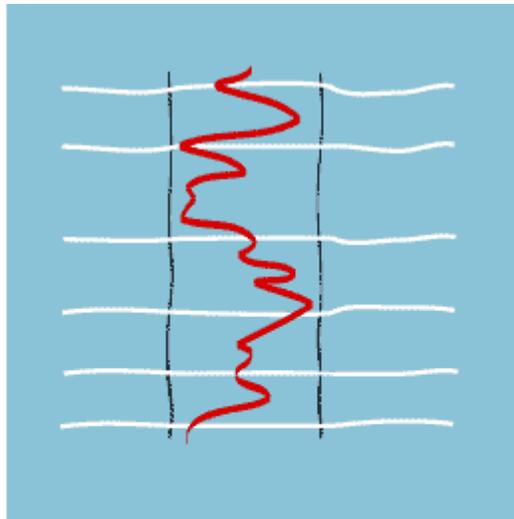


DIAGRAPHIES ACQUIFERES



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

Professeur
D. Chapellier

Assistant L. Baron

Table des matières

1.	Introduction générale.....	7
1.1.	Introduction	7
1.2.	Le forage.....	8
1.3.	Les diagraphies.....	12
1.3.1.	Les moyens techniques d'enregistrement	12
1.3.2.	Présentation d'une diagraphie.....	15
1.4.	L'invasion	17
2.	La Résistivité.....	25
2.1.	Introduction	25
2.1.1.	La qualité de l'électrolyte.....	25
2.1.2.	La quantité et le mode de distribution de l'électrolyte.....	26
2.1.3.	La résistivité des roches dans la zone lavée	26
2.1.4.	La résistivité des roches dans la zone vierge.....	26
2.2.	La saturation	27
2.3.	Conclusions	28
2.4.	Travaux pratiques : Résistivité.....	35
3.	Le log PS	36
3.1.	Introduction	36
3.2.	Le paramètre enregistré	36
3.2.1.	Origine de la P.S.....	36
3.2.2.	Le potentiel de membrane	36
3.2.3.	Le potentiel de jonction liquide.....	37
3.2.4.	Cas général	38

3.3.	La mesure	40
3.3.1.	La mise en œuvre.....	40
3.3.2.	Facteurs parasites	40
3.4.	Interprétation qualitative	40
3.4.1.	Facteurs influençant la forme et l'amplitude des déflexions P.S.	45
3.5.	Interprétation quantitative	49
3.5.1.	Détermination de R_w à partir de la P.S.	49
3.5.2.	Calcul du pourcentage d'argile	50
3.6.	Travaux pratiques	53
4.	Les logs électriques	61
4.1.	Introduction	61
4.2.	Le log single point ou monoélectrode	61
4.2.1.	Principe.....	61
4.2.2.	Réponse du single point.	64
4.3.	Le dispositif normal ou Normal device	65
4.3.1.	Principe.....	65
4.3.2.	Réponse de la sonde normale	65
4.4.	La sonde latérale.....	69
4.4.1.	Principe.....	69
4.4.2.	Réponse de la sonde latérale	70
4.4.3.	Détermination du pourcentage d'argile	76
4.5.	Les outils focalisés	78
4.6.	Les outils électromagnétiques	81
4.7.	Travaux pratiques : les outils de résistivité	84

5.	Le gamma ray	85
5.1.	Introduction	85
5.2.	La radioactivité naturelle.....	85
5.3.	Le paramètre enregistré	87
5.4.	La mesure	89
5.4.1.	La mise en œuvre.....	89
5.4.2.	Echelle et unités.....	90
5.5.	Interprétation qualitative	94
5.6.	Interprétation quantitative	94
5.7.	Conclusions	94
5.8.	Travaux pratiques : gamma ray	99
6.	La radioactivité provoquée	103
6.1.	Introduction	103
6.2.	Le log gamma-gamma, log densité.....	103
6.2.1.	Principe.....	103
6.2.2.	La mesure	104
6.2.3.	La réponse de l'outil	104
6.2.4.	Effet des argiles	105
6.3.	Le log neutron.....	106
6.3.1.	Principe.....	106
6.3.2.	La mesure	107
6.3.3.	La réponse de l'outil	108
6.3.4.	Effet des argiles	109
6.4.	Calibrations	109

