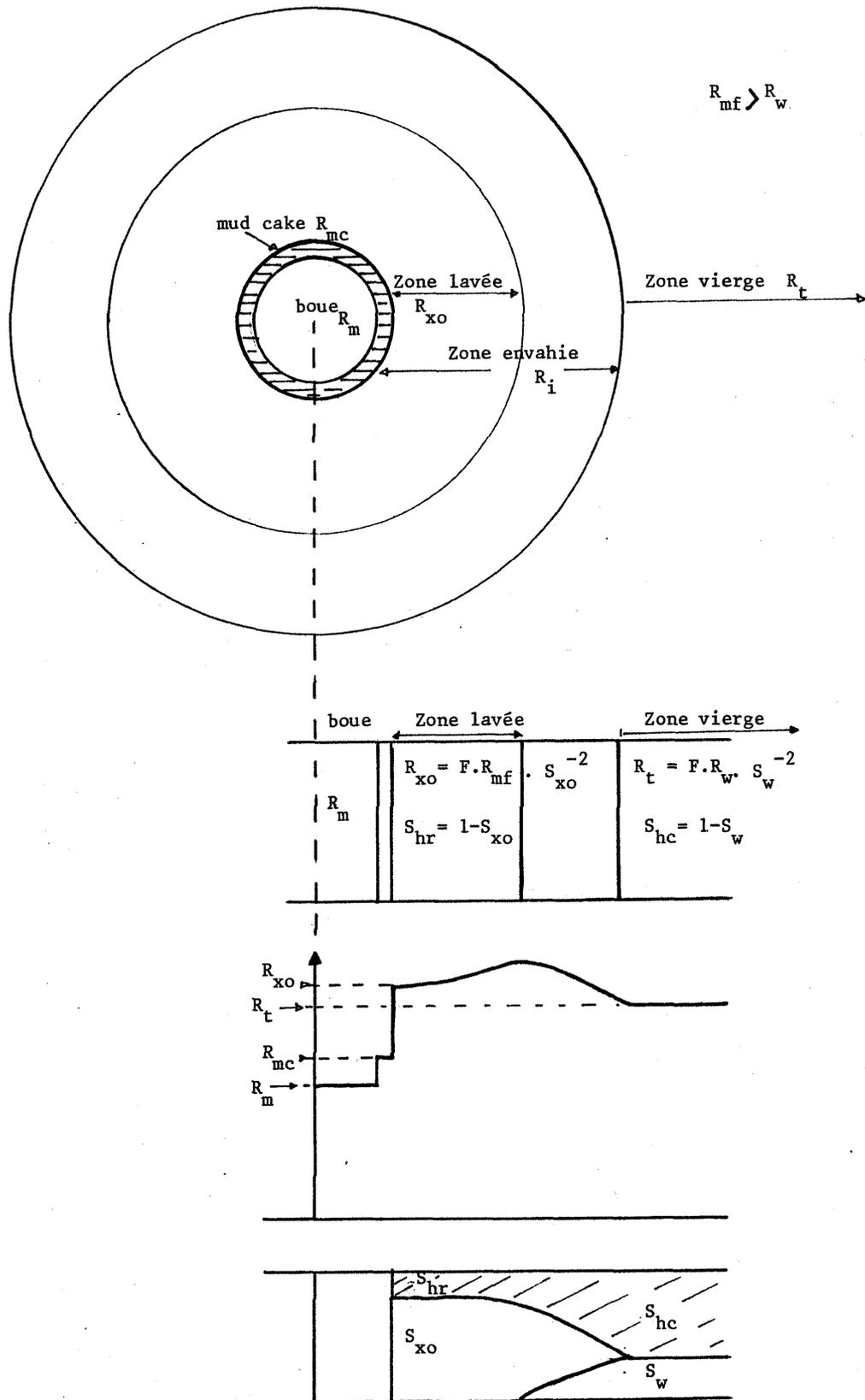


Figure 1.5 : Représentation schématique de l'invasion.



FORMATION CONTENANT DE L'EAU ET DES HYDROCARBURES

Figure 1.6 : Représentation schématique de la zone envahie.

## LISTE DES TERMES UTILISES EN DIAGRAPHIES

BHT	Température du fond du trou en °C ou °F
T <sub>f</sub>	Température de la formation en °C ou °F
TD	Profondeur totale en mètres ou pieds
d	Diamètre du trou en inches ou cm
D <sub>i</sub>	Diamètre moyen de la zone envahie en inches ou cm
R <sub>m</sub>	Résistivité de la boue en ohms.m
R <sub>mc</sub>	Résistivité du mud-cake en ohms.m
R <sub>mf</sub>	Résistivité du filtrat en ohms.m
R <sub>w</sub>	Résistivité de l'eau d'imbibition en ohms.m
R <sub>t</sub>	Résistivité vraie de la formation vierge en ohms.m
R <sub>O</sub>	Résistivité vraie d'une formation saturée en eau en ohms.m
R <sub>XO</sub>	Résistivité de la zone lavée en ohms.m
F	Facteur de formation sans unité
φ	Porosité effective en %
S <sub>w</sub>	Saturation en eau dans la zone vierge en %
S <sub>XO</sub>	Saturation en filtrat dans la zone lavée en %
S <sub>hr</sub>	Saturation en hydrocarbures résiduels en %
S <sub>hc</sub>	Saturation en hydrocarbures en %
ΔT	Temps de transit en microsec/pied
ρ <sub>b</sub>	densité de la formation en g/cm <sup>3</sup>
ρ <sub>ma</sub>	densité de la matrice en g/cm <sup>3</sup>
ρ <sub>f</sub>	densité du fluide en g/cm <sup>3</sup>
cps	coups par seconde
cpm	coups par minute

## Chapitre 2 LA RESISTIVITE

### 1 *Rappel*

Parmi les paramètres mesurés par les outils de diagraphies il en est un qui intervient à maintes reprises : **la résistivité électrique des roches**. Elle est, dans la plupart des cas, de type électrolytique, c'est à dire que les roches conduisent le courant électrique grâce au fluide qu'elles contiennent. On peut dire que la résistivité électrique d'une roche dépend essentiellement :

- **De la qualité** de l'électrolyte, c'est à dire de la résistivité du fluide d'imbibition  $R_w$  et, par conséquent, de la quantité de sels dissous.
- **De la quantité** d'électrolyte contenue dans l'unité de volume de la roche, c'est à dire de la porosité.
- **Du mode de distribution** de l'électrolyte.

### 2 *La qualité de l'électrolyte*

La résistivité d'un électrolyte dépend de : **sa teneur en ions**, et de **la mobilité des ions** en solution. Or la mobilité varie, il en résulte que la résistivité d'une eau dépend non seulement de la quantité de sels dissous, mais encore de leur nature. La quantité de sels en solution s'exprime en grammes par litre  $1\text{g/l} = 1000\text{ ppm}$ ,  $1\text{ mg/l} = 1\text{ ppm}$ .

Pour caractériser une eau on utilise souvent la notion de **salinité équivalente**. C'est la salinité en NaCl qui provoquerait une résistivité égale à celle de l'eau considérée.

La contribution d'un sel à la résistivité d'une solution dépend de la concentration de ce sel et de la salinité totale. Si l'on connaît la salinité d'une eau et sa composition on peut, grâce à **l'abaque 2** obtenir les coefficients qui permettront de passer de divers sels à l'équivalent NaCl.

Il est malheureusement impossible de connaître la composition chimique d'une eau en partant de sa résistivité. Cependant il existe un abaque, **abaque 1**, qui permet, à partir de la valeur de la résistivité, de trouver la salinité, en **équivalent NaCl**, d'une solution.

La résistivité d'un électrolyte dépend aussi de sa température. Une augmentation de la température diminue la résistivité. L'**abaque 1** permet d'obtenir la résistivité d'une solution pour une température et une salinité NaCl donnée.

### 3 *La quantité et le mode de distribution de l'électrolyte*

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 ;

$\emptyset$  = 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.

On a l'habitude de regrouper sous le terme **Facteur de formation F** ce qui caractérise la structure de la roche.

$$F = a \cdot \emptyset^{-m}$$

L'expression de la loi d'Archie pour une roche saturée en eau devient alors :

$$R_t = F \cdot R_w$$

L'**abaque 3** permet à partir de la valeur de la porosité, d'obtenir la valeur de **F** et vice versa. ceci pour diverses relations. Ces relations expérimentales sont relativement rigoureuses lorsqu'il s'agit de **formations propres** c'est-à-dire dépourvues d'argile. En présence d'argile il faudra faire intervenir des corrections.

#### **4 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.

#### **5 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.

En général on utilise pour l'exécution des forages de l'eau prélevée dans les rivières voisines, cette eau est très généralement plus résistante que l'eau de formation qui imbibe les roches forées.

On peut alors écrire :

$R_{mf} > R_w$  ce qui entraîne  $R_{XO} > R_t$ .

## 6 *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

résistivité de la roche dans la zone saturée en eau

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{R_o}{R_t}}$$

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 :

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

Et pour la zone lavée :

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

Avec  $S_{XO}$  = saturation en filtrat et  $S_w$  = saturation en eau. On définit aussi  $S_{HC}$  = saturation en hydrocarbures dans la zone vierge et  $S_{hr}$  = saturation en hydrocarbures résiduels dans la zone lavée.

$S_{XO} + S_{hr} = 1$  dans la zone lavée et  $S_w + S_{HC} = 1$  dans la zone vierge.

## 7 *Conclusions*

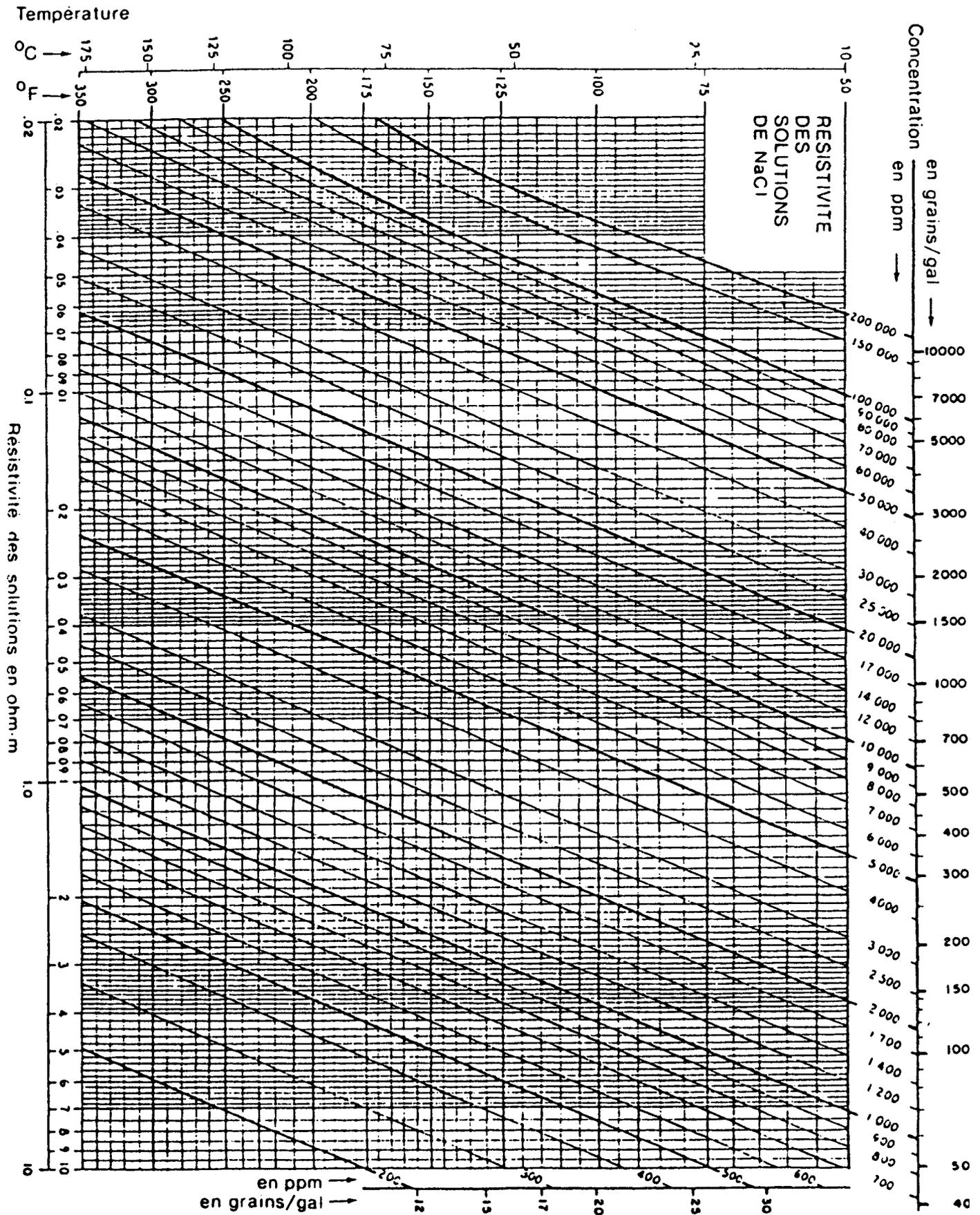
Il résulte de ce que nous venons de voir que les résistivités électriques mesurées dépendent pour une part des conditions géologiques naturelles et pour une part de l'action des fluides de forage.

La boue et son filtrat sont pris en compte dans la plupart des mesures. L'invasion de la zone lavée ajoute aux déductions que l'on peut tirer de nos mesures (Abaque 4).

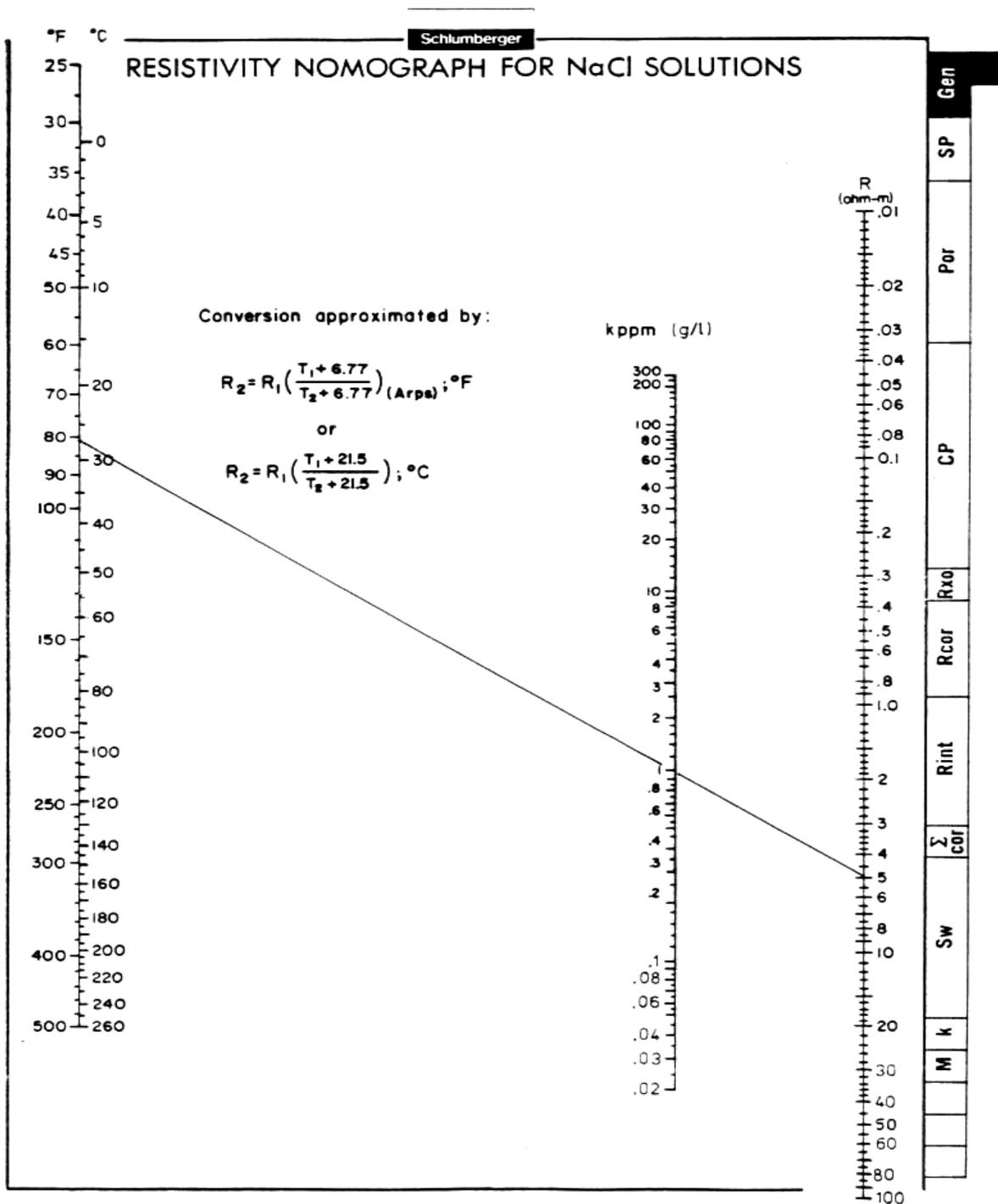
Il est indispensable, lorsque l'on désire interpréter quantitativement les mesures, **de connaître toutes les caractéristiques de la boue utilisée**. Un abaque permet lorsque l'on connaît la résistivité de la boue d'en déduire la résistivité du mud cake et celle du filtrat. On peut aussi appliquer la relation approximative suivante :

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

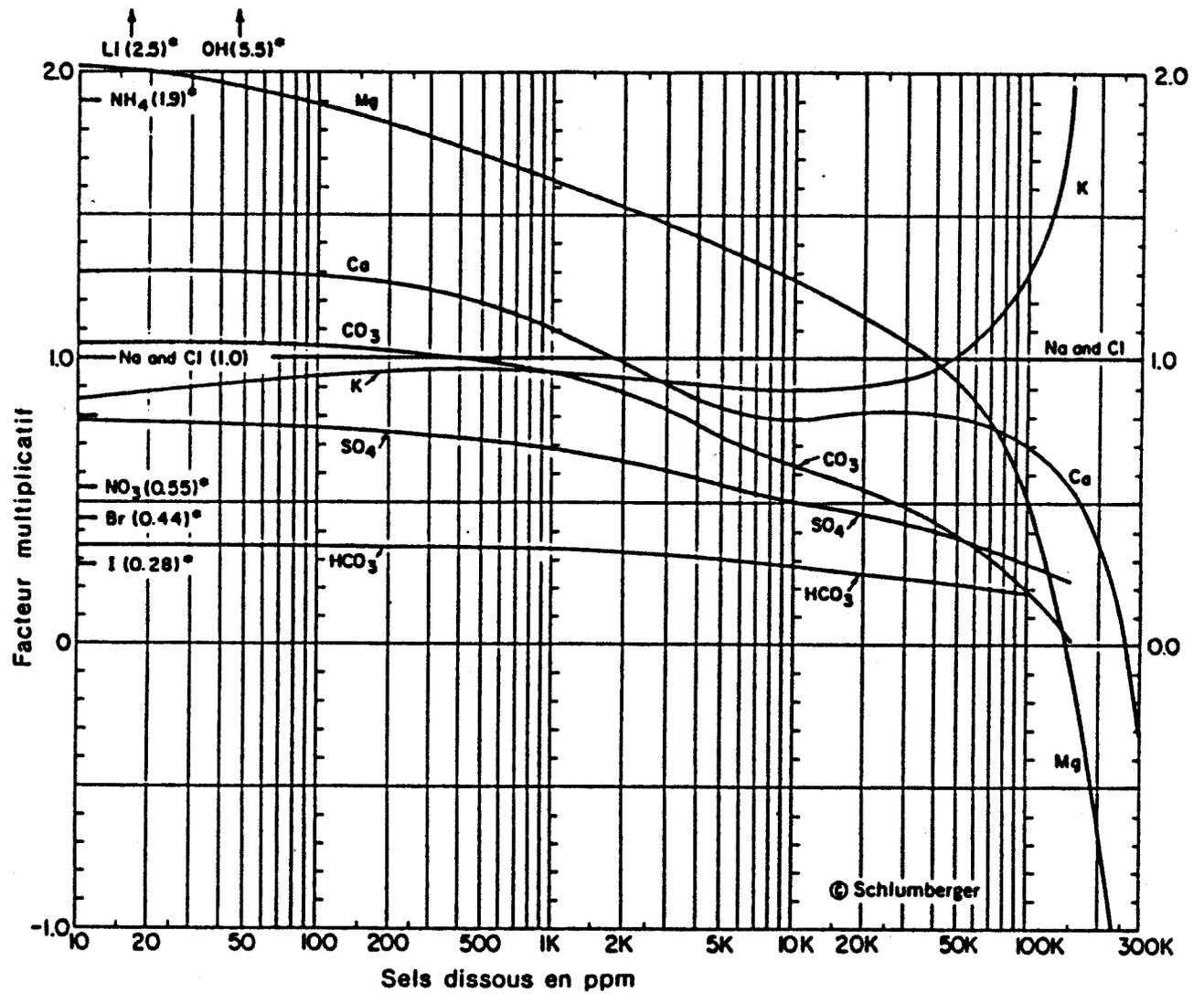
Lors des interprétations quantitatives, il ne faut pas oublier de ramener les diverses résistivités  $R_m$ ,  $R_{mf}$ ,  $R_{mc}$ ,  $R_t$ , etc. à la température de la formation considérée.



Abaque 1 : Résistivité - Température – Salinité.



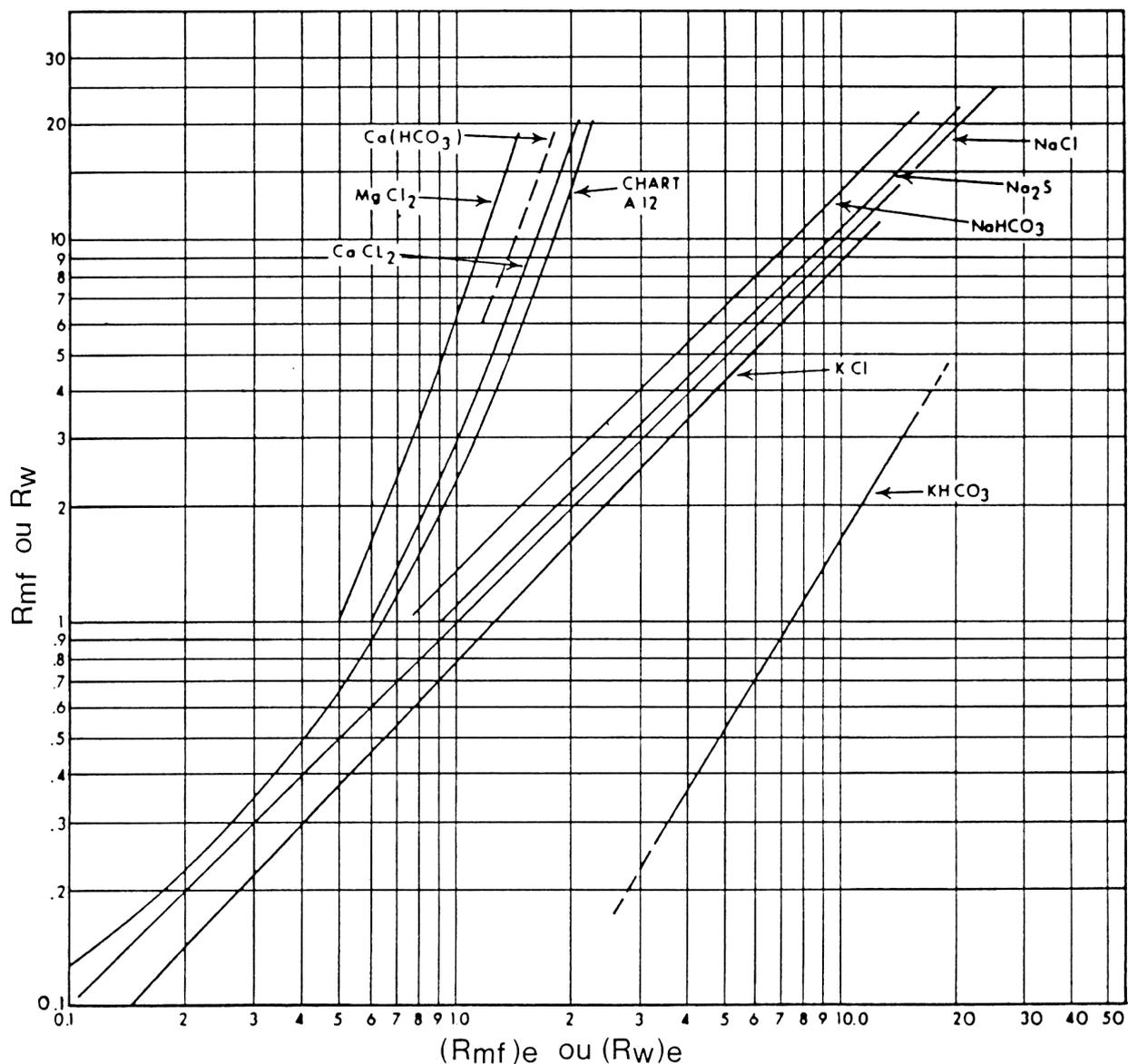
Abaque 1 bis : Résistivité – Température – Salinité.