6.4.1.	Saturation	109
6.4.2.	Mesures sur carottes	109
6.5.	Travaux pratiques	115
7.	Le log sonique	117
7.1.	Introduction	117
7.2.	Principe.....	117
7.3.	La mesure	121
7.4.	Perturbations.....	121
7.5.	Modules d'élasticité	122
7.6.	Cimentation	123
8.	Autres diagraphies.....	126
8.1.	Résistivité du fluide.....	126
8.2.	Température.....	129
8.3.	Caliper	131
9.	Dilution technique.....	133
9.1.	Introduction	133
9.2.	Aspects théoriques.....	133
9.2.1.	Equations de base	133
9.2.2.	Concentration et résistivité.....	134
9.2.3.	Effet de la température	135
9.2.4.	Vitesse apparente et vitesse de filtration	135
9.2.5.	Vitesse de filtration et perméabilité.....	137
9.2.6.	Calcul de la vitesse apparente et du débit.....	138
9.3.	Aspects pratiques et mise en œuvre	139

9.3.1.	Mesure des paramètres initiaux.....	139
9.3.2.	Méthode d'injection	139
9.3.3.	Mesures en continu de la résistivité	141
10.	Débitmètre thermique.....	142
10.1.	Principe de la méthode	142
10.2.	Principe de fonctionnement.....	142
10.3.	Conditions d'utilisation.....	143
11.	Conclusions	145
11.1.	Les conditions d'enregistrement	145
11.2.	La qualité des enregistrements	145
11.3.	L'interprétation	146
11.3.1.	La localisation des réservoirs	146
11.3.2.	La porosité.....	147
11.3.3.	La perméabilité.....	147
11.3.4.	La qualité de l'eau du réservoir	147
11.4.	Bibliographie.....	148

1. INTRODUCTION GENERALE

1.1. 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 (Fig. 1.1) :

- 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. 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.