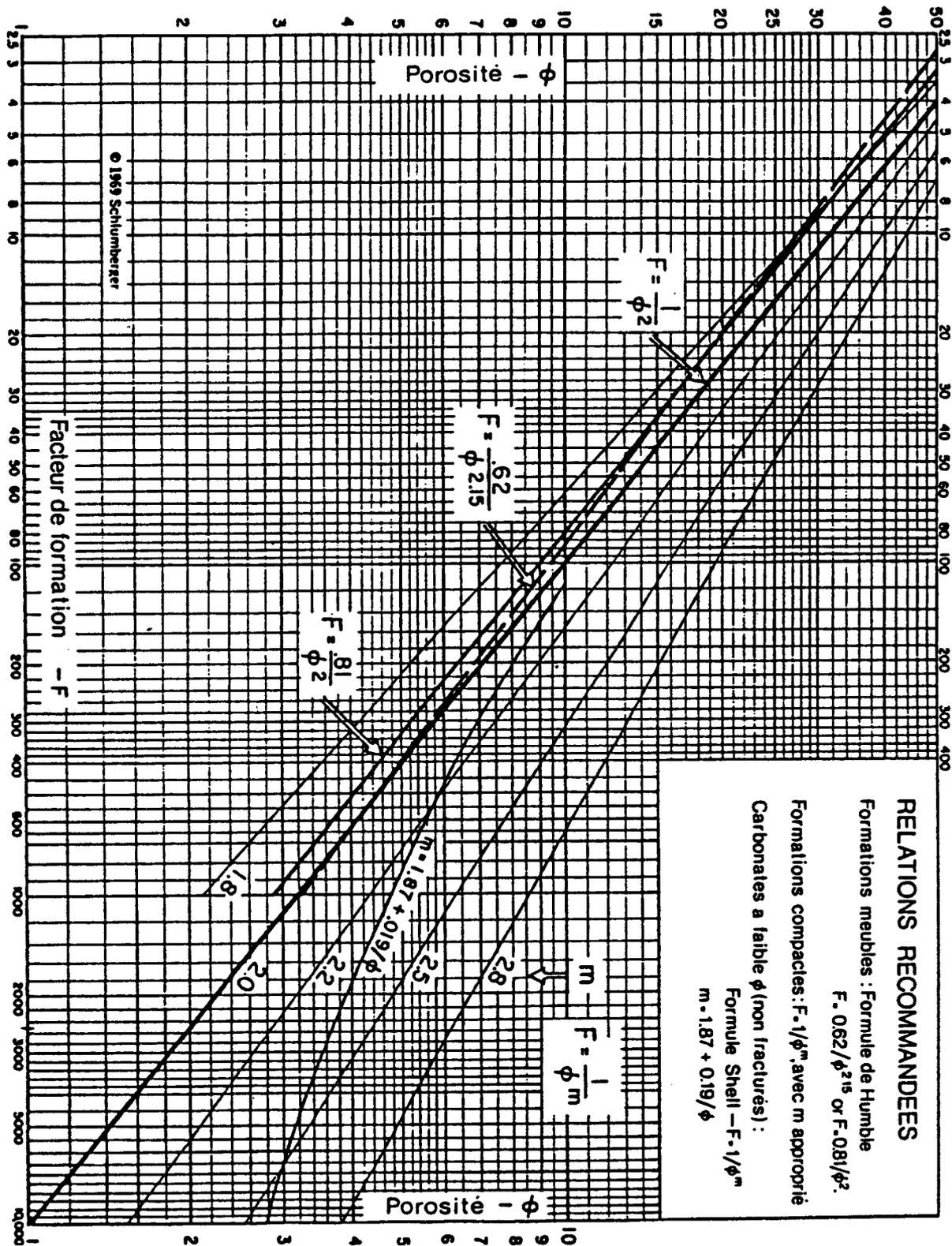
Exemple de calcul:

Ions	Concentration en ppm	facteur correctif	équivalent NaCl en ppm
Na <sup>+</sup>	10	1	10
Ca <sup>++</sup>	3	1,3	3,9
Mg <sup>++</sup>	0,8	1,95	1,56
Cl <sup>-</sup>	6	1	6
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	29,3	0,35	10,25
<b>Salinité</b>	<b>49,1</b>	<b>Salinité en équivalent NaCl</b>	<b>31,71</b>

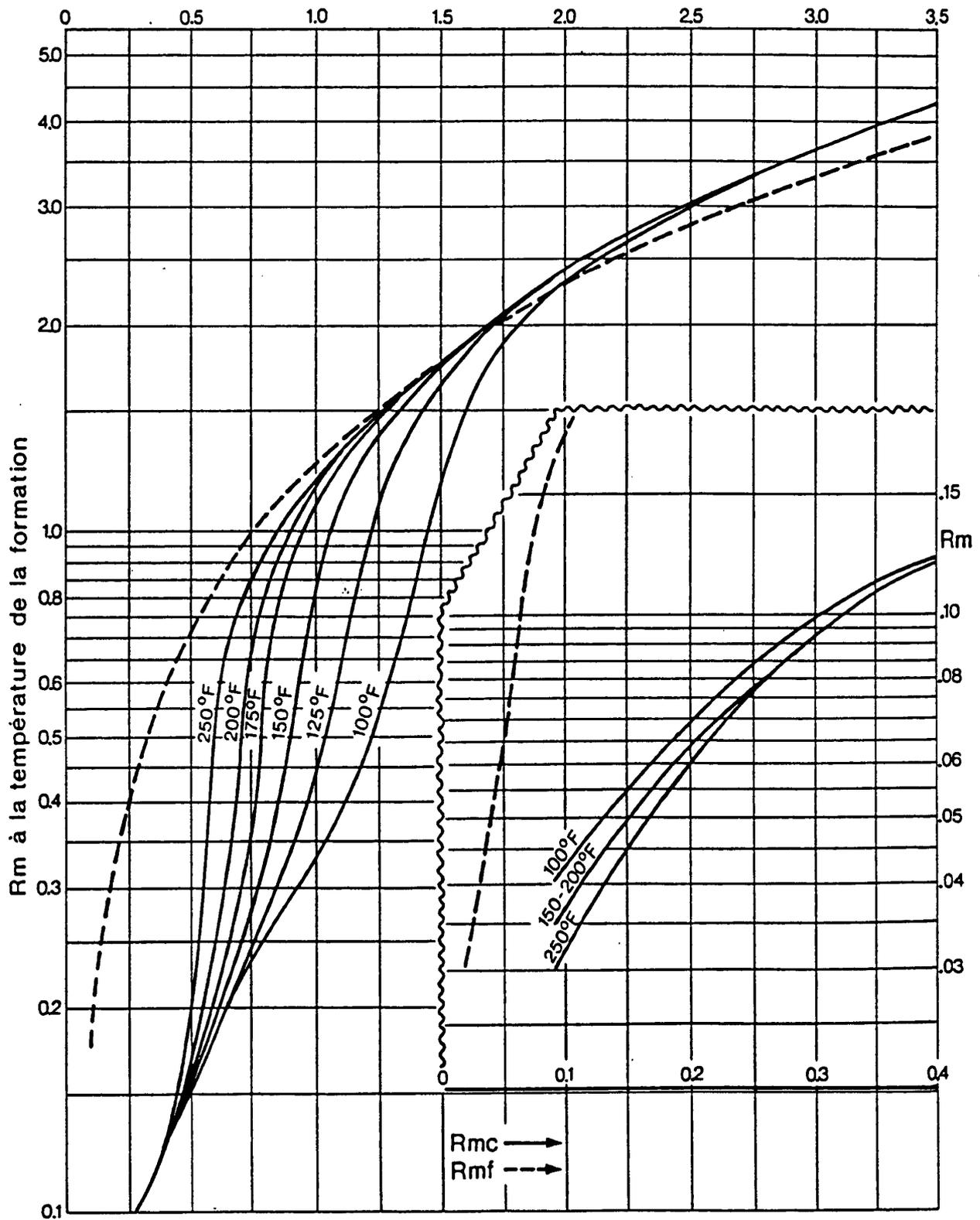
Abaque 2 : Résistivité des filtrats et des eaux de formations.



**Abaque 2 bis : Résistivité équivalente et normale des solutions ioniques.**



Abaque 3 : Porosité - Facteur de formation (Attention dans la formule de Shell :  $m=1.87+0.019/\phi$  et non pas  $m=1.87+0.19/\phi$ ).



Abaque 4 : Détermination de  $R_{mf}$  et  $R_{mc}$ .

**T. P. Résistivité 1**

- 1 La température de surface est de 80 °F. BHT = 180 °F et TD = 10'000 pieds. Profondeur de la formation 6'000 pieds.

Quelle est la température de la formation ?

- 2 Une boue a une résistivité de 1.2 Ohm.m à 75 °F.

Quelle est sa résistivité si la température est de 160 °F ?

- 3  $R_{mf} = 2.0$  Ohm.m à 70 °F. La salinité de l'eau d'imbibition est de 30'000 ppm de NaCl.

Il s'agit d'un carbonat à 15 % de porosité.

La température de la formation est de 180 °F.

Si l'on admet que la saturation  $S_w = 1$  et  $S_{xo} = 1$ ,

Quelle est la valeur de  $R_t$  et  $R_{xo}$  ?

Si l'on admet que la saturation n'est plus égale à 1 et que la résistivité de la zone lavée est  $R_{xo}$  est de 100 Ohm.m,

Quelle est la valeur de  $S_{xo}$  ?

- 4 On vous donne sur le puits la résistivité de la boue  $R_m = 2.7$  Ohm.m à 75 °F.

Quelle est la résistivité de cette boue à la profondeur de 12'000 pieds sachant que BHT = 360 °F et que TD = 18'000 pieds ?

- 5 Un échantillon d'eau d'un puits est analysé et contient 90'000 ppm de NaCl.

Quelle est la résistivité de  $R_w$  si le réservoir est à une de 175 °F ?

- 6 Soit une formation gréseuse de porosité 12 %.  $R_w = 0.1$  Ohm.m et  $R_{mf} = 1$  Ohm.m.

Si la zone est une zone saturée en eau, quelle est la valeur de  $R_{xo}$  et  $R_t$  ?

Si maintenant vous êtes, pour la même formation, dans une zone sous-saturée en eau et que  $R_{xo} = 100$  Ohm.m et  $R_t = 90$  Ohm.m, calculer alors  $S_w$  et  $S_{xo}$ .

## Chapitre 3 LE LOG P.S.

### 1 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.

### 2 Le paramètre enregistré - cas général

#### 2.1 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.

#### 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 (Voir Fig. 3.1).

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.

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

Lorsqu'il s'agit de solutions de NaCl, ce potentiel est relié à la résistivité des solutions par la relation :

$K_1 = 59$  pour des solutions de NaCl à 25 °C.

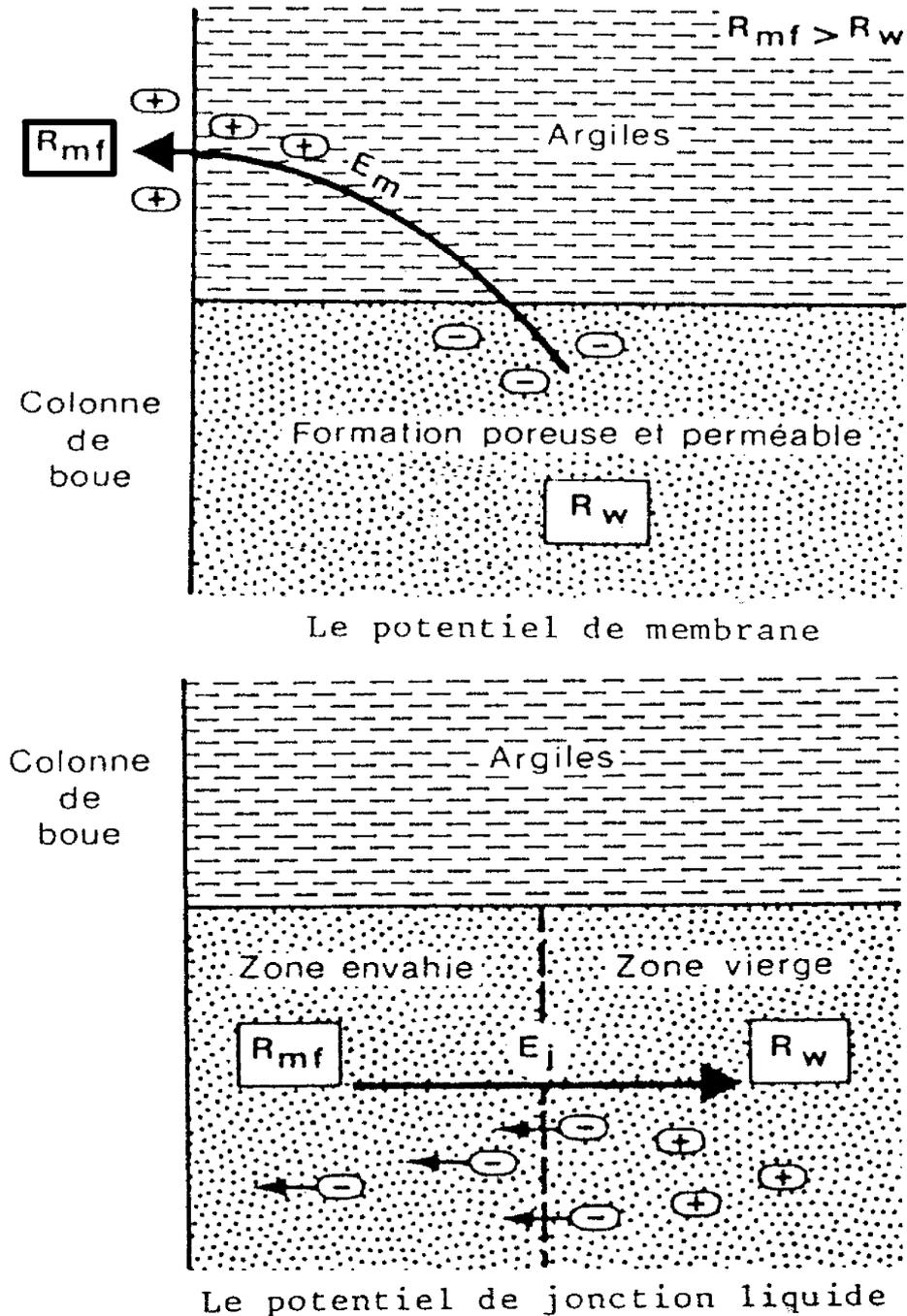


Figure 3.1 : Origine de la polarisation spontanée.

### 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.

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

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.

Avec  $K_2 = 11,6$  pour des solutions de NaCl à 25° C

### 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, le circuit se fermant par la boue. On suppose que la boue est moins saline que l'eau de formation et que par conséquent  $R_{mf} > R_w$  (Voir Fig. 3.2).

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 :

$$\text{Valeur de la déflexion PS} = -K \cdot \text{Log} \left( \frac{R_{mf}}{R_w} \right)$$

$R_{mfe}$  = 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.

## 3 La mesure

### 3.1 La mise en oeuvre

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. 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.

### 3.2 Facteurs parasites

Divers facteurs parasites peuvent affecter les mesures, ce sont :

- **La nature des électrodes** : On sait que des électrodes métalliques plongées dans un liquide se chargent d'un potentiel caractéristique du métal utilisé.
- Les mesures P.S. portent sur des valeurs relatives et non absolues; la grandeur du potentiel d'électrode importe peu, pourvu qu'il demeure stable. Il faut donc choisir un métal atteignant très rapidement son équilibre électrochimique. Le plomb est généralement utilisé pour construire les électrodes. Par ailleurs, pour éviter une trop grande dissymétrie entre les deux électrodes, on plonge l'électrode de référence dans le bac à boue qui contient le même liquide que le trou. Les deux électrodes sont ainsi placées dans le même environnement.
- **La dérive de la référence** : Il peut se faire qu'au cours du temps les conditions autour de la référence changent, on voit apparaître alors une dérive des mesures qui se surimposant au log P.S. rend l'interprétation difficile. Pour contrôler la stabilité relative des deux électrodes on peut, par exemple, avant l'enregistrement, immobiliser la sonde au fond du trou et observer l'enregistreur. Si la valeur mesurée n'est pas stable, il est indispensable d'améliorer la référence.
- **Des courants parasites** : Où que l'on soit, on peut observer des courants électriques faibles et variables parcourant le sous-sol. Il s'agit des courants telluriques liés à l'activité solaire. A ces courants naturels s'ajoutent dans les pays industrialisés, des courants d'origine industrielle. Ces courants font apparaître sur le log P.S. des potentiels parasites qui peuvent le rendre inutilisable.

On peut évaluer l'importance des courants parasites en laissant la sonde immobile au fond du trou. La présence de vagabonds gênants se manifeste par des variations rapides et de grande amplitude. Dans ce cas, le log n'est pas significatif, les variations de potentiel lues sur l'enregistrement ne sont pas liées aux seules causes géologiques ; il vaut mieux abandonner cette diagraphie.

## 4 *Interprétation qualitative*

La figure suivante (Voir Fig. 3.3) 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.

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.

### 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 les suivants : (Voir Fig. 3.4, 3.5 et 3.6).

#### 4.1.1 *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 ;

- 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.

#### 4.1.2 *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.

#### 4.1.3 *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.

#### 4.1.4 *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.

#### 4.1.5 *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.

#### 4.1.6 *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.

#### 4.1.7 *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.

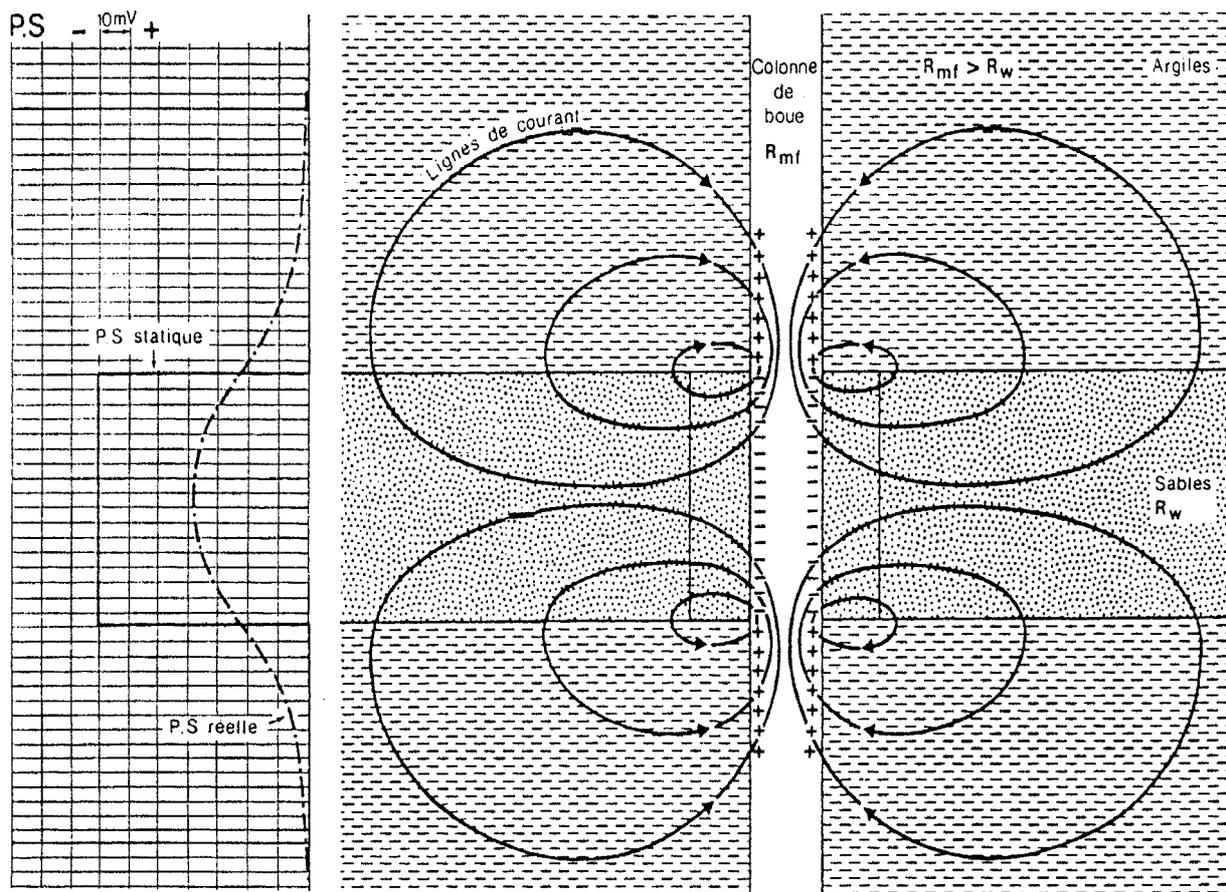


Figure 3.2 : Distribution schématique des courants de P.S.

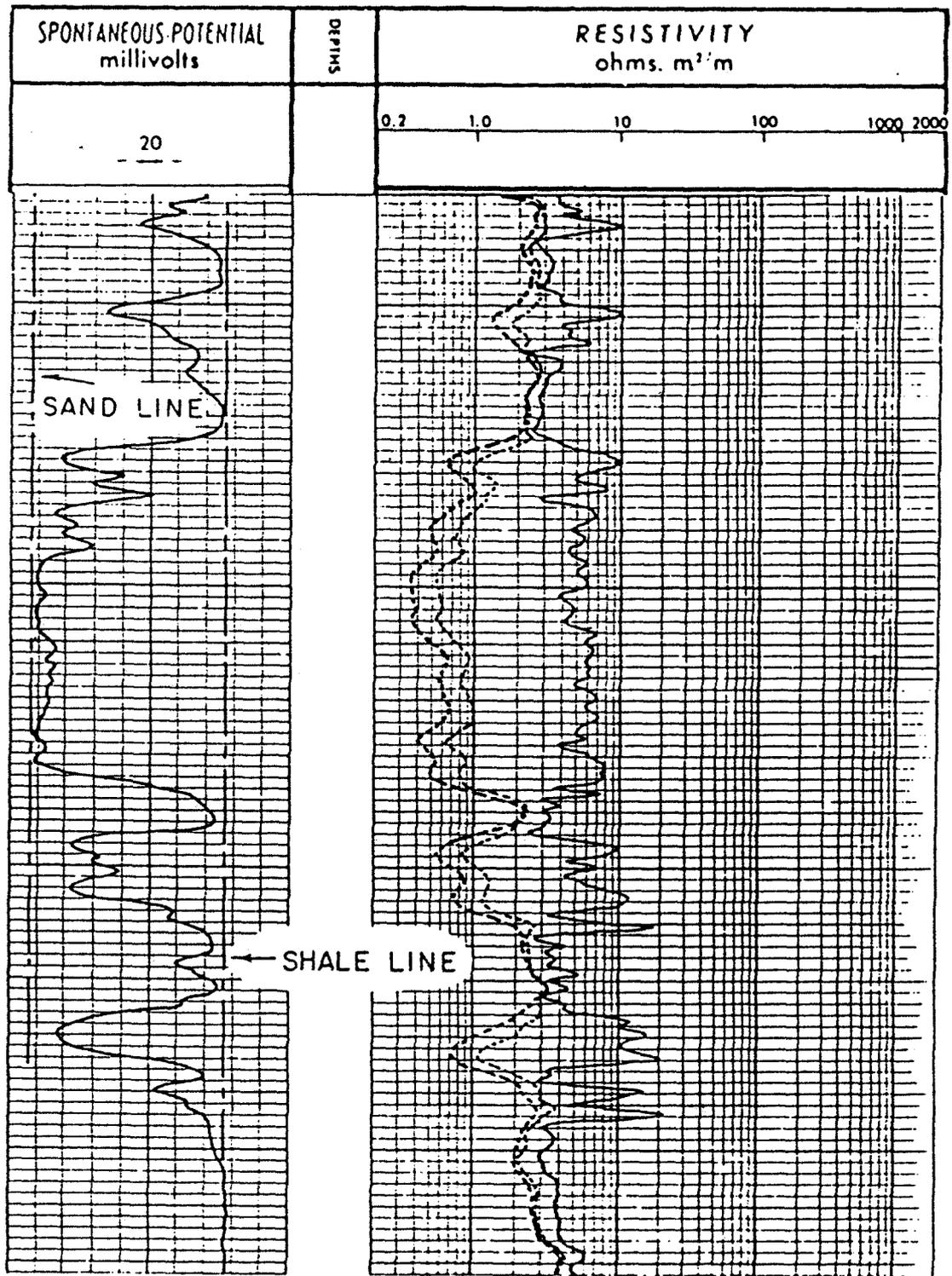


Figure 3.3 : Exemple de P.S. dans une série de sables argileux.