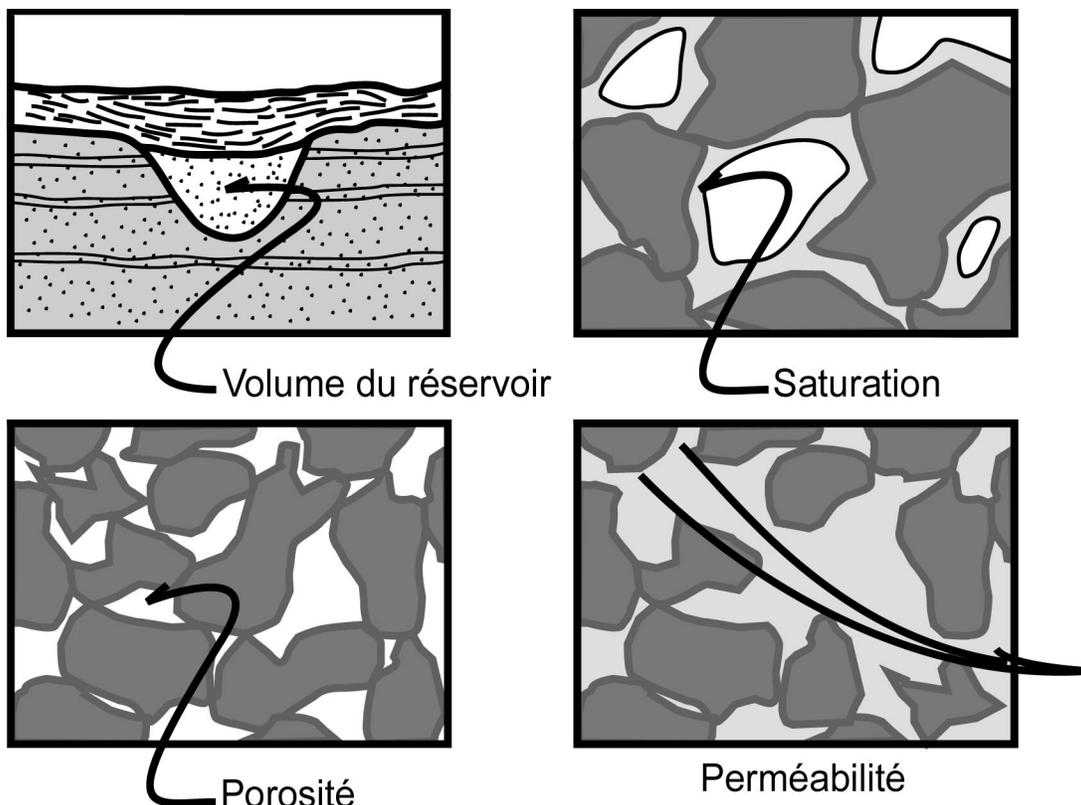


Figure 1.1 : Volume, porosité, saturation, perméabilité d'un réservoir.

1.2. 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 ou air (Fig. 1.2).

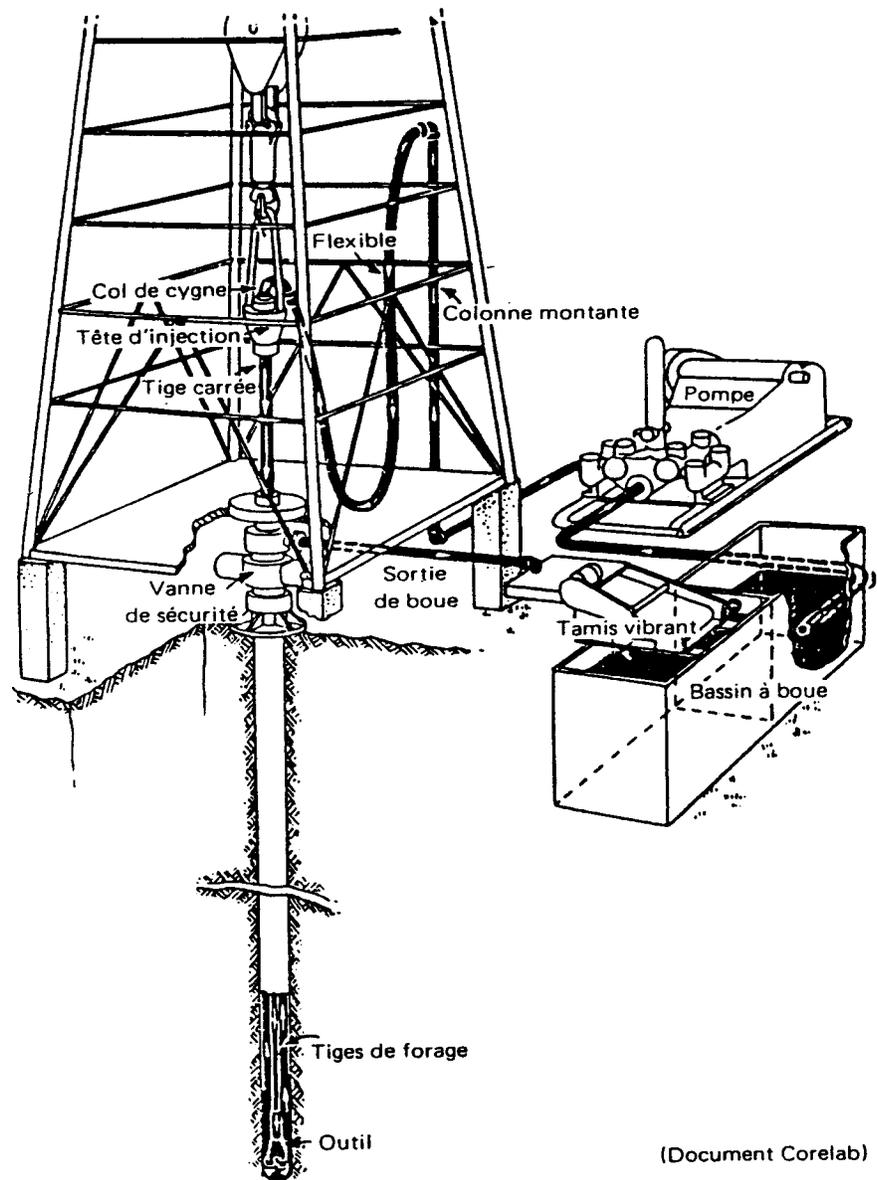
Le fluide qui remplit le trou de forage a des rôles multiples qui sont :

- **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. Le fluide exerce sur les formations une contre-pression. Cette contre-pression a bien évidemment une influence sur l'état des contraintes 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 que l'on appelle mud-cake ou gâteau de boue. Ce dernier 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 aux valeurs appropriées.

La reconnaissance des formations traversées par un sondage se fait tout d'abord en exploitant les informations obtenues au 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** (Fig. 1.3).

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.



(Document Corelab)

Figure 1.2 : Circulation de la boue.

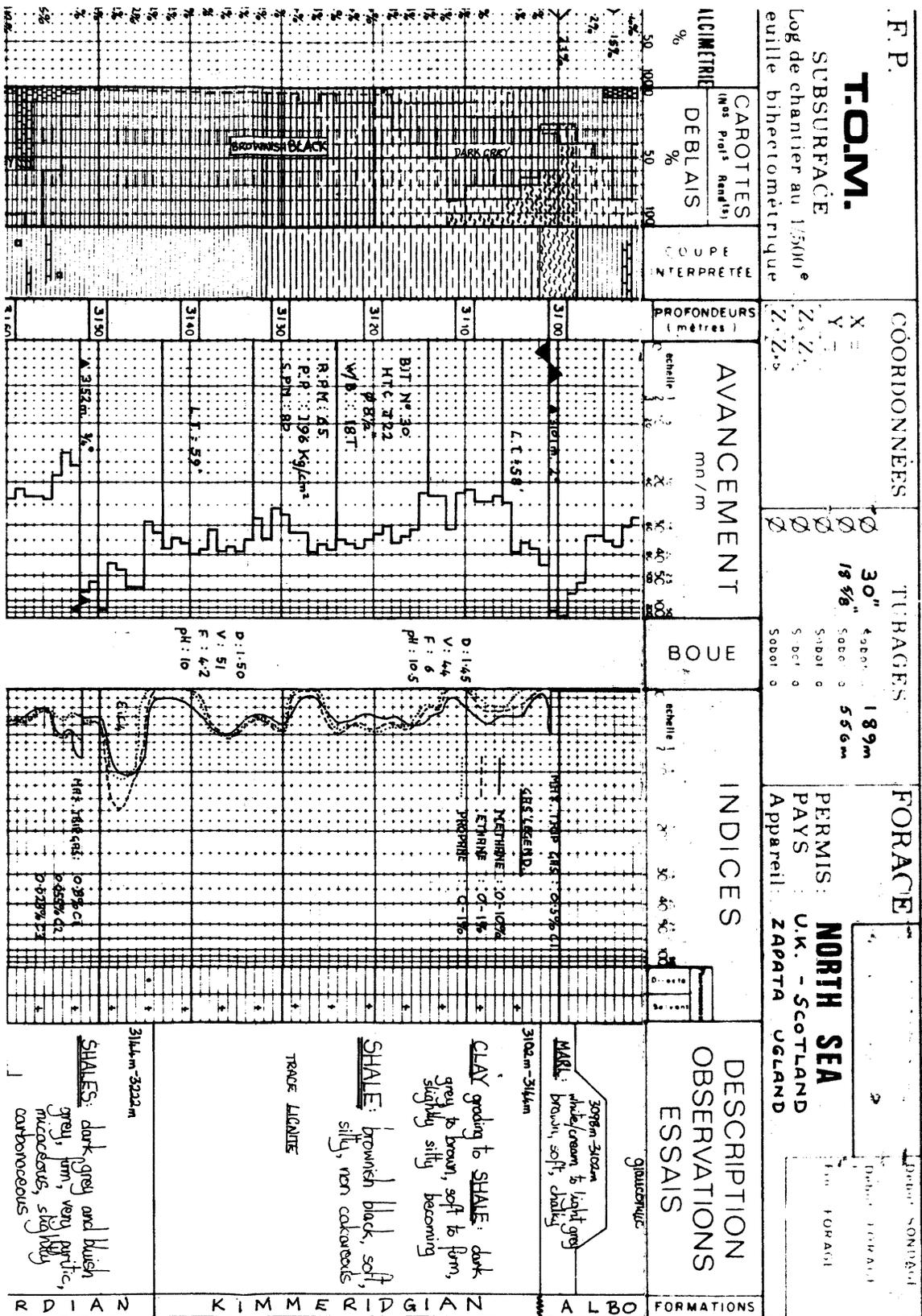


Figure 1.3 : Diagraphies en cours de forage.