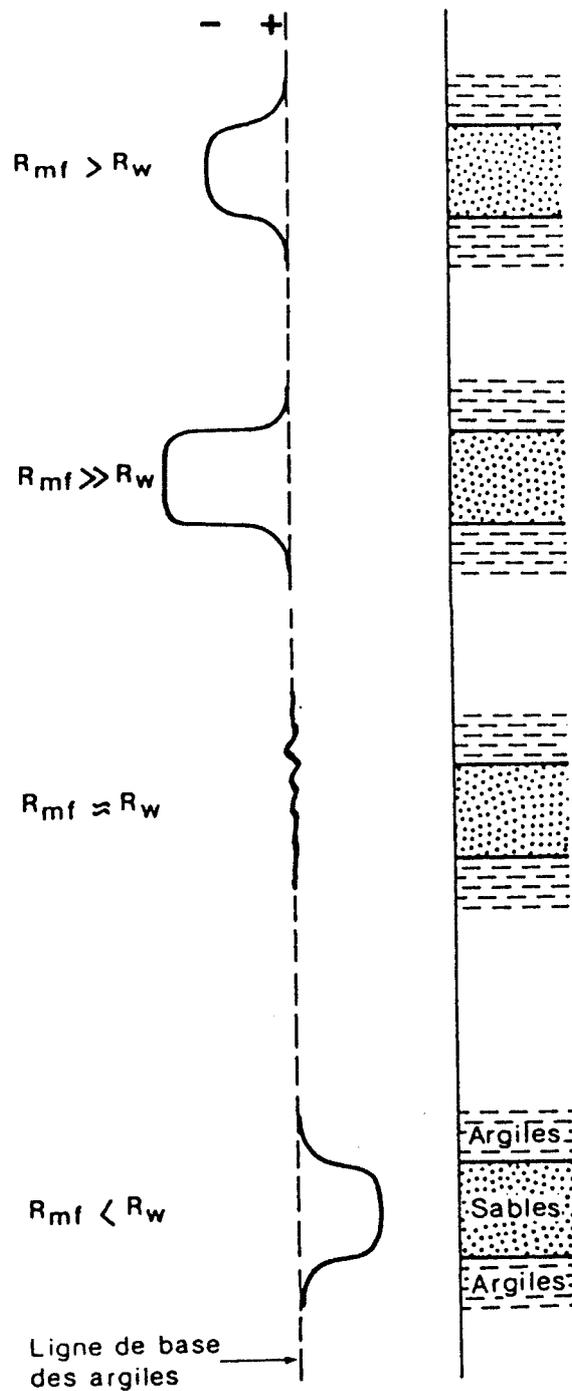


Figure 3.4 : Influence de la salinité.

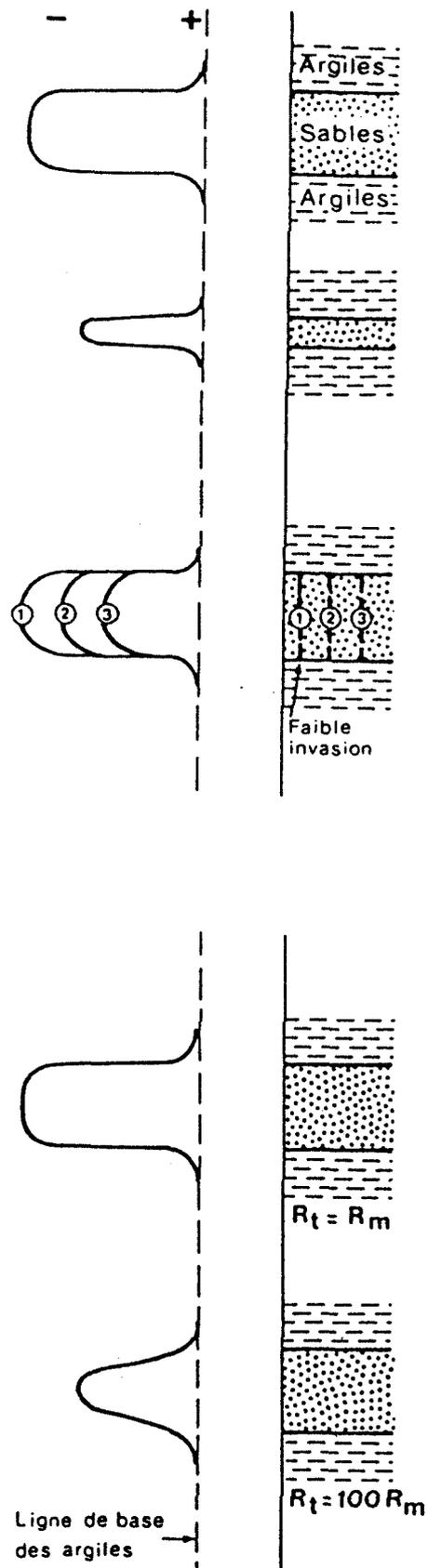
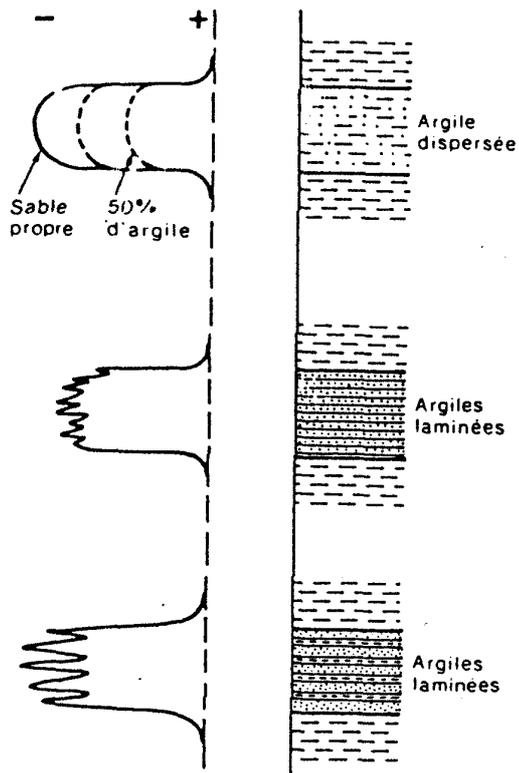


Figure 3.5 : Influence de l'épaisseur de banc et de la résistivité.



. Influence de la présence d'argile

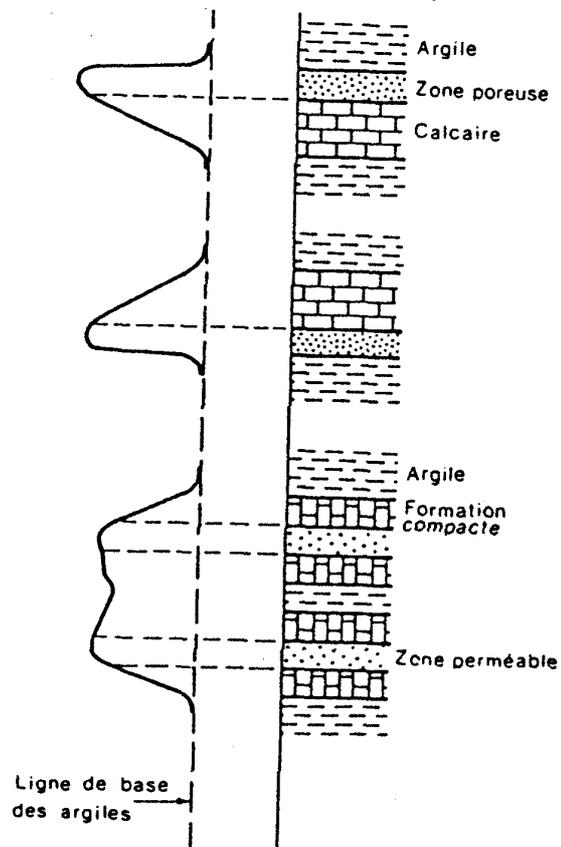


Figure 3.6 : Influence de la présence d'argile et effet des formations compactes.

## 5 *Interprétation quantitative - cas général*

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 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  $R_{mf} > R_w$ .

## 6 *Détermination de $R_w$ à partir de la P.S.*

- Tracer la ligne de base des argiles. Cette ligne de base peut parfois présenter une légère dérive.
- 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.
- Déterminer la température de la formation à la profondeur choisie.
- 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**.
- 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.

## 7 *Calcul du pourcentage d'argile*

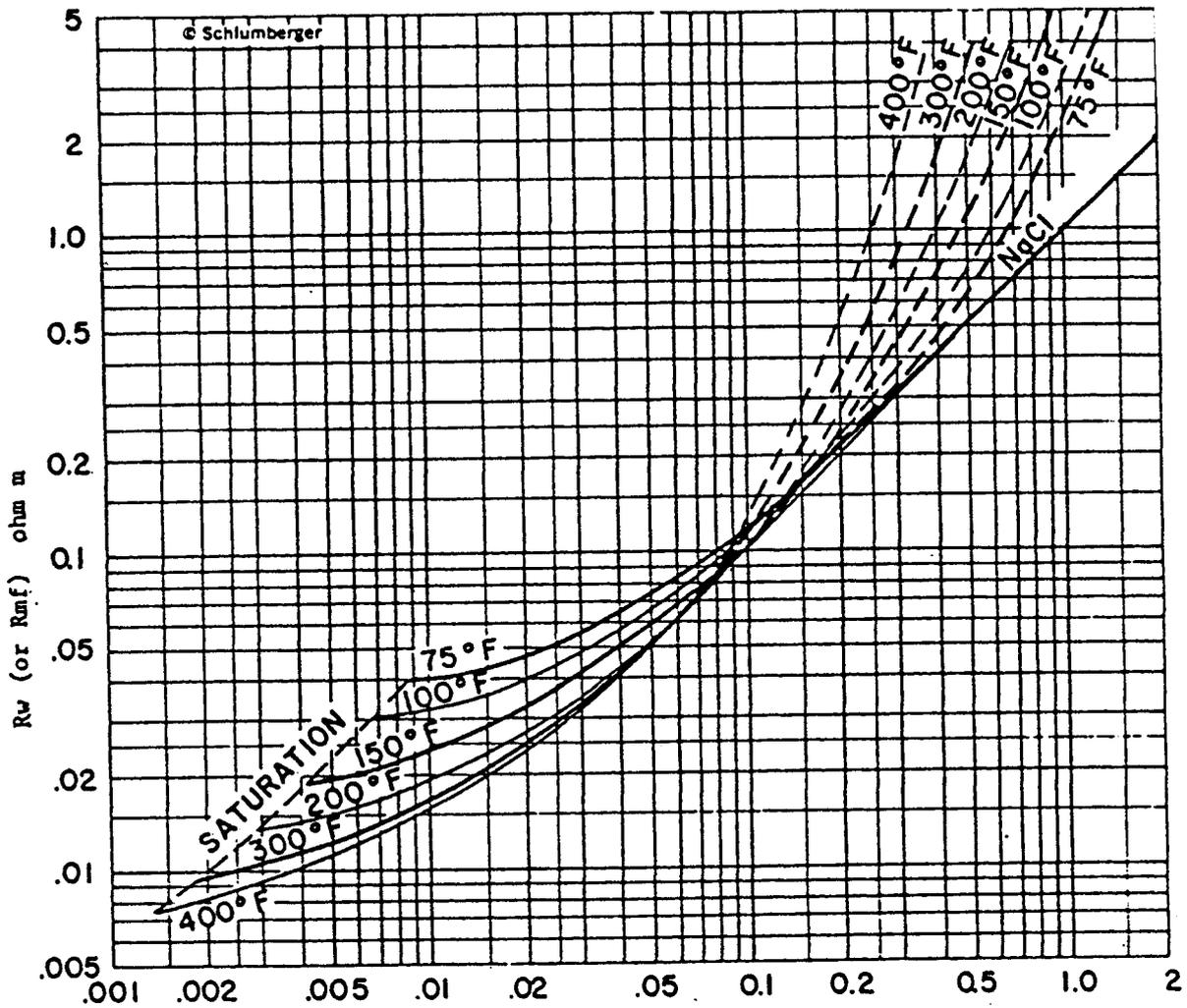
Nous avons vu que l'on peut dans certaines conditions tracer sur le log P.S. la ligne de base des argiles qui correspond à un volume de 100% d'argile. Il est aussi possible de tracer la ligne de base des sables qui représente alors 0% d'argile. Cette particularité permet d'estimer le volume d'argile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

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

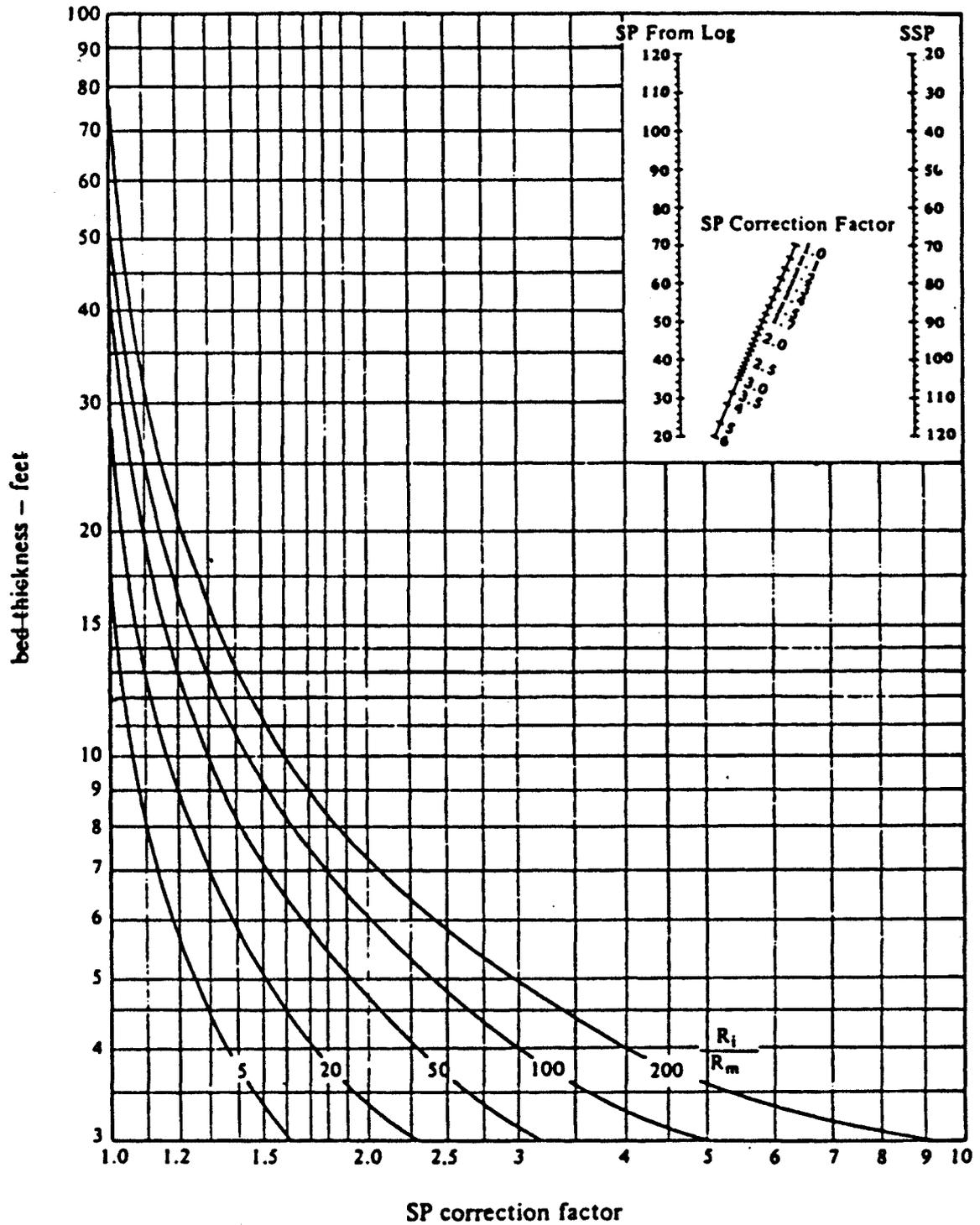
$$V_{sh} = \frac{P.S.S. - P.S. \text{ au point X}}{P.S.S.}$$

$V_{sh}$  = volume d'argile en %

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

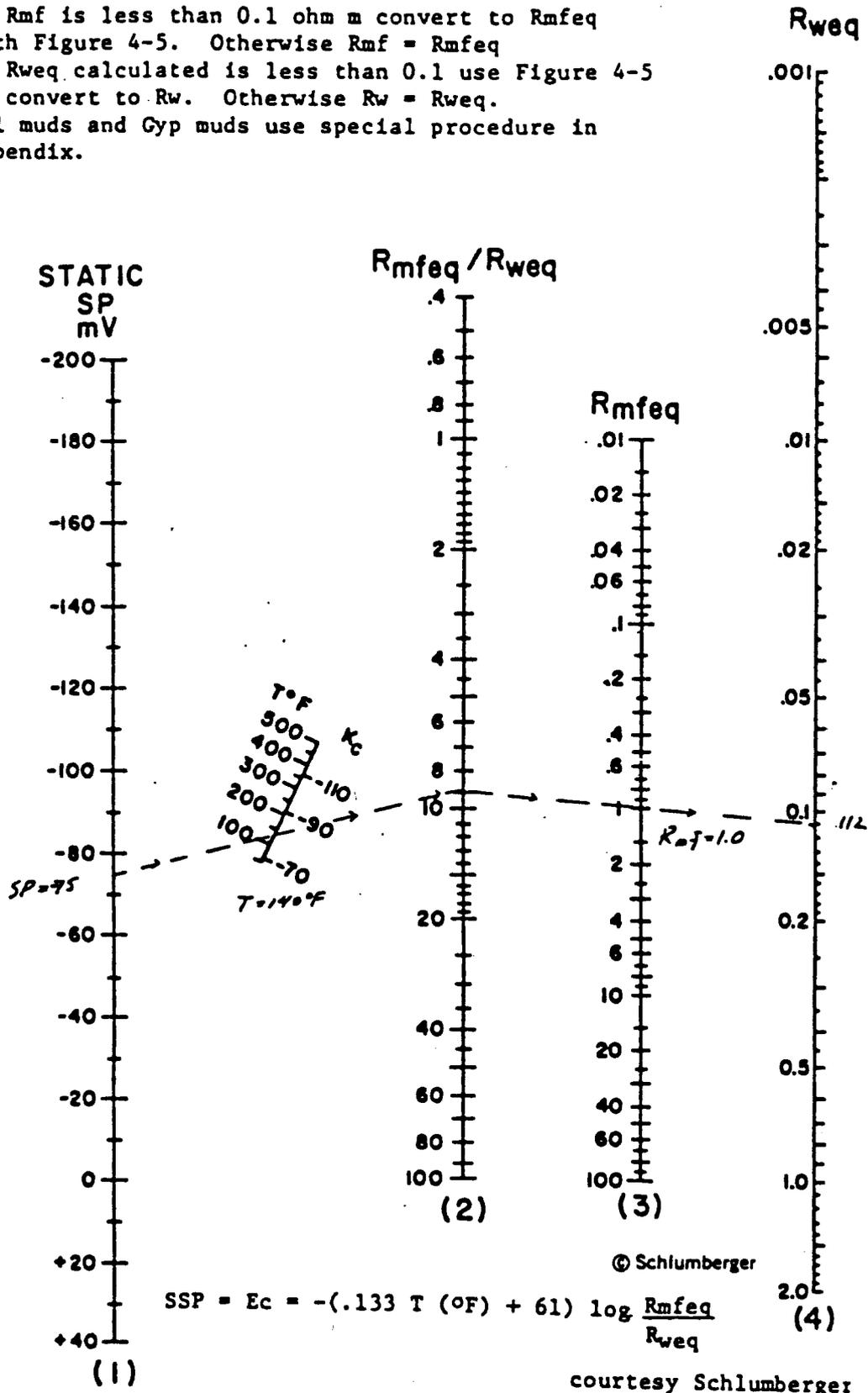


Abaque 5 : Transformation Rweq en Rw et Rmf en Rmf.



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

- 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.



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

Calcul de  $R_w$  à partir de la P.S.

Nom :

Exemple No

Température du fond du trou, BHT :

Température de surface :

Température de la formation :

$R_{mf}$  à la température de surface :

$R_{mf}$  à la température de la formation :

$R_m$  à la température de surface :

$R_m$  à la température de la formation :

Valeur de la déflexion P.S. lue sur le log :

Épaisseur du banc :

Valeur de  $R_i$  lue sur la courbe normale :

Facteur de correction (abaque 5) :

Valeur de la déflexion P.S. corrigée :

$R_{we}$  : (abaque 6)

$R_w$  :

Salinité en équivalent NaCl :

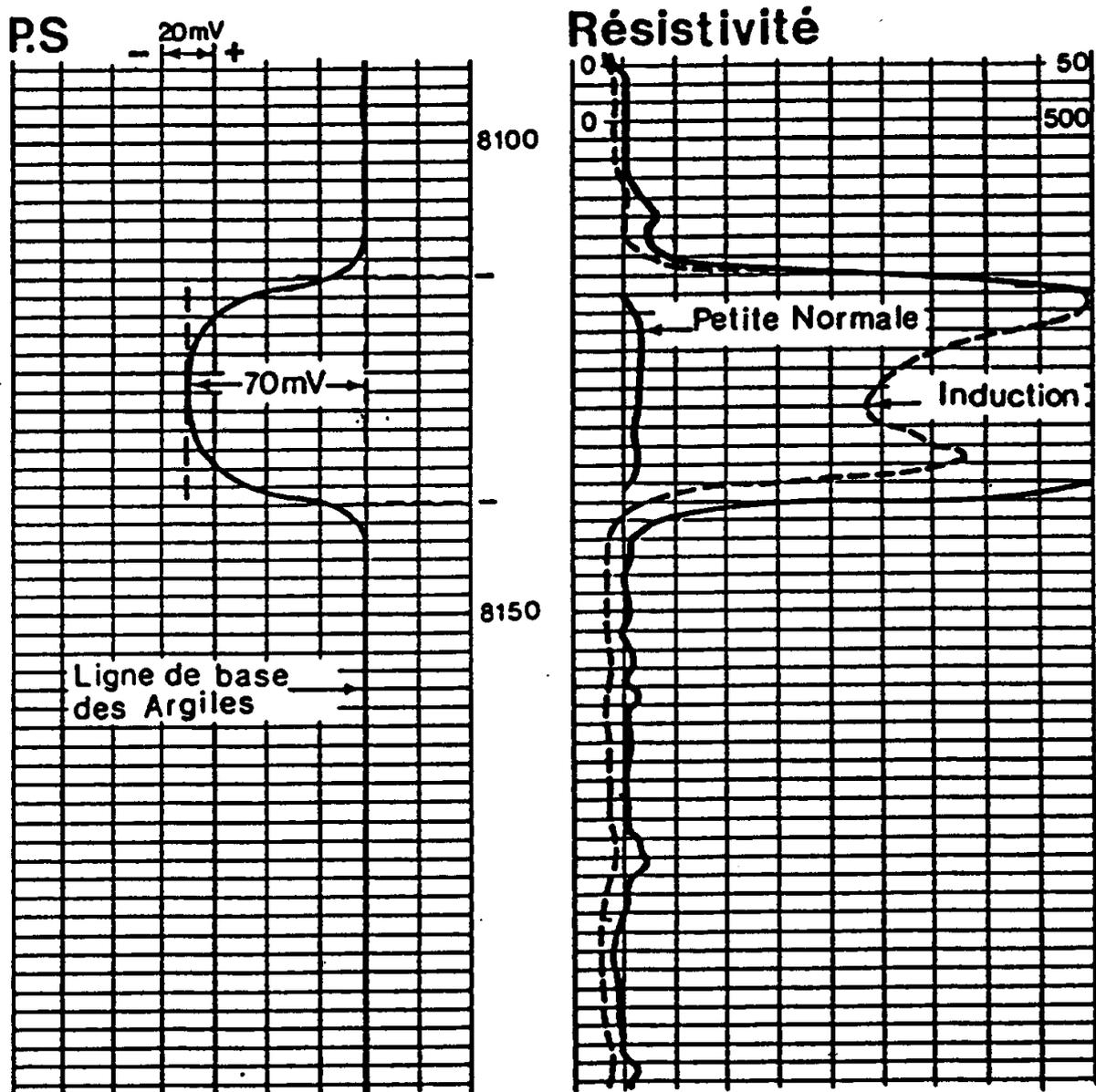


Figure 3.7 : Exemple de log P.S.  $R_{mf} = 2 \text{ Ohm.m @ } 70^\circ\text{F}$ ,  $R_m = 2.5 \text{ Ohm.m @ } 70^\circ\text{F}$ ,  
 Température de surface =  $60^\circ\text{F}$ , BHT =  $164^\circ\text{F}$ , Profondeur du forage = 10'500 ft.