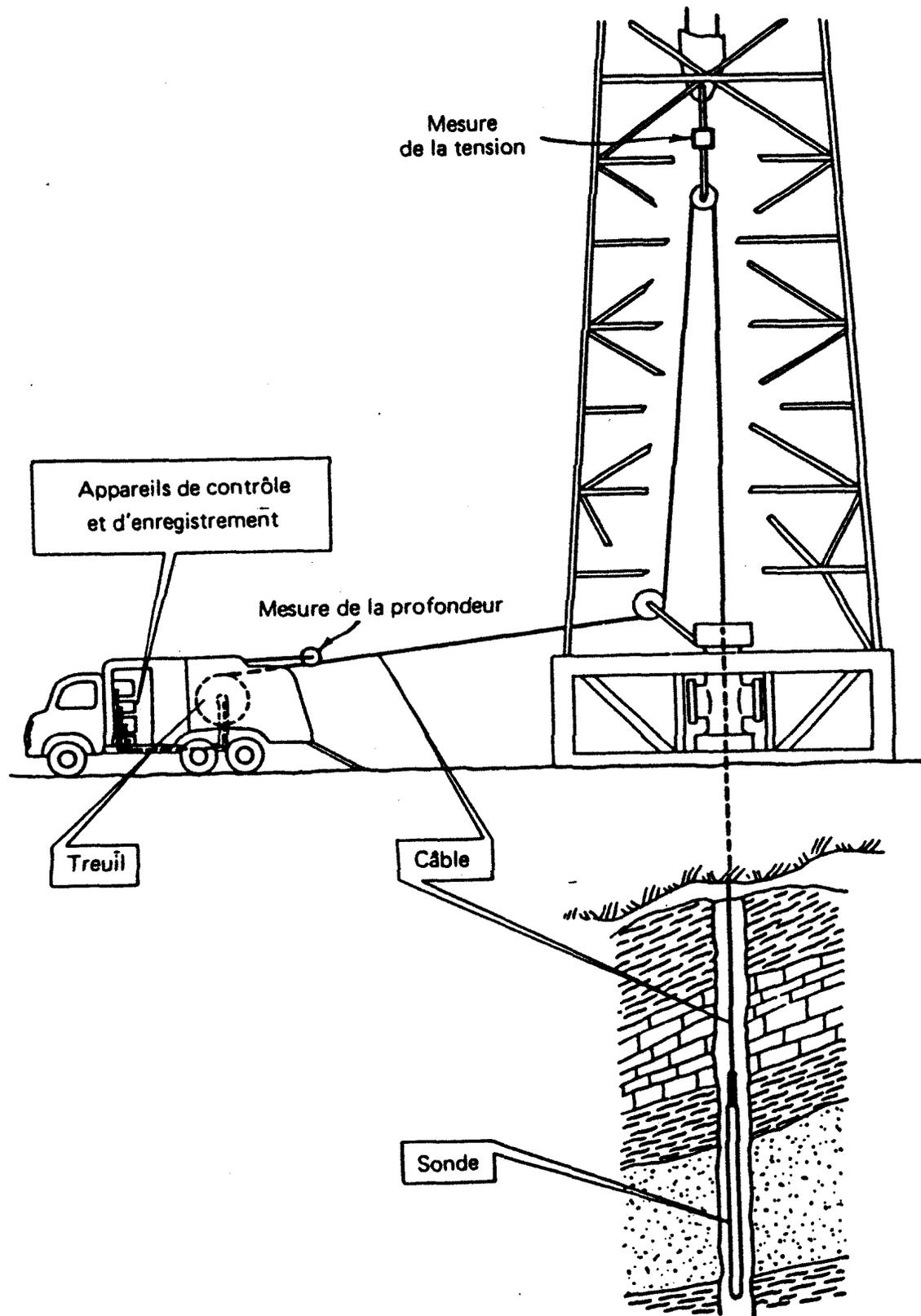


Figure 1.4 : Diagraphies différées.