**T.P. P.S. 1**

Calculer  $R_w$  sachant que :

Déflexion P.S. = 55 mV

$R_i = 100 \text{ Ohm.m}$

Epaisseur du banc = 12 pieds

Profondeur de la formation = 350 pieds

Profondeur totale = 400 pieds

Température BHT = 140 °F

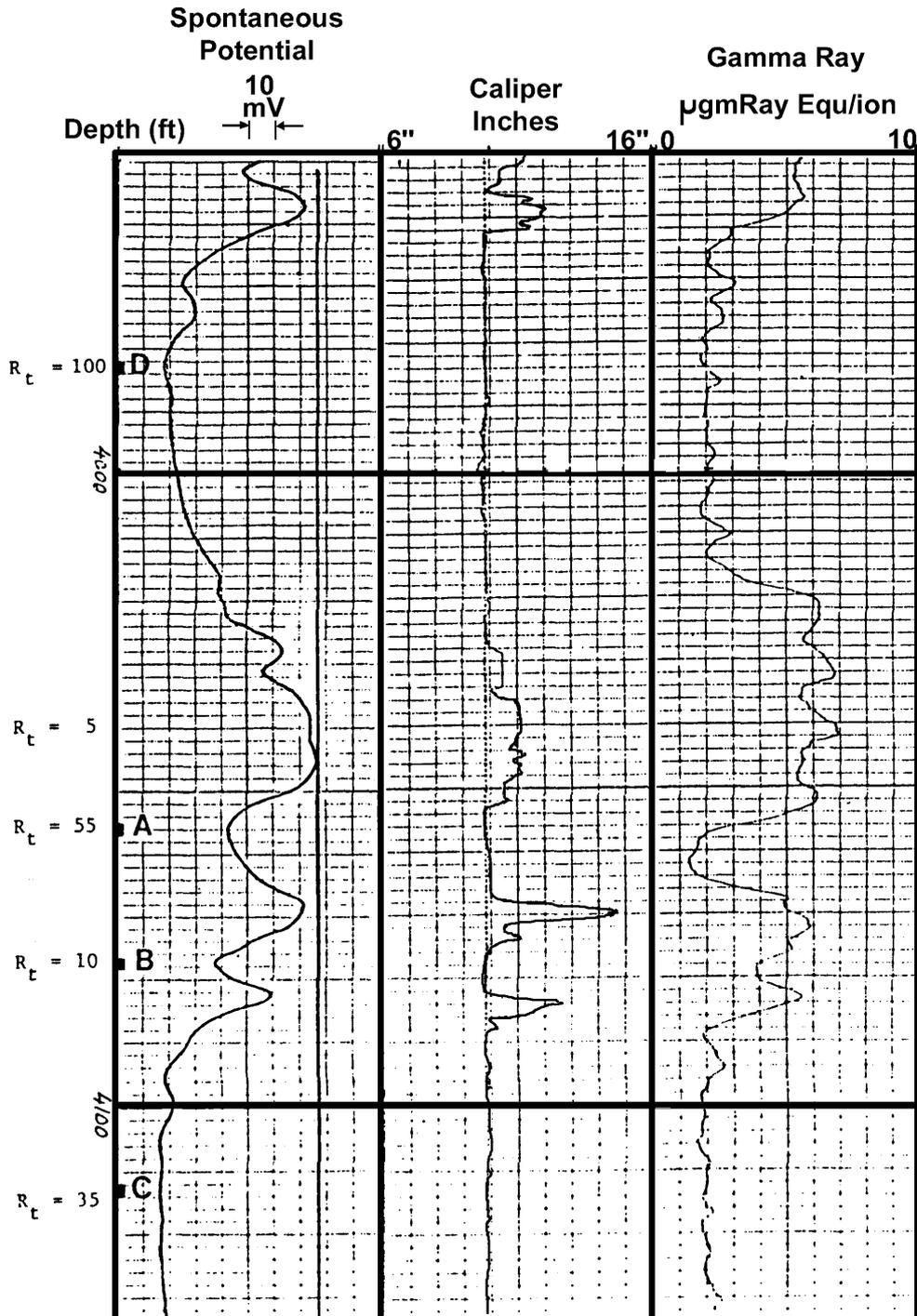
Température de la surface 100 °F

$R_{mf} = 10 \text{ Ohm.m}$  à 90 °F

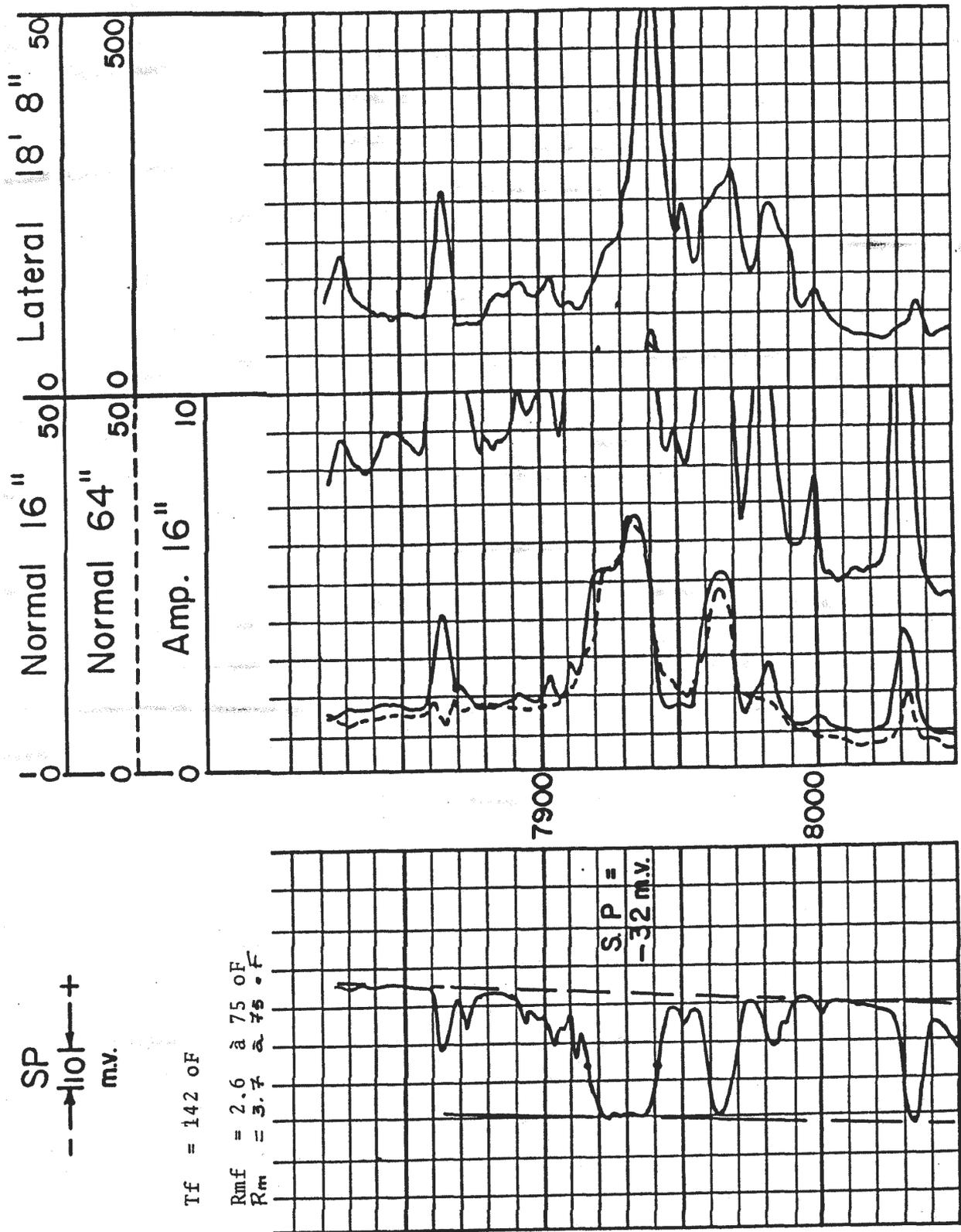
$R_m = 1.0 \text{ Ohm.m}$  à 90 °F

Calculer  $R_w$  aux points A, B, C, D en faisant la correction d'épaisseur de banc quand nécessaire

T 80° F  
 max. T = 120° F at 6000 ft  
 $R_m = 0.35 \text{ Ohm.m at } 70^\circ \text{ F}$   
 $R_{mf} = 0.28 \text{ Ohm.m at } 70^\circ \text{ F}$



T.P. P.S. 2



T.P. P.S. 3

## Chapitre 4 LES LOGS ELECTRIQUES

### 1 Introduction

Pour mesurer la résistivité électrique en forage on utilise le même principe que pour les méthodes électriques de surface et la résistivité apparente est obtenue par la formule suivante :

$$R_{app.} = K \frac{\Delta V}{I}$$

K est appelé ici 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 désigné sous le terme d'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. Il importe donc, pour apprécier la valeur de la résistivité mesurée, de bien connaître la contribution au signal recueilli de chacune des zones entourant le trou de forage.

On pourrait penser qu'en augmentant la longueur des dispositifs, il est possible de mesurer une résistivité apparente qui soit très proche de la résistivité vraie de la formation vierge. Cela ne peut être vrai que si la formation mesurée est aussi proche que possible des conditions idéales, c'est à dire homogène, isotrope et infinie en dimension vers le haut et vers le bas. Cette condition ne saurait être réalisée qu'exceptionnellement dans le modèle géologique exploré par l'outil.

**C'est la combinaison d'outils**, de profondeurs d'investigation variées qui nous permettra en définitive d'obtenir les valeurs des résistivités qui nous intéressent.

### 2 Les outils conventionnels

#### 2.1 Le dispositif normal - Normal device

C'est une réalisation de la mesure selon une géométrie très simple. Le potentiel mesuré en M est issu de A; B et N étant considérés à l'infini (Voir Fig. 4.1). I étant maintenu constant, le potentiel mesuré varie avec R, on a :

$$V = R \cdot I \frac{1}{4\pi AM}$$

Le rayon d'investigation d'une telle sonde est égal à 2AM. La définition verticale est égale à 2AM. Deux espacement sont utilisés dans la pratique :

- La petite normale, N 16", short normal, (AM = 40cm) ;
- La grande normale, N 64", long normal, (AM = 160cm) ;

Le point de mesure de la résistivité est le milieu O de l'espacement AM.

## 2.2 Réponse de la sonde normale

Le résistivité lue est en général inférieure à la résistivité vraie. L'épaisseur des couches aux points d'inflexion est plus petite que l'épaisseur vraie d'une longueur  $AM$  dans le cas des bancs épais résistants, et plus grande que l'épaisseur vraie d'une longueur  $AM$  dans le cas des bancs conducteurs (Voir Fig. 4.2).

Pour les couches minces résistantes il se produit une phénomène d'inversion la couche apparaît comme conductrice. Ce phénomène ne se produit pas pour les couches minces conductrices.

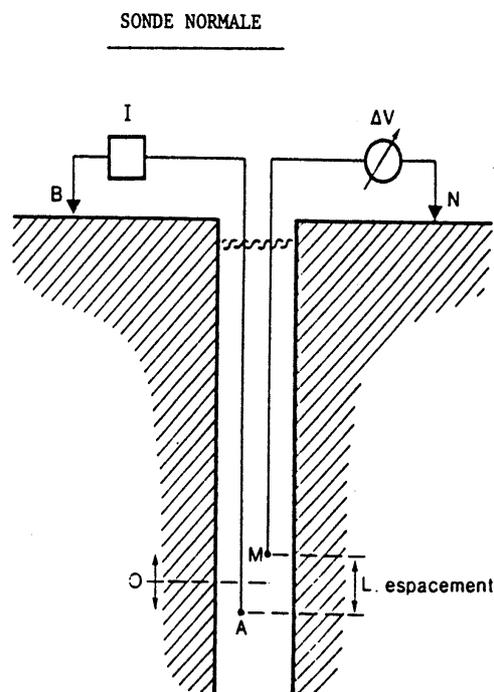


Figure 4.1 : Sonde normale.

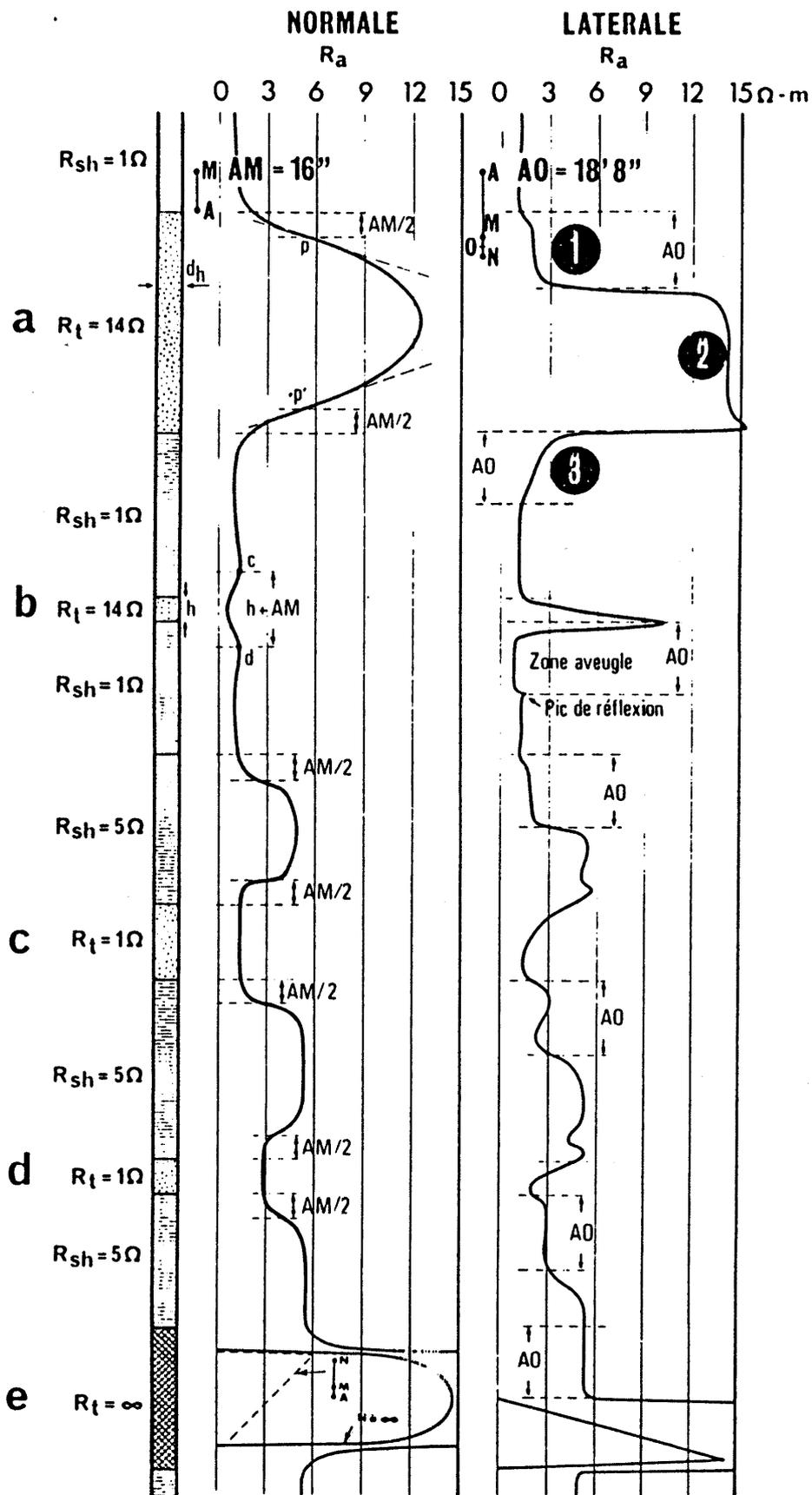


Figure 4.2 : Influence de l'épaisseur du banc et des résistivités en présences sur la forme des courbes normales et latérales.

Dans tous les cas, les sondes normales donnent une courbe centrée sur le milieu des couches. Pratiquement on peut considérer que :

- La petite normale donne une valeur de  $R_{X0}$ .
- La grande normale donne des valeurs comprises entre  $R_{X0}$  et  $R_t$  et est très tributaire de la profondeur d'invasion.

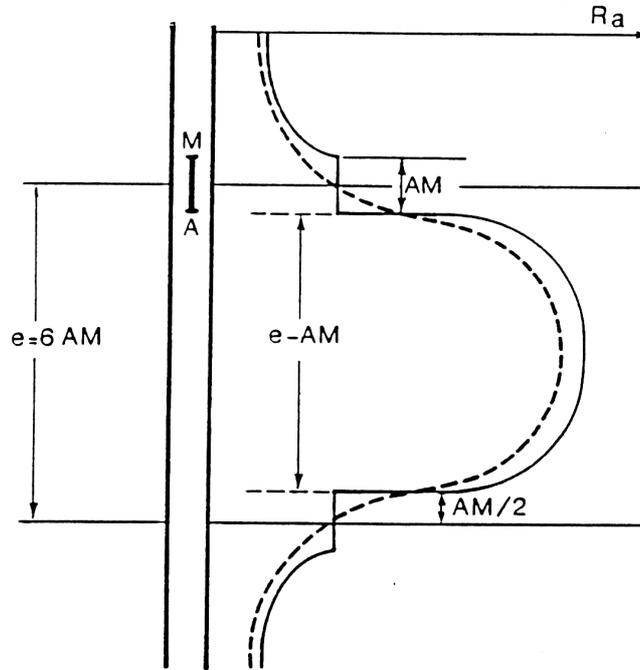


Figure 4.3 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc AM Espacement, Banc résistant épais, sonde normale.

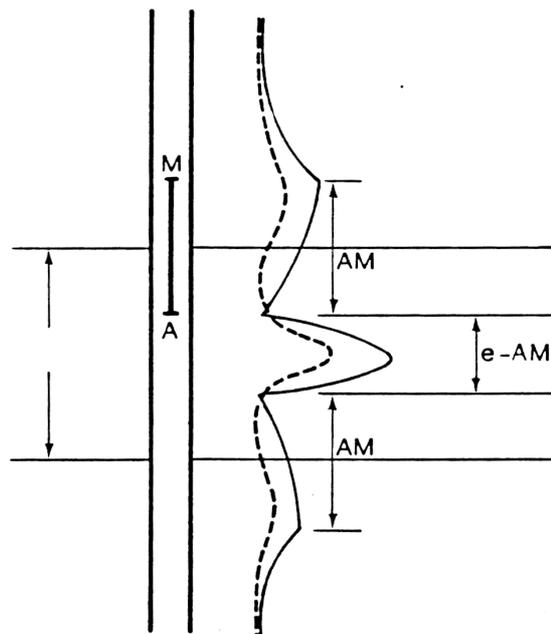


Figure 4.4 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc AM Espacement, Banc résistant d'épaisseur moyenne, sonde normale.

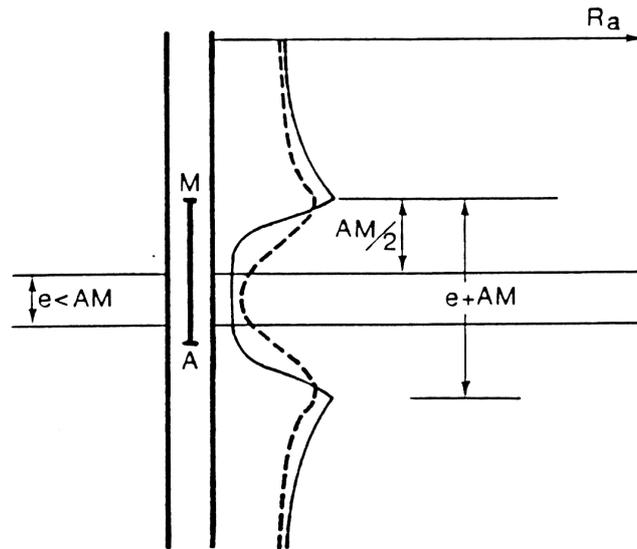


Figure 4.5 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc AM Espacement, Banc résistant mince, sonde normale.

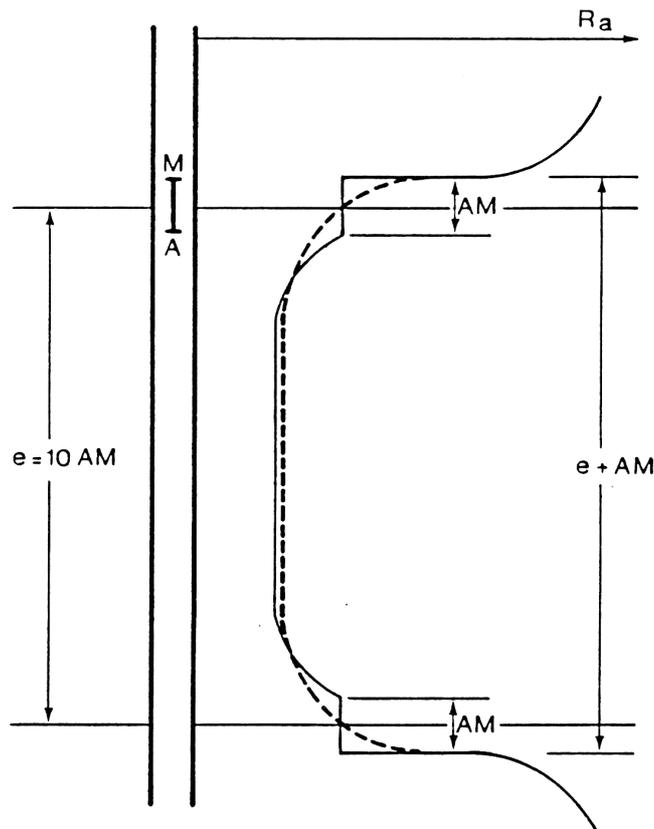


Figure 4.6 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc AM Espacement, Banc conducteur, sonde normale.

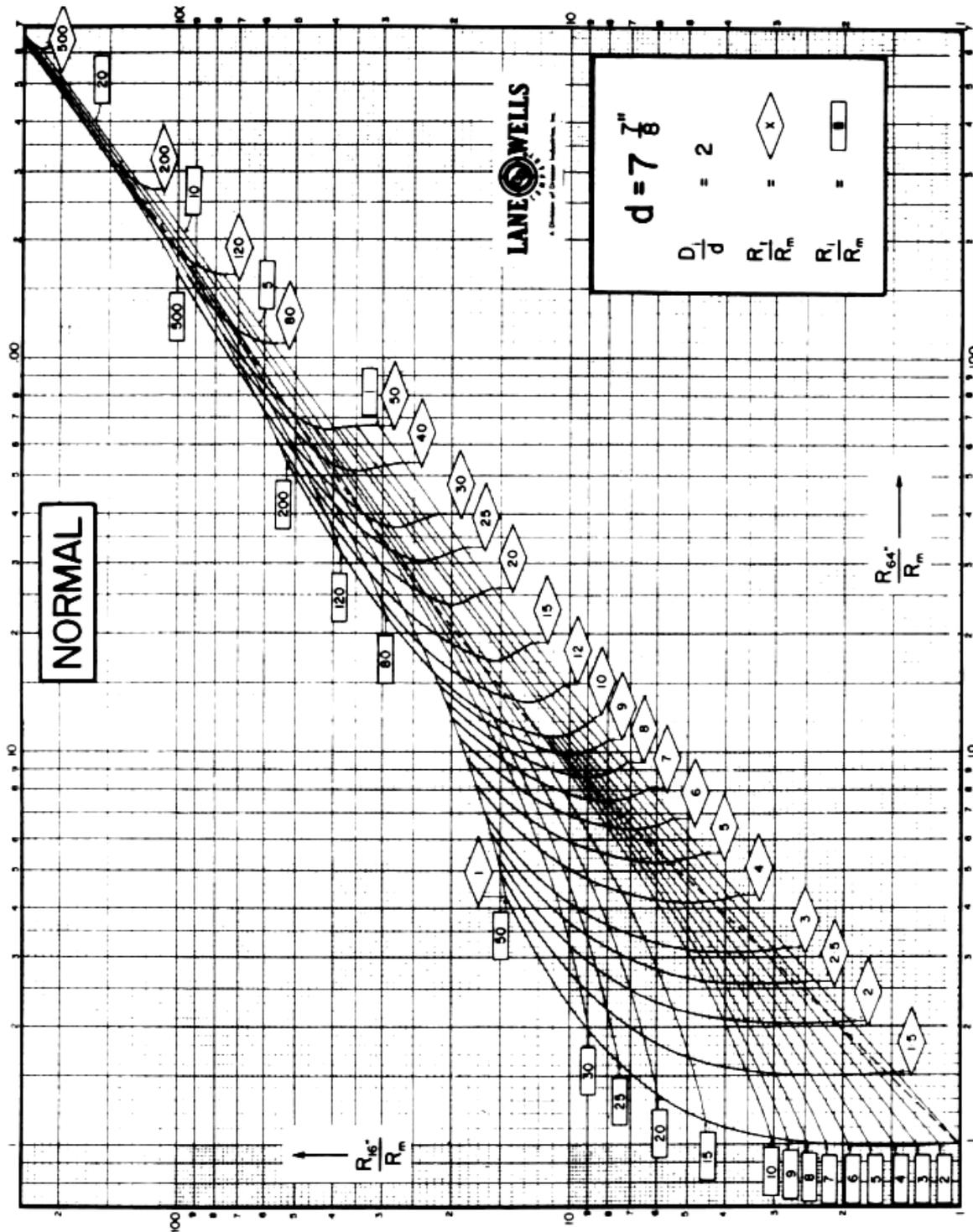


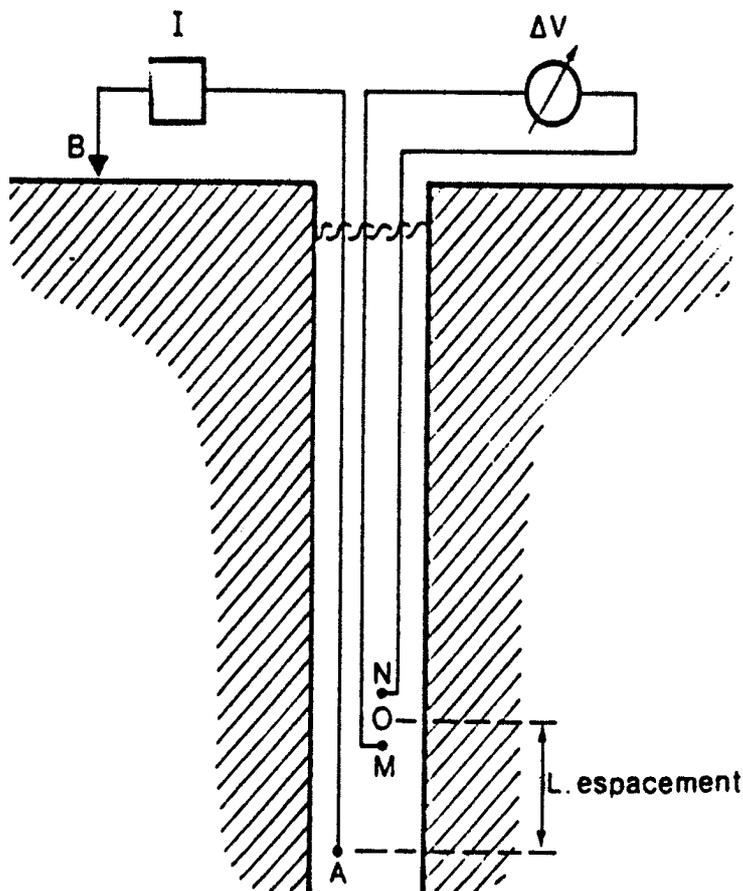
Fig. 7.14. Two normal interpretation charts for the determination of  $R_1$ ,  $D_1$ , and  $R_2$  in a 7 1/8 in. bore hole. Reprinted with permission of Lane Wells Company.

Abaque 8 : Abaques de corrections normale.

### 2.3 La sonde latérale

Dans ce dispositif, les deux électrodes de mesure M et N sont très proches l'une de l'autre dans le trou de forage. On mesure la différence de potentiel entre ces deux électrodes. L'espacement dans ce cas est de 18'8", 5.7 m. La profondeur d'investigation est égale à AO. La définition verticale est égale à AO (Voir Fig. 4.7).

**SONDE LATÉRALE**



**Figure 4.7 : Sonde latérale.**

L'expression de la résistivité est dans le cas d'une sonde latérale ;

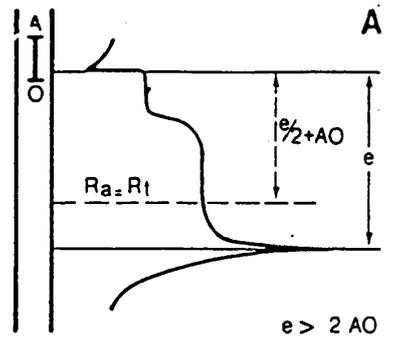
$$V = R \cdot I \frac{MN}{4\pi \cdot AM \cdot AN}$$

**2.4 Réponse de la sonde latérale**

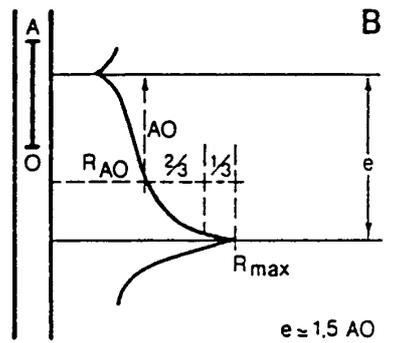
La sonde latérale fournit une courbe dissymétrique qu'il s'agisse de couches résistantes ou conductrices. La limite inférieure du banc est bien définie. L'épaisseur dans le cas de bancs épais résistants est plus petite d'une longueur de dispositif AO. Dans le cas de bancs conducteurs épais cette épaisseur est exagérée de la longueur du dispositif AO (Voir Fig. 4.8).

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.

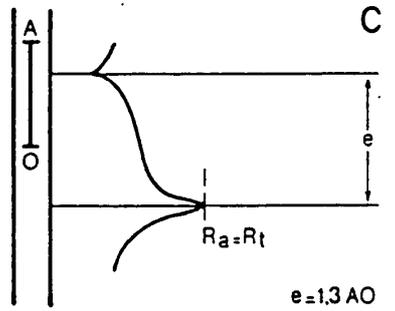
Règle du point milieu



Règle des deux tiers



Règle du pic



$$R_t = \frac{R_{\max}}{R_{\min}} (R_s)$$

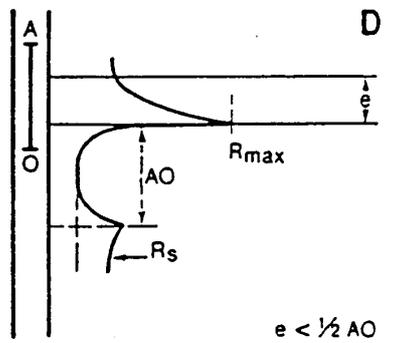


Figure 4.8 : Règles de lecture de la sonde latérale.

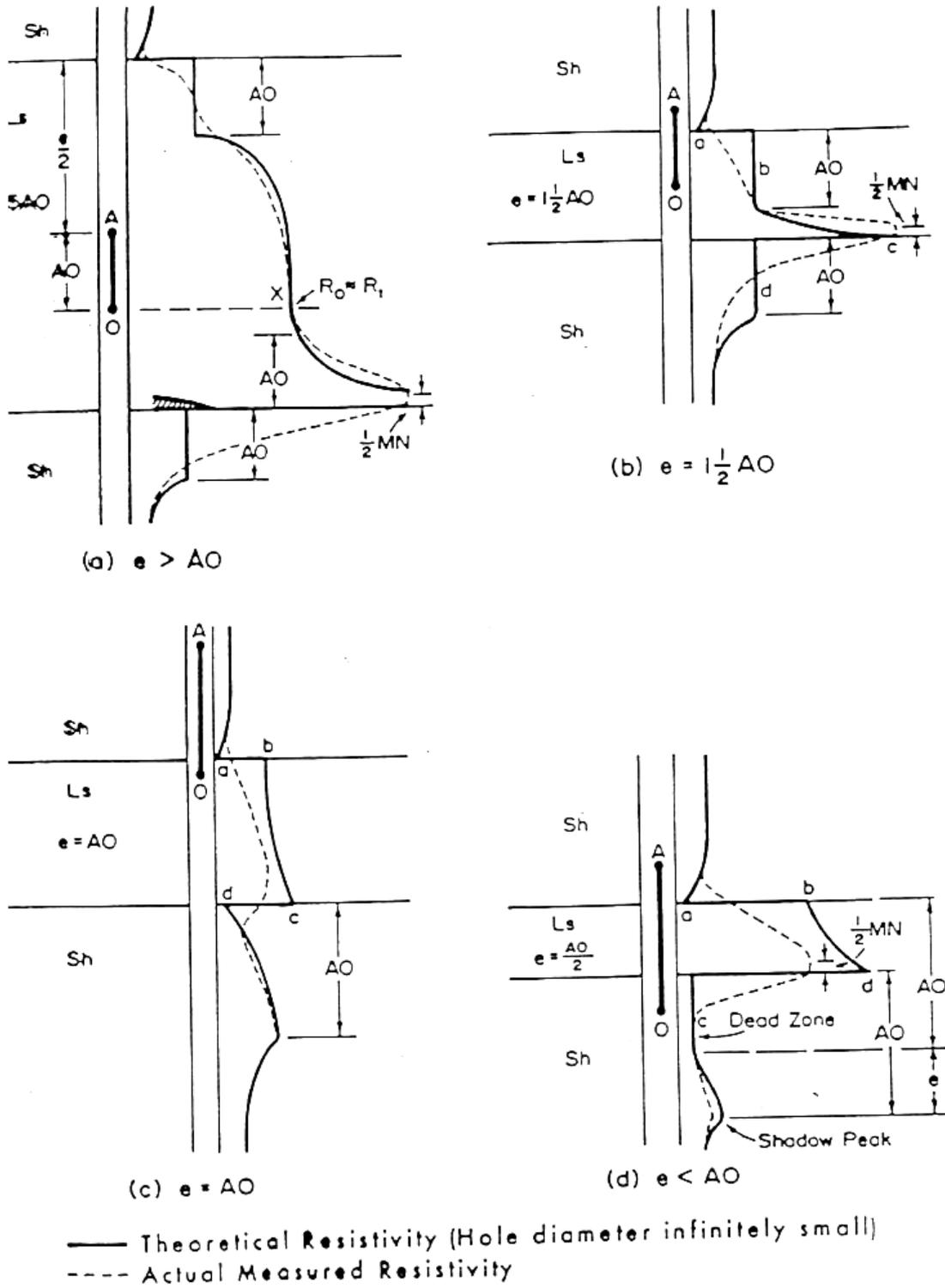


Figure 4.9 : Réponse de la sonde latérale.

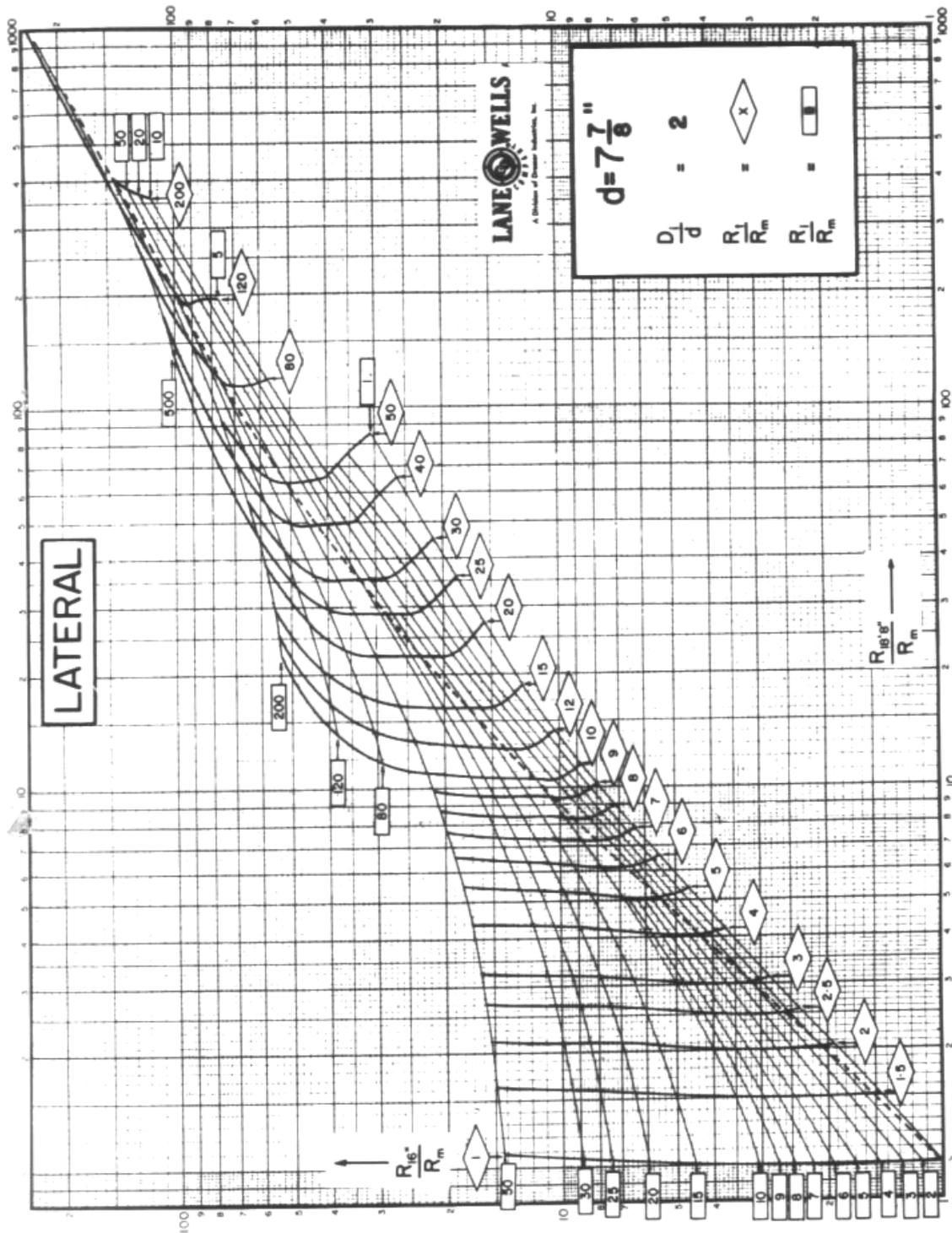


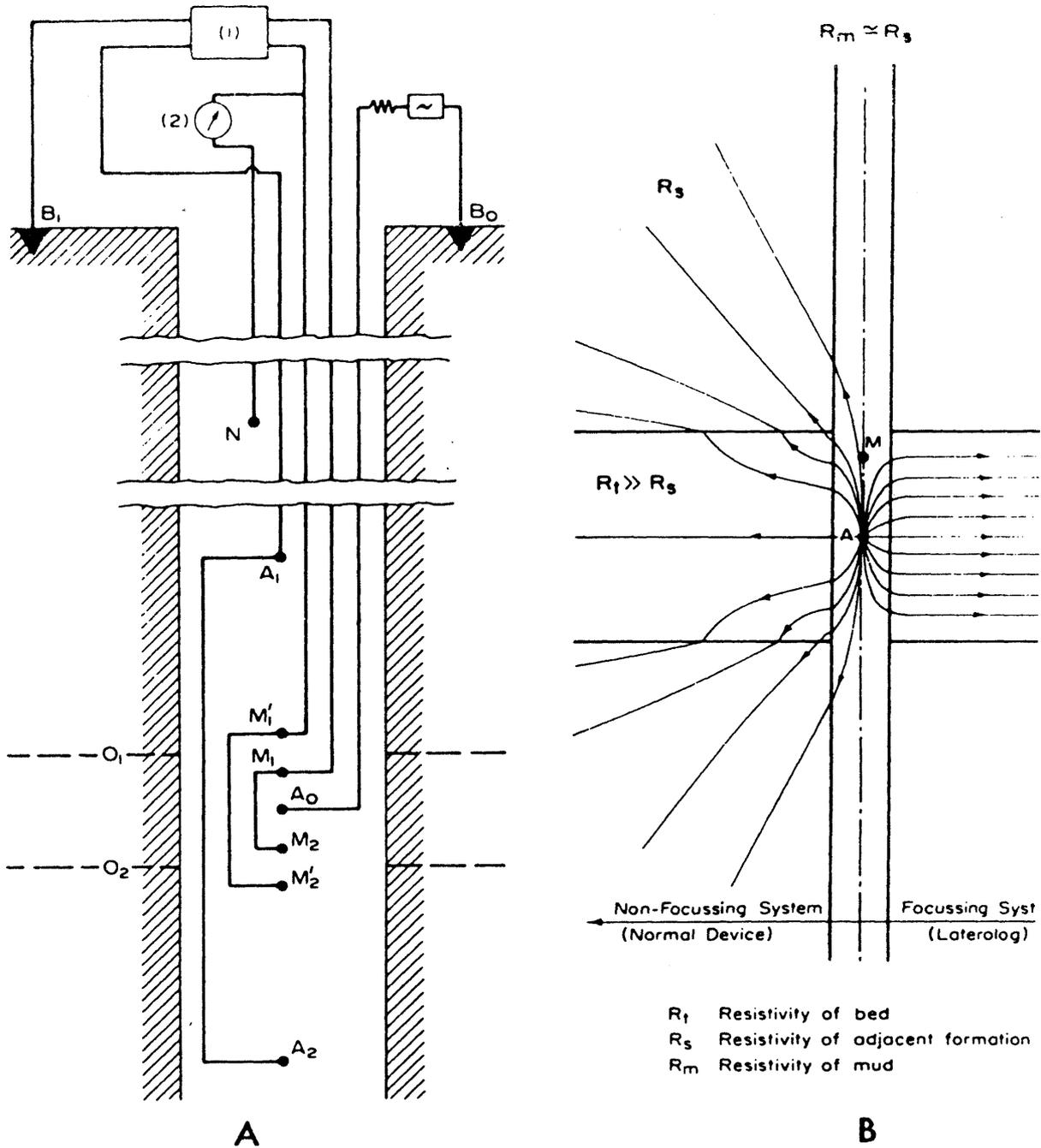
Fig. 8-13. Short normal-lateral interpretation charts for the determination of  $R_1$ ,  $D_1$ , and  $R_1$  in a 7 7/8 in. bore hole. Reprinted with permission of Lane-Wells Company.

**Abaque 9 : Corrections latérale.**

**3 Les outils focalisés**

Les outils traditionnels que nous avons vus jusqu'à présent sont très affectés par les conditions du trou. D'autre part l'influence importante des formations adjacentes ne peut être négligée tant que la formation intéressante n'est pas au moins 5 fois plus épaisse que l'espacement.

Il a donc fallu développer des systèmes d'outils où l'influence des couches adjacentes est considérablement diminuée. (Voir Fig. 4.10). Ce sont les outils où le courant électrique que l'on envoie est focalisé, c'est à dire que grâce à un système d'électrodes on réalise un faisceau de lignes de courant parallèles, ce faisceau pénètre les formations perpendiculairement à l'axe du trou.



**Figure 4.10 : Outil laterolog, arrangement des électrodes et comparaison de la distribution du courant pour l'outil normale et laterolog.**

On obtient avec ce genre d'outil une bonne valeur de  $R_t$ .

La définition verticale de ces outils dépend de l'épaisseur du faisceau de courant.

Le latéolog 7, LL7, a une nappe de courant de 1 mètre d'épaisseur.

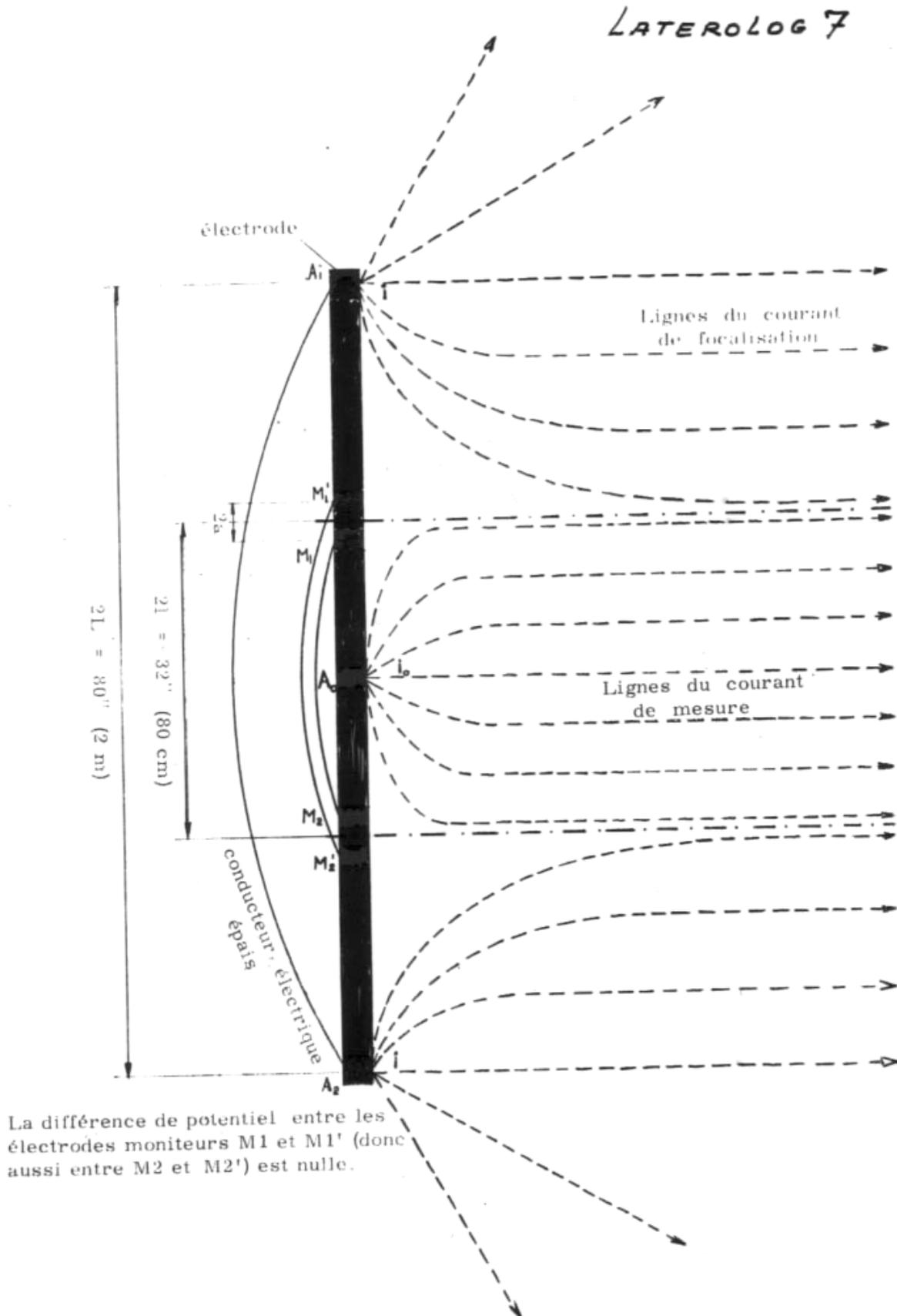


Figure 4.11 : Laterolog 7.

Le latérolog 3, LL3, a un faisceau de courant de 30 cm. Par conséquent, le latérolog 3 arrive à "voir" des formations plus minces que le latérolog 7, mais sa profondeur d'investigation est nettement plus faible.