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'autre fois sélectionnés en fonction de critères subjectifs.

Certaines informations ne peuvent être fournies par le carottage : 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.

1.3. 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 physique 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** (Fig. 1.4).

Des outils, 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 connus, 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.

1.3.1. 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 (Fig. 1.5). 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 de recalibrer les diagraphies entre elles.
- **Les circuits de contrôle et de commande** des appareils de mesure, ainsi que les équipements de traitement de l'information (Fig. 1.6). 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 (Fig. 1.7). 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 est synchrone du déroulement du câble et l'enregistrement se fait en fonction de la profondeur. De plus en plus un enregistreur digital remplace les dispositifs analogiques (Fig. 1.8).

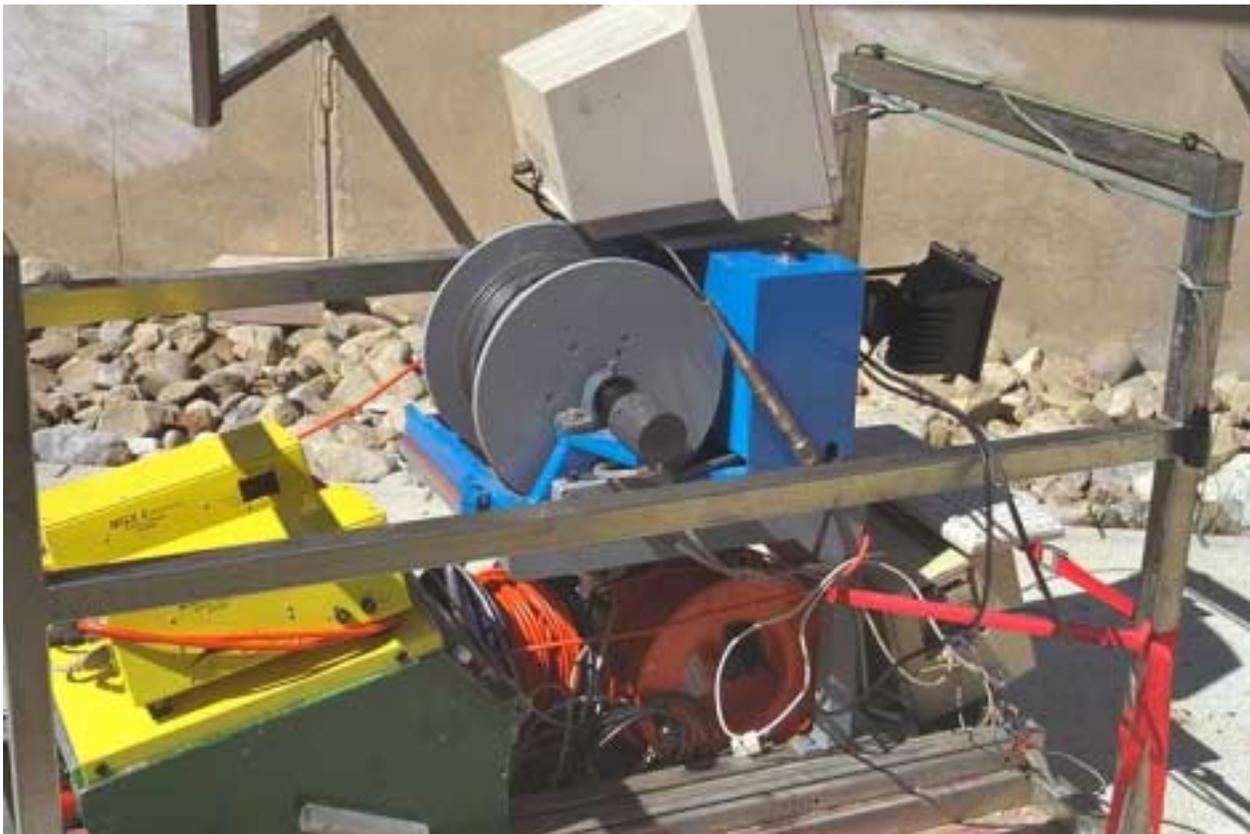


Figure 1.5 : Treuil.