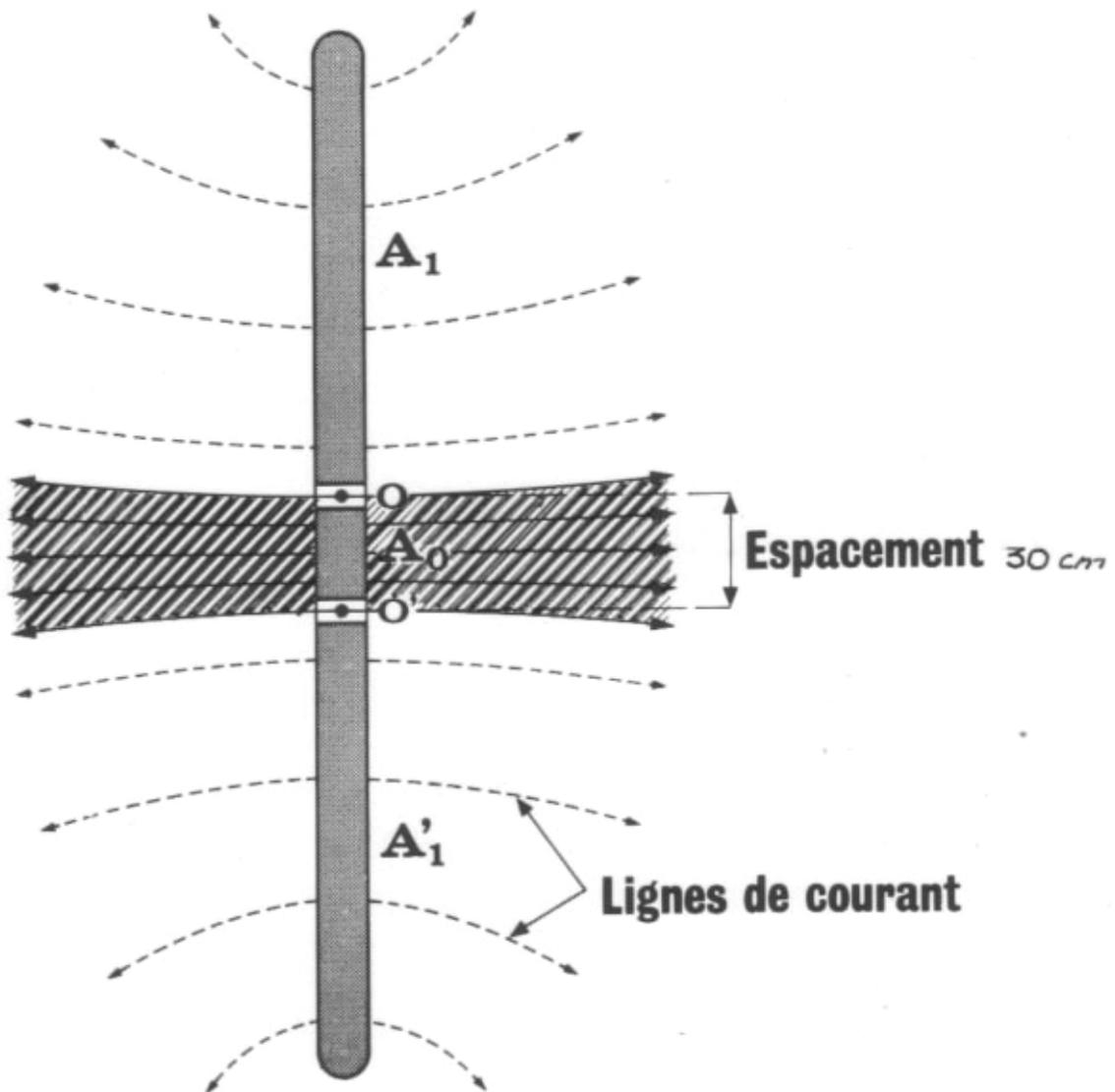


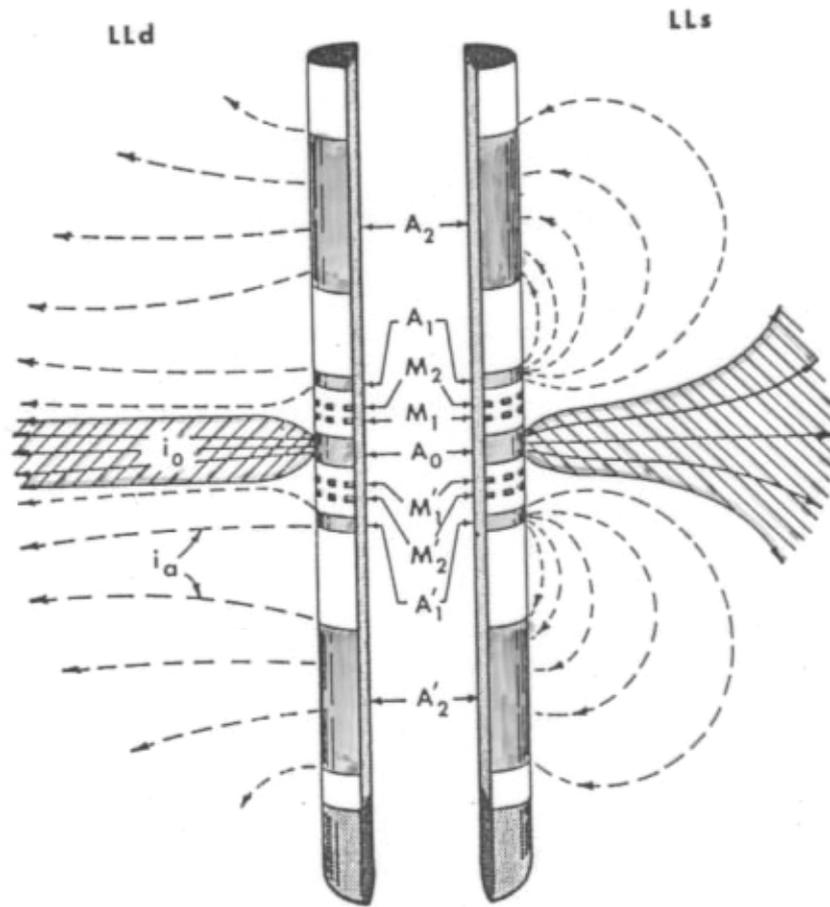
Fig. 88. — Schéma du Latérolog 3  
(document SCHLUMBERGER).

#### Figure 4.12 : Laterolog 3.

Le DUAL LATÉROLOG, DLL est un outil focalisé ou grâce à une combinaison d'électrodes on peut faire simultanément deux mesures à des profondeurs d'investigation différentes.

LLd (deep latérolog), qui a une profondeur d'investigation plus grande que le LL7 et donne  $R_t$ .

LLs (shallow latérolog), en utilisant les mêmes électrodes mais de manière différente, on arrive à une profondeur d'investigation beaucoup plus faible. La nappe de courant s'ouvre beaucoup plus vite. On obtient dans ce cas une valeur de  $R_{X0}$ .



**Figure 4.13 : Le LLs et le LLd.**

Les épaisseurs des couches sont données pour les outils focalisés par les points d'inflexion des courbes.

**3.1 Présentation des résultats**

Les outils traditionnels sont en général enregistrés en échelle linéaire avec des changements d'échelle de ce type :

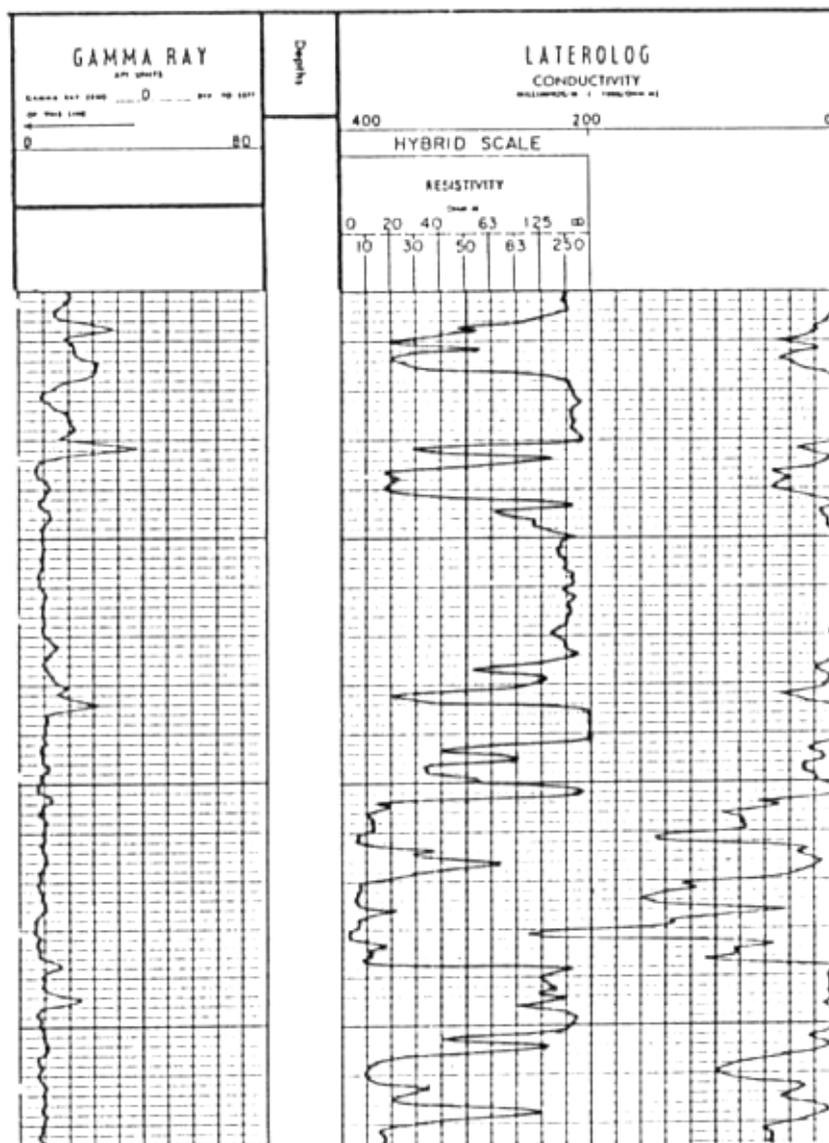
0-----10

0-----100

Il peut arriver que sur certains anciens logs, on trouve des échelles hybrides avec une partie en résistivité et une partie en conductivité, exemple :

0-----100-----Infinity Ohm.m

Infinity-----10-----8-----6-----4-----2-----0 millimhos/m (1000/Ohm-m).



**Figure 4.14 : Echelle hybride.**

La courbe est alors linéaire en résistivité de 0 à 100 ohms.m puis linéaire en conductivité de 100 ohms.m soit 10 mmhos/m à 0 mmhos/m.

A l'heure actuelle, on enregistre avec une échelle standardisée logarithmique.

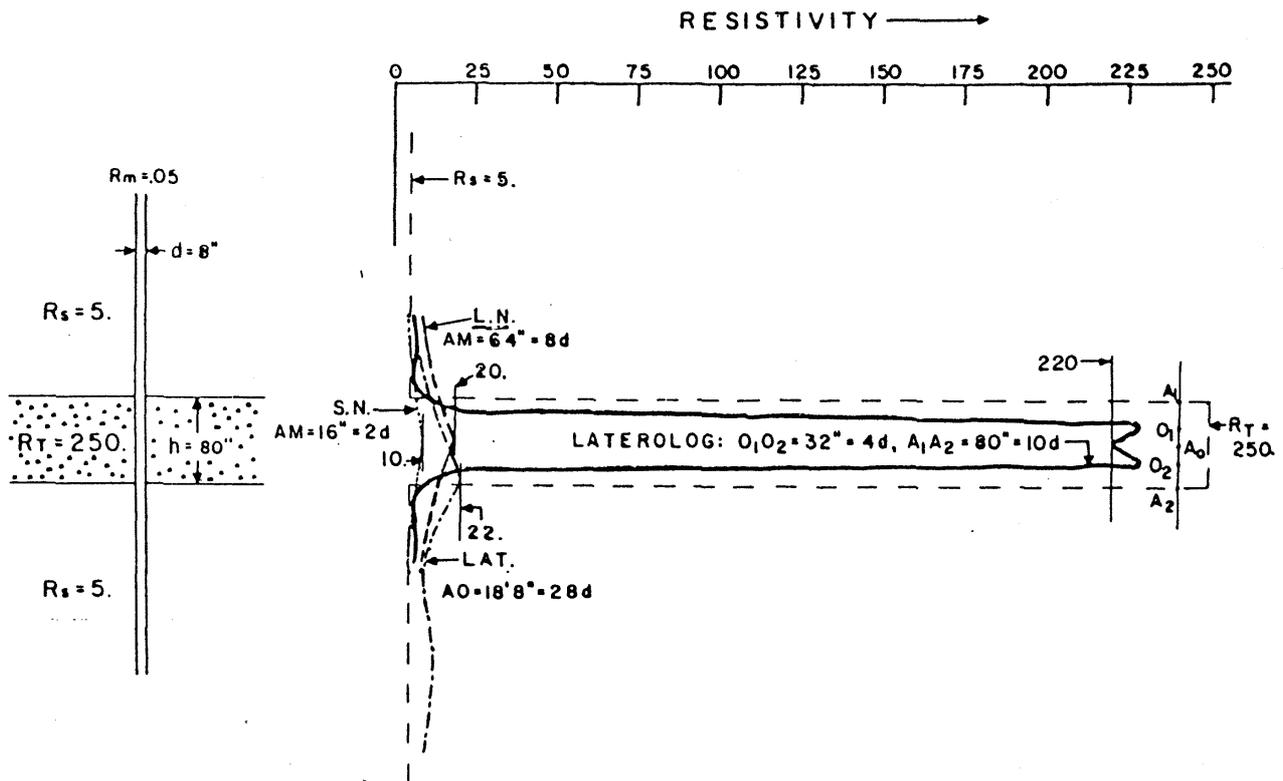


Figure 4.15 : Réponse de la sonde latérog en face d'un banc fin, résistant, non-envahit avec une boue très salée.

### 3.2 Les corrections

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 corriger à la fois pour le diamètre du trou et aussi pour la résistivité des épontes.

### 3.3 Les microdispositifs

Les microdispositifs sont utilisés pour mesurer  $R_{XO}$  et pour localiser avec précision les bancs poreux et perméables mis en évidence par la présence de mud-cake. La mesure de  $R_{XO}$  est importante pour plusieurs raisons, mais surtout elle permet d'estimer la saturation en hydrocarbures résiduels. Une bonne connaissance de  $R_{XO}$  implique un dispositif de mesure adapté, avec une profondeur d'investigation très faible. Cependant, avec une sonde très courte, l'effet de trou devient considérable.

### 3.4 Le microlog

Les électrodes de mesure sont montées sur un patin de caoutchouc qui épouse le mieux possible la forme du trou. Le patin est appuyé fortement contre la paroi du trou par un système de ressorts. On enregistre simultanément et sur la même plage :

- Une courbe micronormale 2", la mesure est faite entre M2 et une électrode considérée à l'infini. La courbe de micronormale 2" est conventionnellement figurée en trait tirets.

- Une courbe microinverse 1" x 1", la mesure est faite entre M1 et M2. La courbe obtenue est conventionnellement figurée en traits pleins. Les lectures sont influencées par plusieurs facteurs : résistivité de la boue, résistivité de la zone lavée, résistivité du mud-cake, etc.

La microinverse a une profondeur d'investigation très petite environ 3,5cm, sa lecture sera donc principalement influencée par l'épaisseur et la résistivité du mud-cake. La micronormale 2" a une profondeur d'investigation d'environ 9 cm, elle sera influencée par la résistivité du mud-cake mais également et surtout par  $R_{XO}$  résistivité de la zone lavée.

Dans le cas le plus général, la résistivité  $R_{XO}$  de la zone lavée est supérieure à la résistivité  $R_{MC}$  du mud-cake. On enregistrera une lecture de micronormale 2" supérieure à la lecture de la microinverse 1"x1". On dit qu'il y a séparation positive, caractéristique des formations poreuses et perméables. Une confirmation peut être apportée à ce diagnostic par la courbe du diamètre.

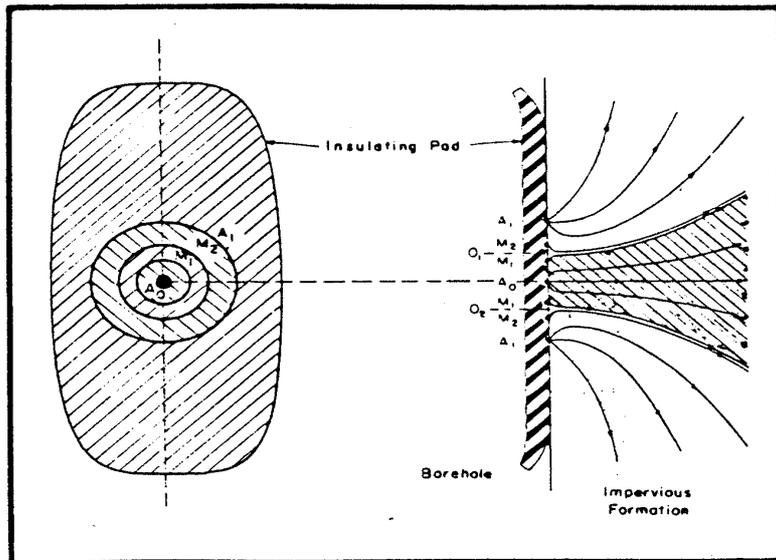
Dans le cas des formations imperméables, comme les argiles, il n'y a pas d'invasion et c'est donc la résistivité  $R_t$  de la formation qui influencera la lecture des deux outils. Les deux courbes seront confondues.

Le microlog est un outil qui a une excellente définition verticale, c'est un outil très précieux pour la délimitation précise des bancs et pour la mise en évidence des formations poreuses et perméables.

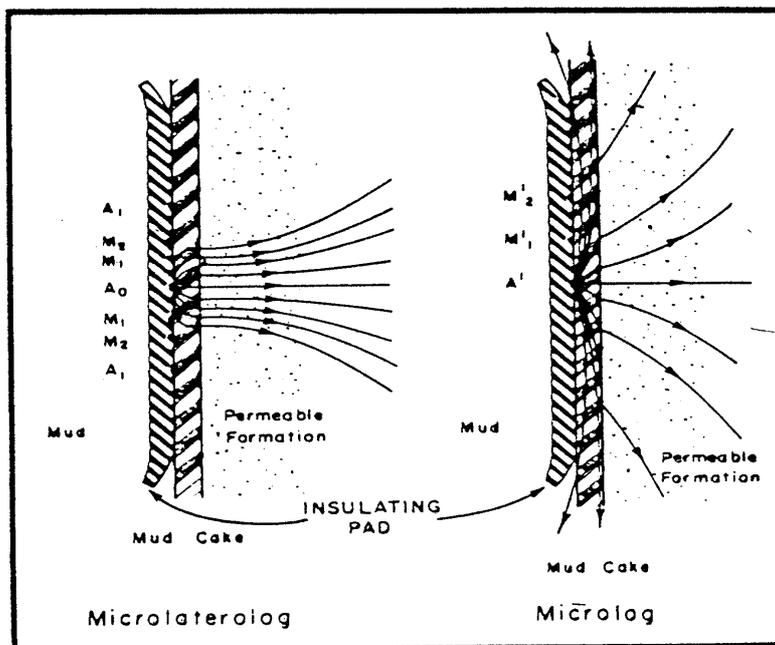
### 3.5 Les microdispositifs focalisés

Pour éviter l'influence trop grande du mud-cake sur la mesure toute une série de microdispositifs focalisés ont été mis au point, MicroS.F.L., Microlatérolog MLL, proximity log, etc.(Voir Fig. 4.16).

D'une manière générale lorsque l'on dispose d'une série de logs, s'il existe un enregistrement avec un microdispositif il faut choisir celui-ci pour trouver la valeur de  $R_{XO}$ .



— *Microlaterolog pad showing electrodes (left) and schematic current lines (right).*



— *Comparative distribution of current lines of Microlaterolog and Microlog.*

**Figure 4.16 : Distribution du courant pour les micro dispositifs.**

#### 4 Les outils par induction

Il n'est pas toujours possible de mesurer les résistivités avec un système d'électrodes, cela nécessite en effet un bon couplage électrique entre la boue et la formation.

Quand le forage est rempli d'air ou lorsque la boue utilisée est à base d'huile et donc résistante, le contact électrique n'est plus assuré. C'est pour surmonter ces difficultés que l'on a mis au point les diagraphies par induction.

## 4.1 Principe

Soit une sonde composée d'une bobine émettrice et d'une bobine réceptrice (Voir Fig. 4.17). Un courant alternatif haute fréquence est envoyé par la bobine émettrice (20 Kc). Ce courant produit un champ magnétique alternatif qui induit dans le sol environnant la bobine des courants tourbillonnaires (courants de Foucault).

Ces courants, à leur tour, engendrent leur propre champ magnétique qui induit un signal dans la bobine réceptrice. Si le courant émetteur est maintenu à une valeur constante, les courants de Foucault seront proportionnels à la conductivité du sol, il en résulte que le signal reçu sera lui aussi proportionnel à la conductivité des formations. La distance L entre les bobines est l'espacement. Le point de mesure est le point O à mi-distance entre les bobines. Dans la pratique les sondes à induction comportent plusieurs bobines émettrices et réceptrices. L'outil le plus moderne est le dual induction Latérolog, DIL qui comporte :

- Une induction deep ILD qui mesure  $R_t$  ;
- Une induction moyenne IIm.

Puisque le signal parvenant à l'enregistreur est proportionnel à la conductivité de la formation, la conductivité zéro, c'est-à-dire la résistivité infinie correspond au signal 0.

$$\text{Conductivité en millimhos par m} = \frac{1000}{\text{Résistivité en Ohm.m}}$$

Le problème est qu'il faut mesurer très finement en début d'échelle, ce qui rend la mesure peu fiable à partir de 250 ohms.m. Par contre on obtient bien plus de détails pour les faibles résistivités qu'avec l'enregistrement électrique classique.

2 millimhos = 500 ohm.m ;

3 millimhos = 330 ohm.m ;

4 millimhos = 250 ohm.m.

En général l'électronique de l'appareil d'enregistrement transforme directement le signal reçu en terme de résistivité.

## 4.2 Les corrections

Comme la plupart des outils l'induction nécessite des corrections pour les effets de trou. D'autre part lorsque le milieu est très conducteur, il peut se produire des interactions entre les divers champs magnétiques induits dans le terrain. Ces interactions ont pour effet de diminuer le signal reçu. Cette réduction du signal est automatiquement corrigée pendant l'enregistrement, par contre il y a perte de profondeur d'investigation par skin effect et ceci on ne peut pas le corriger.

En définitive :

- Les logs induction sont utilisés essentiellement pour les forages remplis de boue relativement résistante, ainsi que pour les forages secs.
- La définition verticale est bonne et permet une bonne évaluation de bancs d'environ 1m. quand le signal est faible, en face de bancs à haute résistivité la sonde à induction n'est pas précise, cela limite son emploi à des formations < 300 ohms.m.

De plus l'influence du skin effect pour les très basses résistivités limite aussi l'emploi de ces sondes à des formations dont la résistivité est  $> 0,2$  ohms.

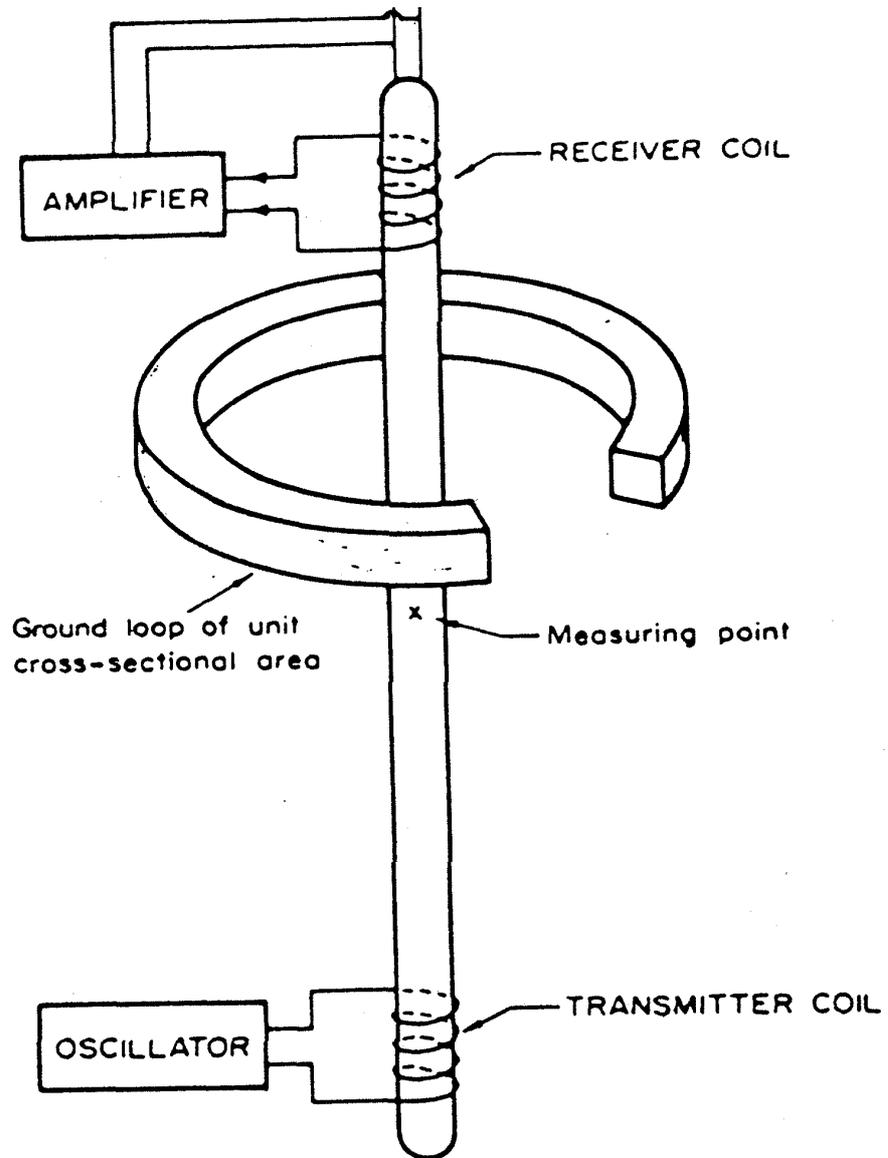


Figure 4.17 : Schéma de l'outil à induction.

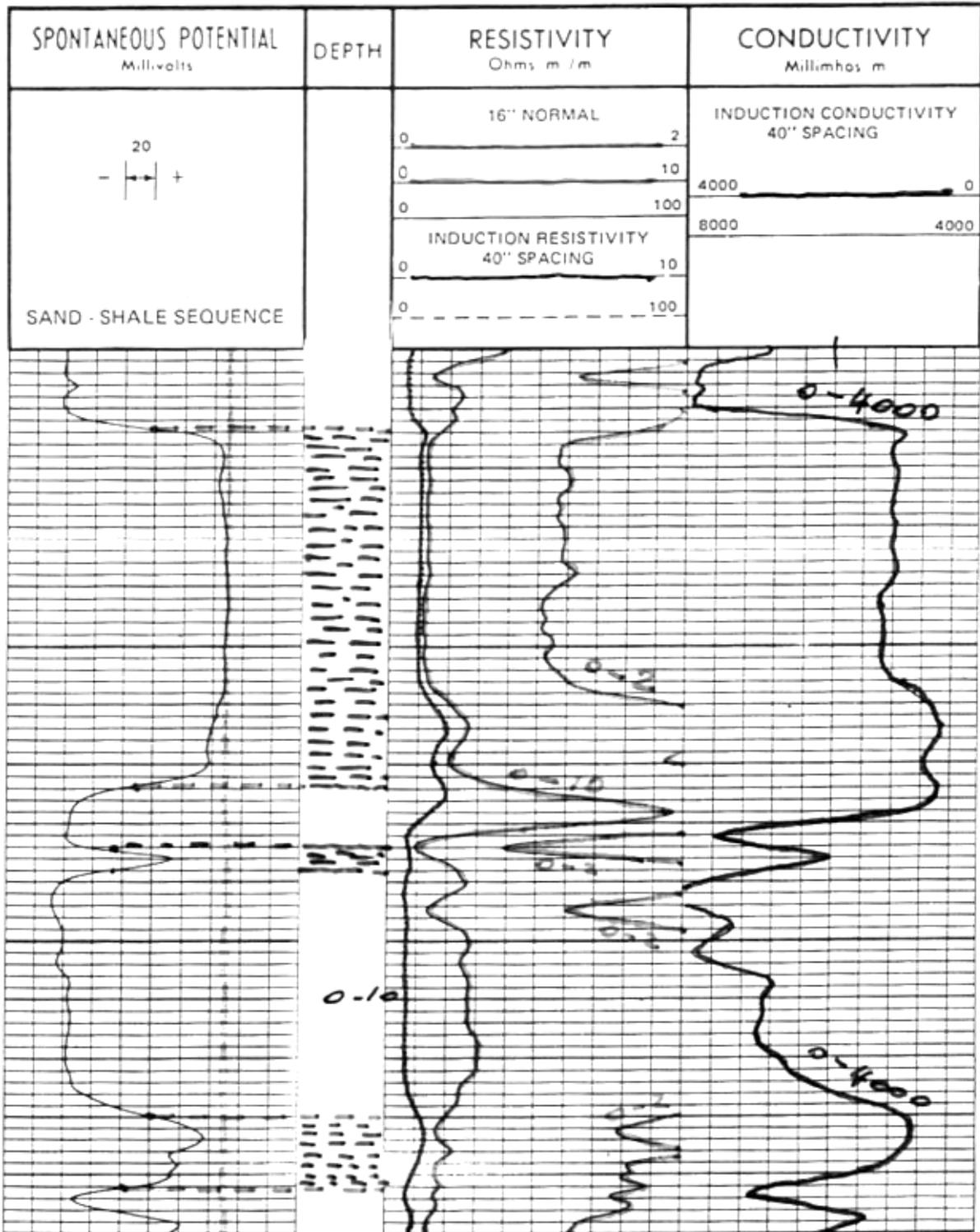


Figure 4.18 : Exemple électrique 1.

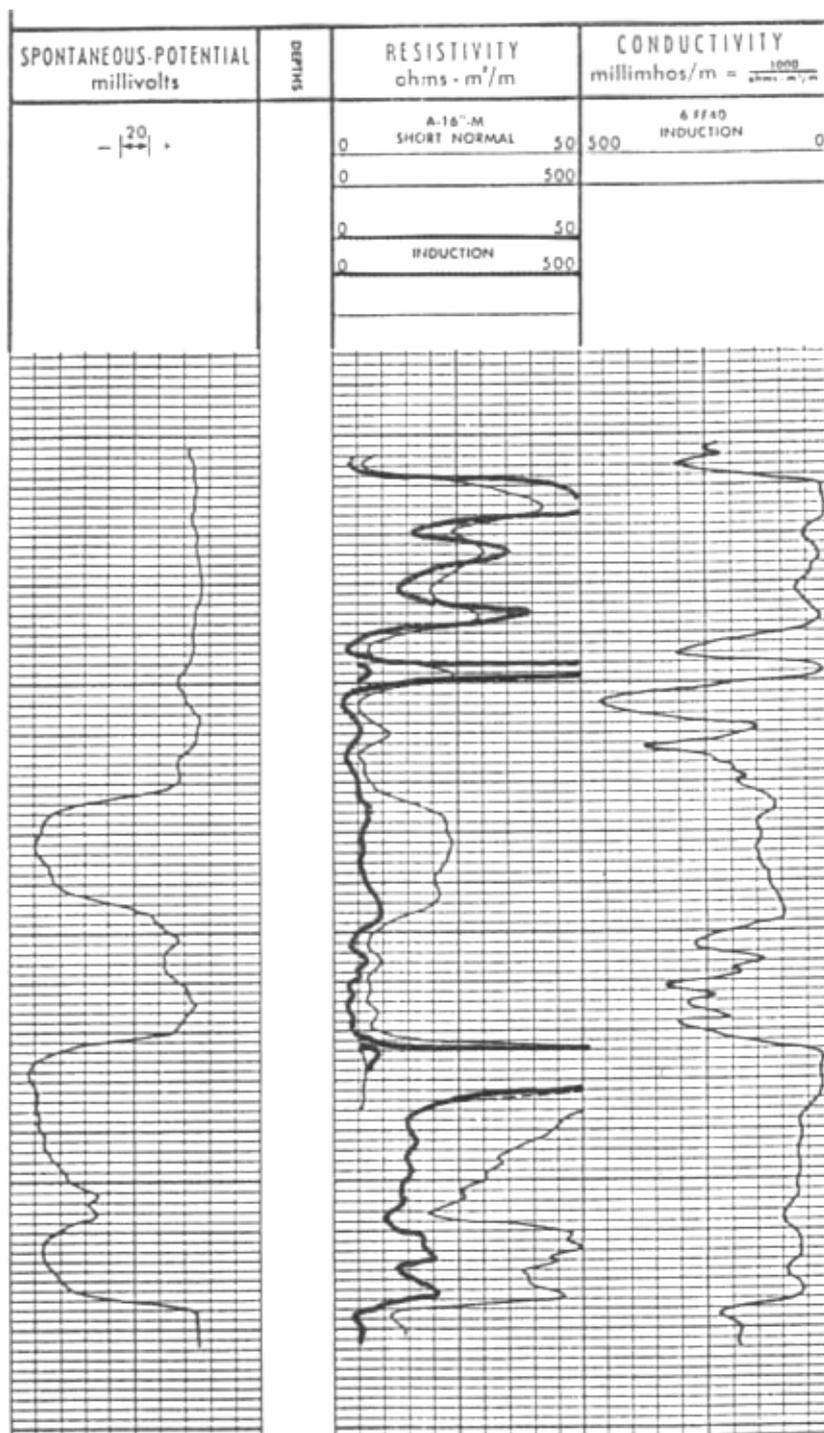


Figure 4.19 : Exemple électrique 2.

# COMBINAISON DES MESURES DE RESISTIVITE

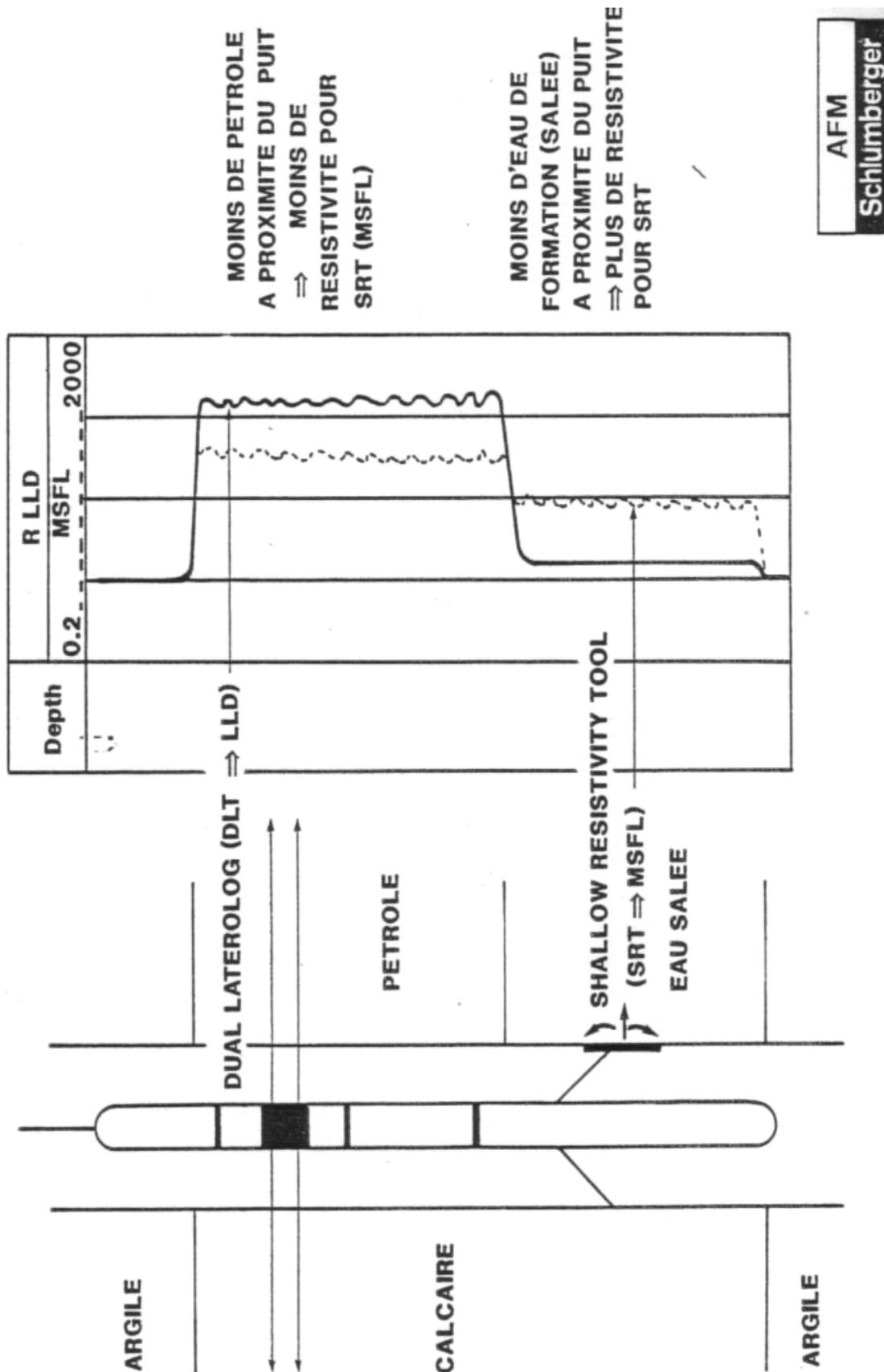


Figure 4.20 : Combinaison d’outil de résistivité.

**Résumer des LOGS ELECTRIQUES :**

Les logs électriques, sauf ceux par induction, ne peuvent être enregistrés que dans des trous remplis d'un fluide conducteur.

**La P.S. :**

La P.S. permet d'obtenir  $R_w$ , elle permet de mettre en évidence les argiles et les bancs poreux et perméables. La limite des bancs est à l'inflexion de la courbe.

Attention la P.S. peut être inversée.

**Les outils classiques :**

**La petite normale 16"**, S.N. ou P.N. : Elle donne une valeur de  $R_{xo}$ .

**La grande normale 64"**, G.N. ou L.N. : Elle donne une valeur de  $R_t$ .

- Les courbes sont symétriques centrées sur le milieu de la couche.
- En général la résistivité apparente est inférieure à la résistivité vraie.
- L'épaisseur apparente est inférieure à l'épaisseur vraie d'une longueur AM pour les bancs résistants, elle est supérieure à l'épaisseur vraie d'une longueur AM pour les bancs conducteurs.

**La latérale 18'8"** : Elle donne  $R_t$ .

- La courbe est dissymétrique.
- La limite inférieure est bien définie.
- Si la couche est épaisse il existe un palier donnant la valeur de  $R_t$ .
- Diverses règles permettent de calculer la résistivité vraie lorsque les bancs ne sont pas épais.

**Les outils focalisée :**

**Le latérolog 7 et 3** : ils donnent tous les deux une bonne valeur de  $R_t$ .

**Le L.L.D** (latérolog deep) donne une valeur de  $R_t$ .

**Le L.L.S.** (latérolog shallow) donne une valeur de  $R_{xo}$ .

Les épaisseurs des couches sont données pour les outils focalisés par les points d'inflexion des courbes, ces outils nécessitent des corrections.

**Les microdispositifs :**

**Le caliper** : donne le diamètre du trou.

**Le microlog :**

**La micronormale 2"** (en trait tirés) donne  $R_{xo}$ .

**La microinverse 1" x 1"** (en trait plein) est très influencée par  $R_{mc}$ .

En face des bancs poreux et perméables ces deux courbes montrent une séparation positive. Quand il n'y a pas de mud cake les deux courbes sont imbriquées. Cet outil a une excellente définition verticale.

**Le microlatérolog** : donne une bonne valeur de  $R_{xo}$ .

Dans tous les cas lorsqu'il existe un enregistrement avec un microdispositif il faut choisir celui-ci pour la valeur de  $r_{xo}$ .

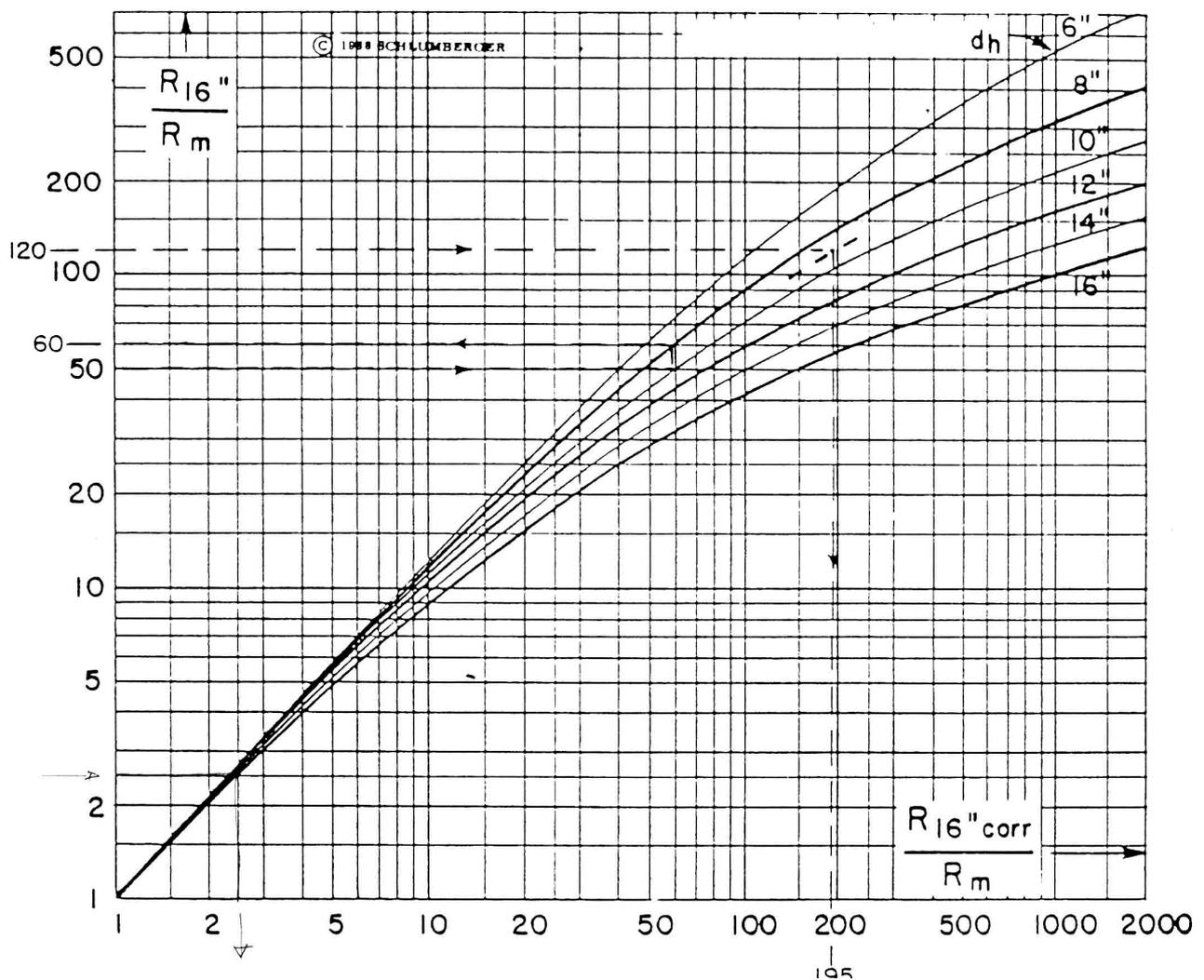
**Les outils par induction** :

**Le D.L.L.** (dual induction log) :

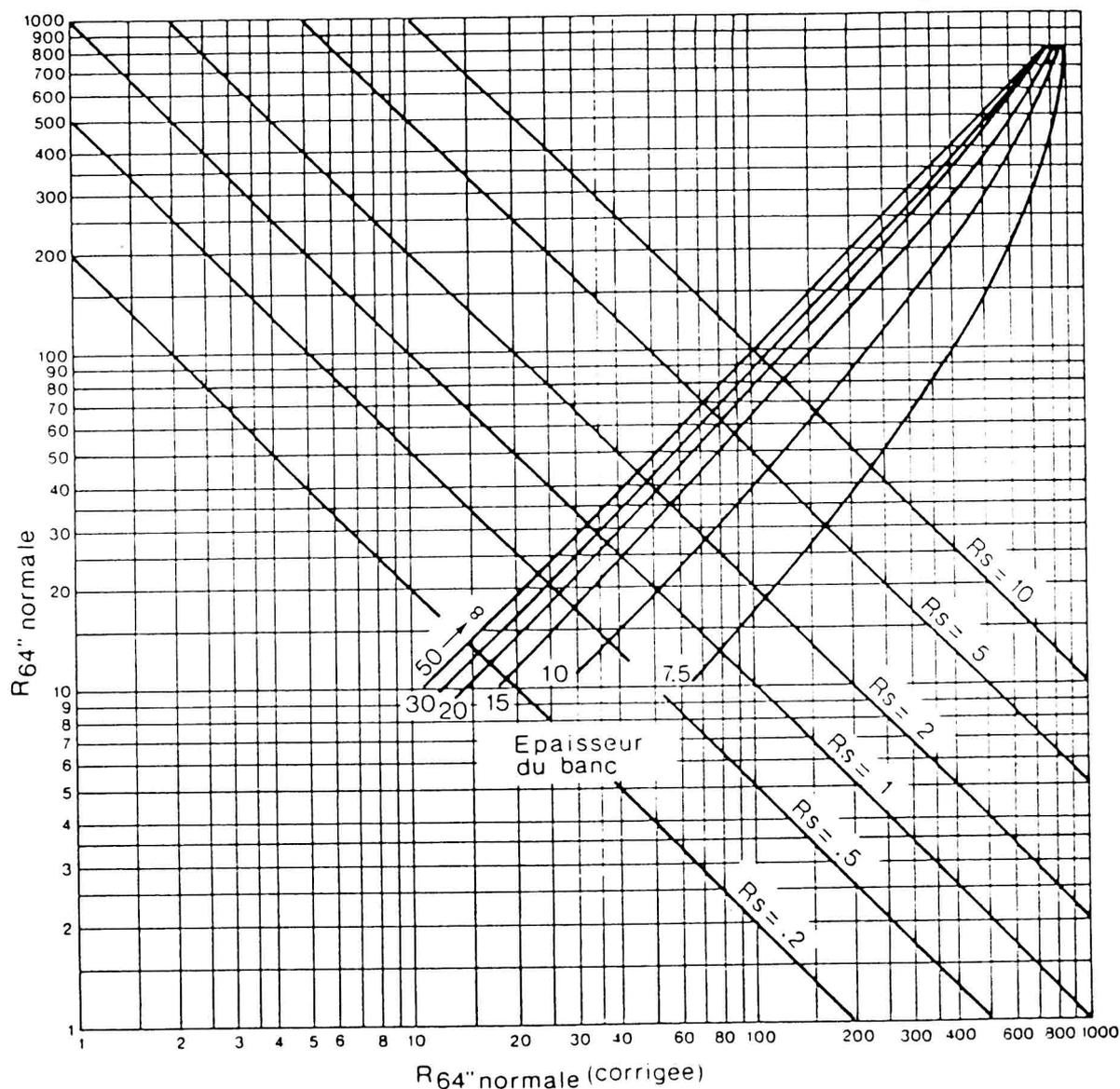
**Le I.L.D.** (induction deep) donne une bonne valeur de  $R_t$ .

**Le I.L.S.** (induction shallow) donne une bonne valeur de  $R_{xo}$ .

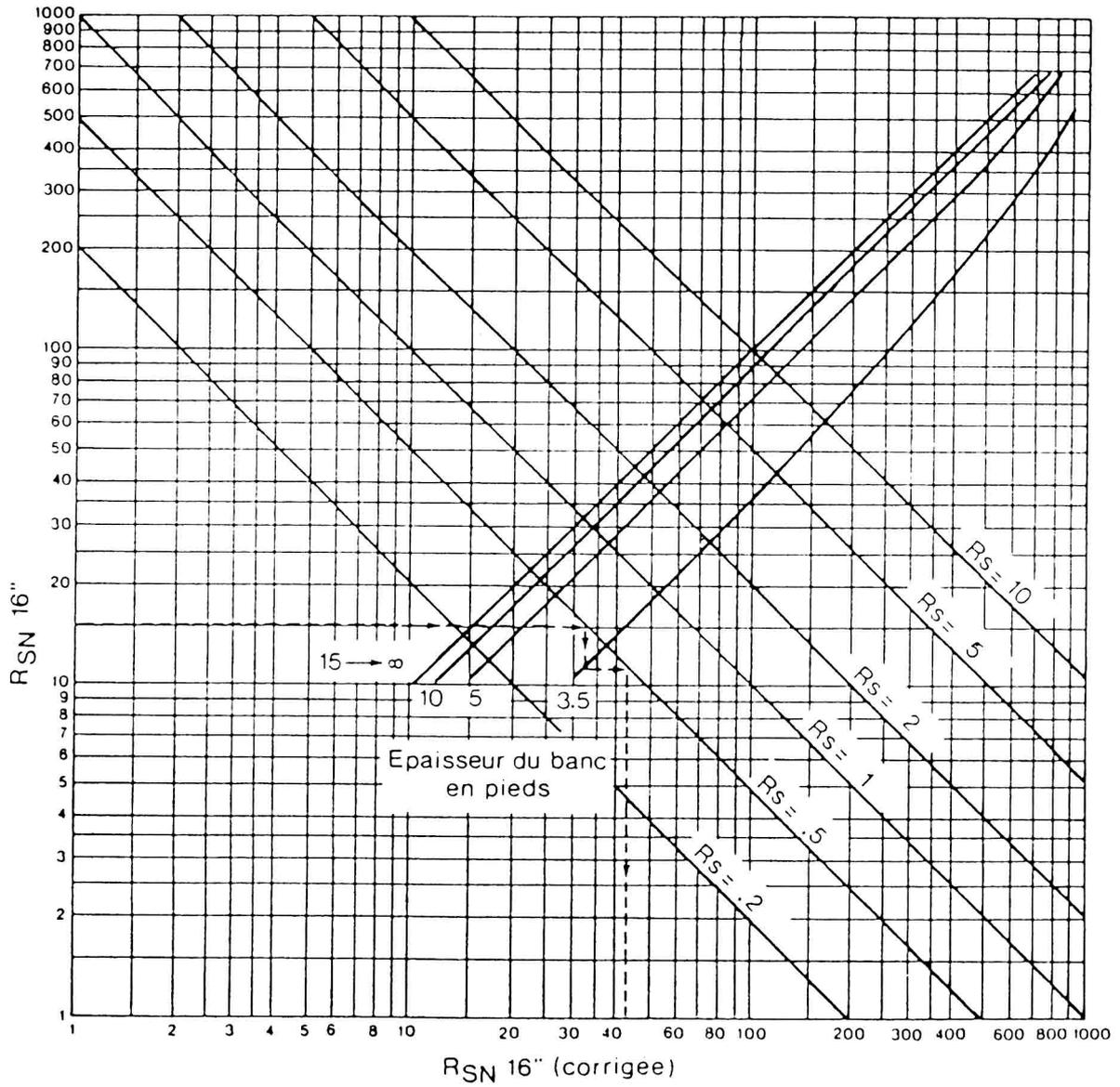
Ces outils sont limités en résistivité entre 0.2 et 300 Ohm-m.



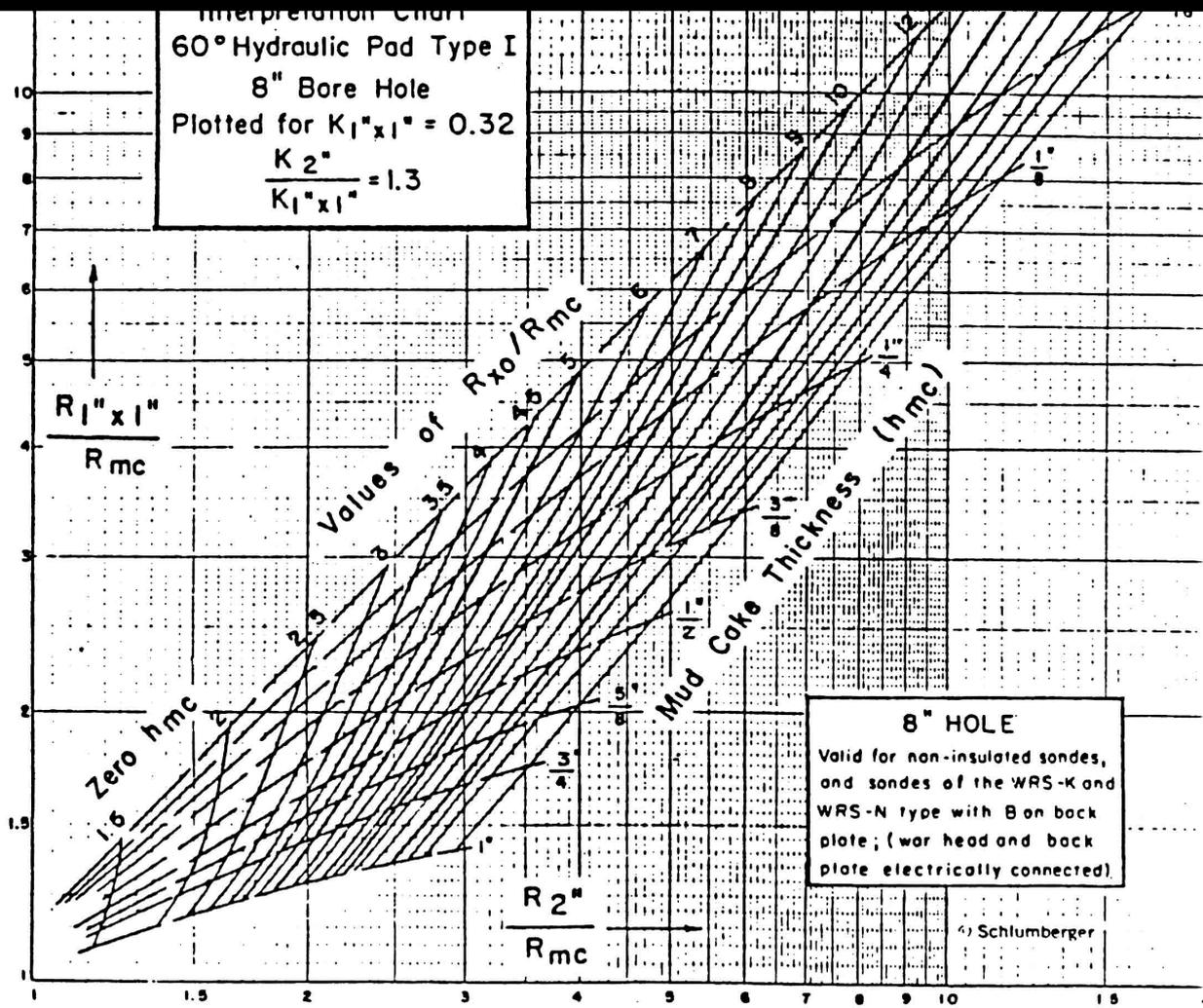
**Abaque 10 : Correction de diamètre pour la normale 16''.**



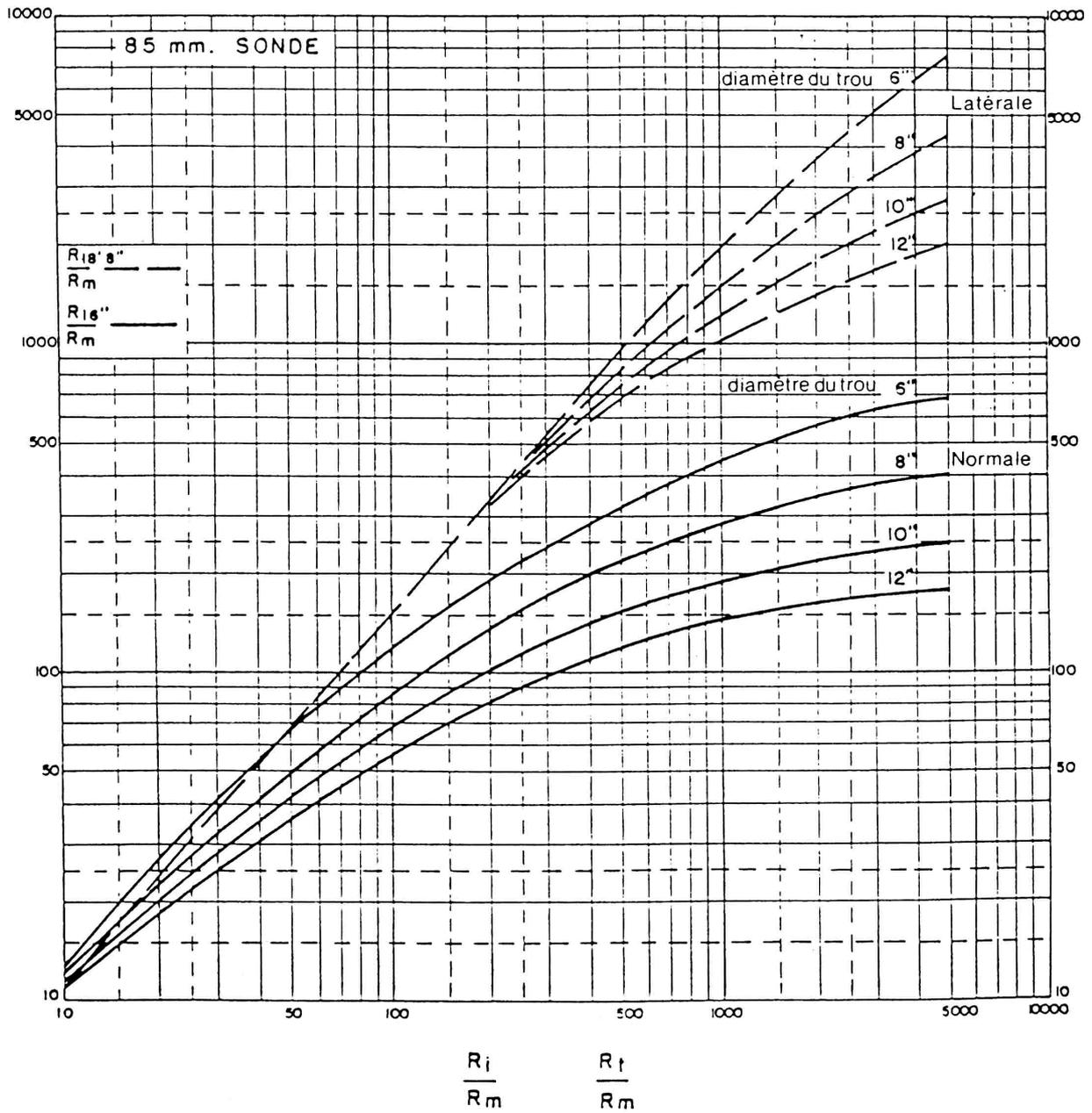
**Abaque 11 : Correction d'épaisseur de banc pour la normale 64''.**



**Abaque 12 : Correction de diamètre pour la normale 16''.**



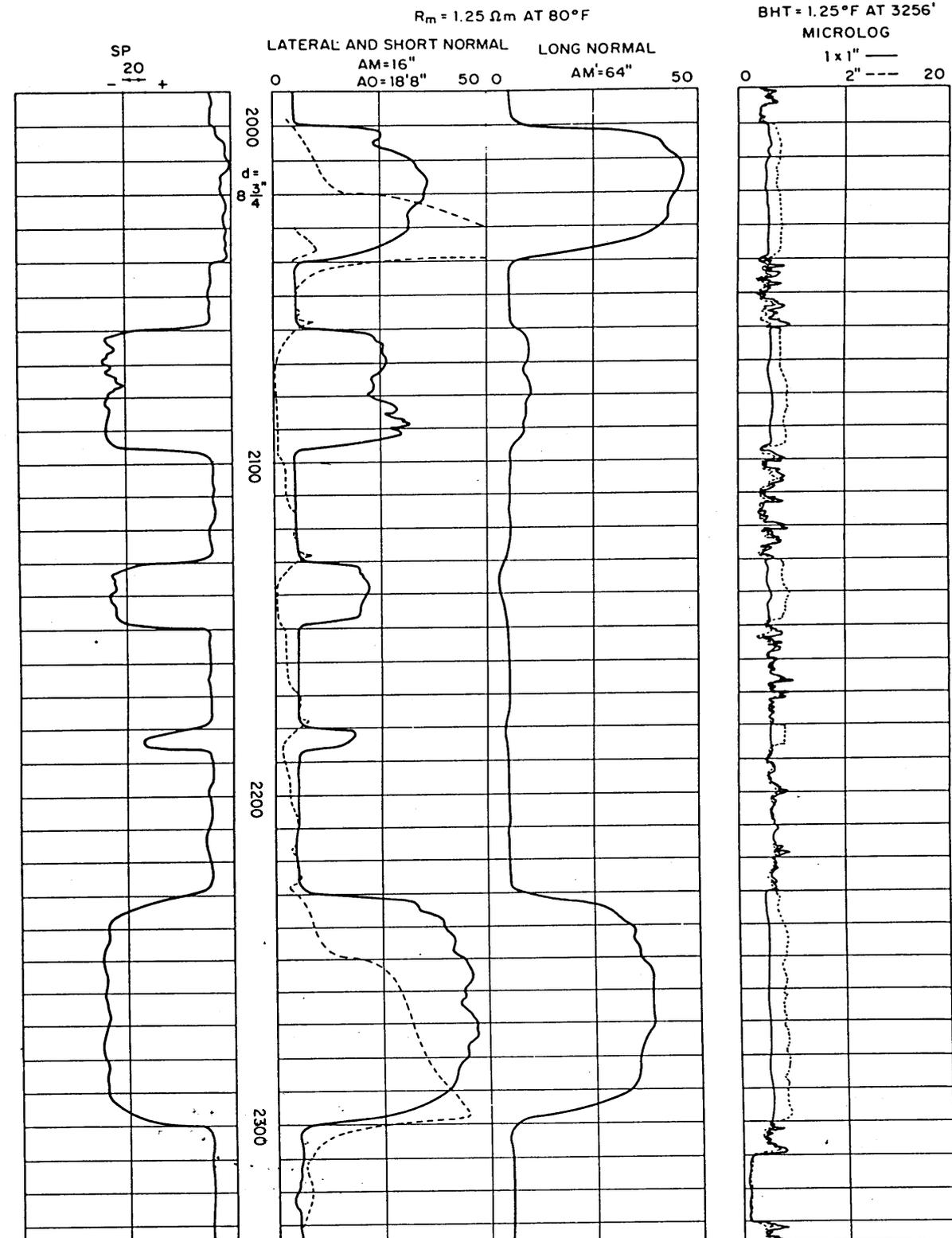
Abaque 13 : Correction des normales pour l'épaisseur du mud cake.



**Abaque 14 : Correction de la normales 16'' le diamètre du trou.**

**T.P. Diagraphies Electriques 1 : Pirson.** Il s'agit d'une série de réservoirs de sables argileux. Le fluide peut être de l'eau douce, de l'eau salée ou des hydrocarbures.

Donner pour les différents réservoirs les valeurs de résistivité des deux normales et de la latérale. Que vous suggèrent ces valeurs ? Calculer  $S_w$  et  $S_{xo}$  à 2260'' Dessiner la coupe lithologique.



**T.P. Diagraphies électriques 2**

Série argilo sableuse

Déterminer qualitativement la nature des fluides contenus dans les zones 9340', 9380', 9424, et 9450'.

En utilisant l'abaque déterminer  $R_t$ ,  $R_{xo}$ ,  $d_i$  aux profondeurs suivantes :

Prof	MLL	LLs	LLd	RLLd/RLLs	RLLd/Rxo	$d_i$	$R_t/R_{xo}$	$R_t/RLLd$	$R_t$	$R_{xo}$
9445'										
9434'										
9369'										
9354'										

Calculer la saturation est hydrocarbure de la zone supérieure.

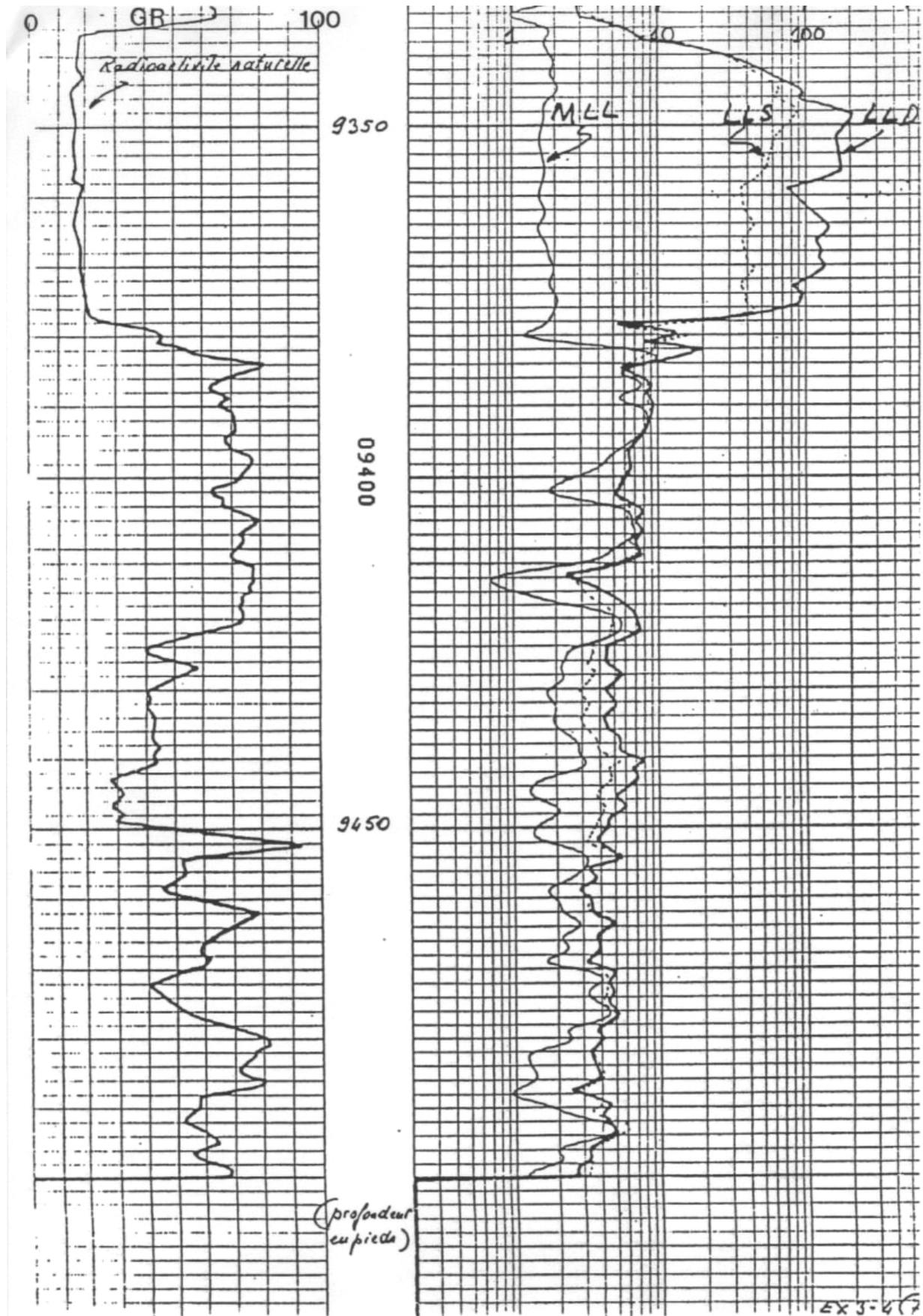
A partir des lectures de résistivités de la zone à eau, calculer  $R_w$ ,  $F$  et la porosité.

A partir de la courbe gamma ray calculer le pourcentage d'argile pour les zones :

9430' – 9440'

9442' – 9448'

N.B. On fait l'hypothèse simplificatrice que les résistivités lues par les différents dispositifs n'ont pas besoin d'être corrigées pour l'effet de tour. D'autre part la résistivité du filtrat de boue est à cette profondeur est  $R_{mf} = 0.1 \text{ Ohm.m}$ .



**T. P. Diagraphies électriques 3**

Identifier les courbes de PS, petite normale, grande normale et latéral.

Donner les échelles.

Tracer la ligne de base de la P.S.

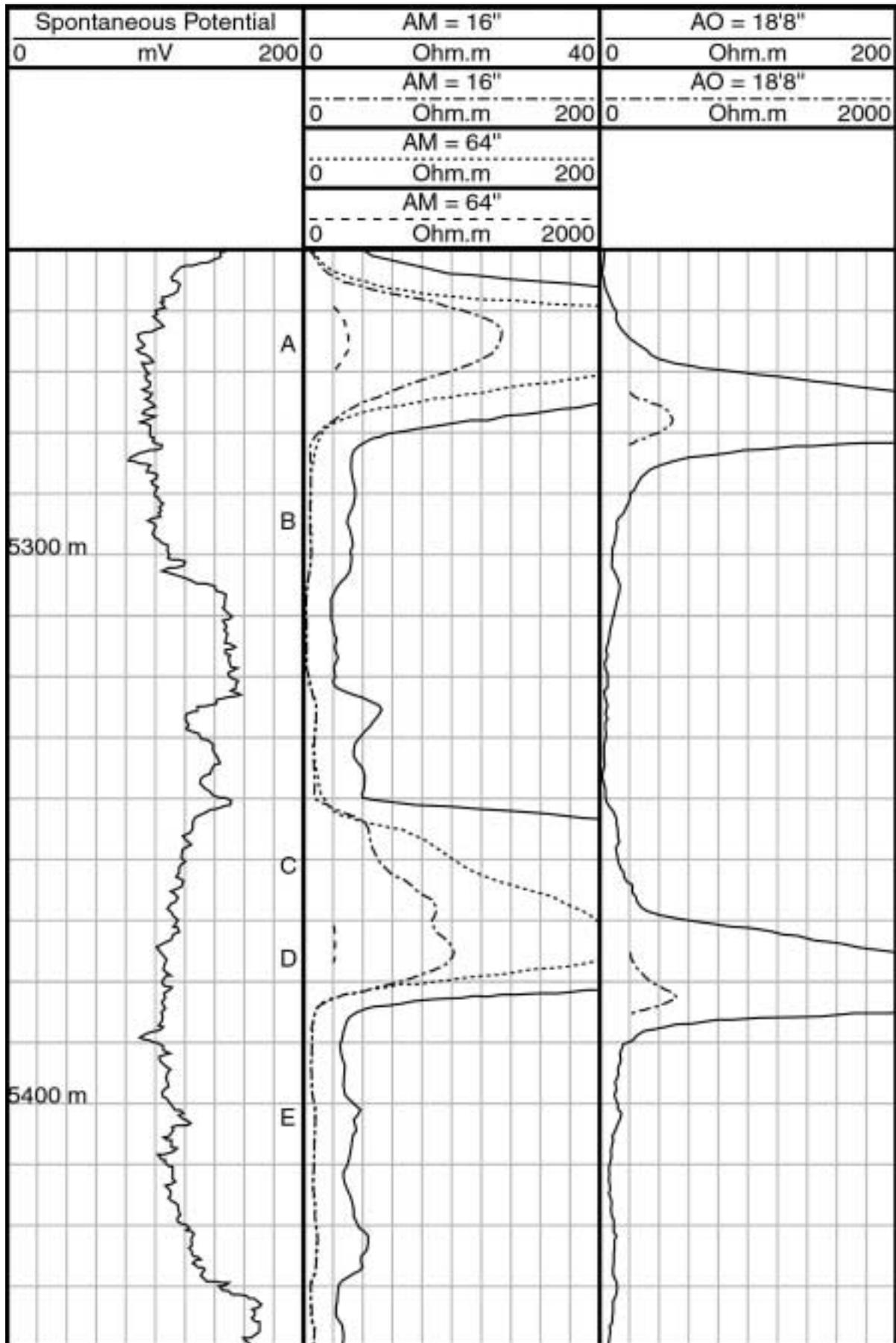
Exécuter une coupe lithologique en indiquant les limites des couches.

Voyez-vous un contact eau-hydrocarbure ?

Donner les valeurs de la P.S., petite normale, grande normale et latérale aux profondeurs indiquées.

La lecture de la latéral à 5350' est elle significative ?

Profondeurs	P.S.	R16''	R64''	R18'8''
A(5265')				
B(5295')				
C(5350')				
D(5365')				
E(5390')				



**T.P. Diagraphies électriques 4**

Identifier les courbes de diamètre et de microlog.

Donner les échelles.

Indiquer les endroits ayant un dépôt de boue et ceux pour lesquels la séparation du microlog est positive. Y a-t-il corrélation ?

Lires les valeurs aux profondeurs indiquées.

Faire la coupe lithologique.

Profondeurs	P.S.	Rind	R16''	R1'x1'	R2''	e
A						
B						
C						
D						
E						
F						