Figure 1.6 : Boîtier de commande et de digitalisation de l'équipement Mount Sopris.



Figure 1.7 : Sonde combinée (Normales, monoélectrode, polarisation spontanée, gamma ray, température, résistivité du fluide).



Figure 1.8 : Système d'acquisition de l'équipement OYO.

1.3.2. Présentation d'une diagraphie

La présentation est très importante. Sur l'en tête du log on doit voir figurer un certain nombre de renseignements indispensables (Fig. 1.9) :

- le nom de la compagnie,
- le numéro du forage et ses 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 : provenance de l'échantillon de boue, en général, pris à la dernière circulation,
- Rm (m = mud = boue) : résistivité de la boue,
- Rmf (mud filtrate) : résistivité du filtrat,
- Rmc (mud cake) : résistivité du mud cake,
- Time since circulation : temps qui s'est écoulé après la dernière circulation jusqu'au log,
- Permanent datum : niveau de référence (très important en diagraphies pour l'eau),
- Casing : tubage,
- KB : Kelly bush, élévation de la table de forage.



Institut de Géophysique
Université de Lausanne
Faculté des Sciences

Company Institut de Géophysique
 Well Cugy_ar
 Field Cugy nord
 County Cugy State Vaud Country Switzerland
 Location Route cantonale de Cugy, sortie Nord à gauche

Section _____ Township _____ Range _____ API Num NAN
 Permanent Datum 685 Elevation 685 K.B. 686
 Log Measured From 0 39.5 Above Perm Datum D.F. _____
 Drilling Meas From 0 G.L. _____

	Run 1	Run 2	Run 3
Date	18-09-80	20-10-93	10-08-99
Depth - Driller	40.5	40.5	40.5
Depth - Logger	39.5	39.4	39.2
Btm Log Interval	39.5	39.4	39.2
Top Log Interval	0.5	0.5	7.2
Casing - Driller	3"	3"	3"
Casing - Logger	2.5"	2.5"	2.5"
Bitsize	5"	5"	5"
Type Fluid in Hole	Water	Water	Water
Dens. /Visc.	1 /	1 /	1 /
pH / Fluid Loss	7 /	7 /	7 /
Source of Sample	Top Hole	Top Hole	Top Hole
Rm @ Meas. Temp		14 Oh.@ 10C	14 Oh.@ 10C
Rmf @ Meas. Temp			
Rmc @ Meas. Temp			
Source: Rmf / Rmc			
Rm @ BHT		14 Oh.@ 11C	14 Oh.@ 11C
Max. Rec. Temp.		12 C @ 1 m	12 C @ 1 m

Cugy_ar
 9 Dec 1999 @ 12:20
 DEPTH (M)
 Interval: 2.00 to 36.00
 Depth Scale Ratio: 1/200

GG 3000 cps 1000	PORRMS 0.7 0	DENRMS 1.9 g/cc 2.9	DENMRMS 2.5 g/cc 3.5	PEB 0 1	VSH 0 1
NN 0 cps 1000	PORNN 0.7 0	DENNN 1.9 g/cc 2.9	DENMNN 2.5 g/cc 3.5	SAND 0 1	VQ 0 1
DIAM 0 in 10	PORLAB 0.7 0 0	DENLAB 1.9 g/cc 2.9	DENMLAB 2.5 g/cc 3.5	SCLAY 0 1	
DSCALFG 2 in 6					

Figure 1.9 : Exemple d'en tête de diagraphies.

1.4. L'invasion

D'une manière générale, la présence du fluide de forage est génératrice de perturbations.

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 (Fig. 1.10).

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

La figure suivante 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 refoulé toute l'eau de formation créant la zone lavée.

Cette zone a pour résistivité R_{x0} .

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_f (Fig. 1.11).

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 .

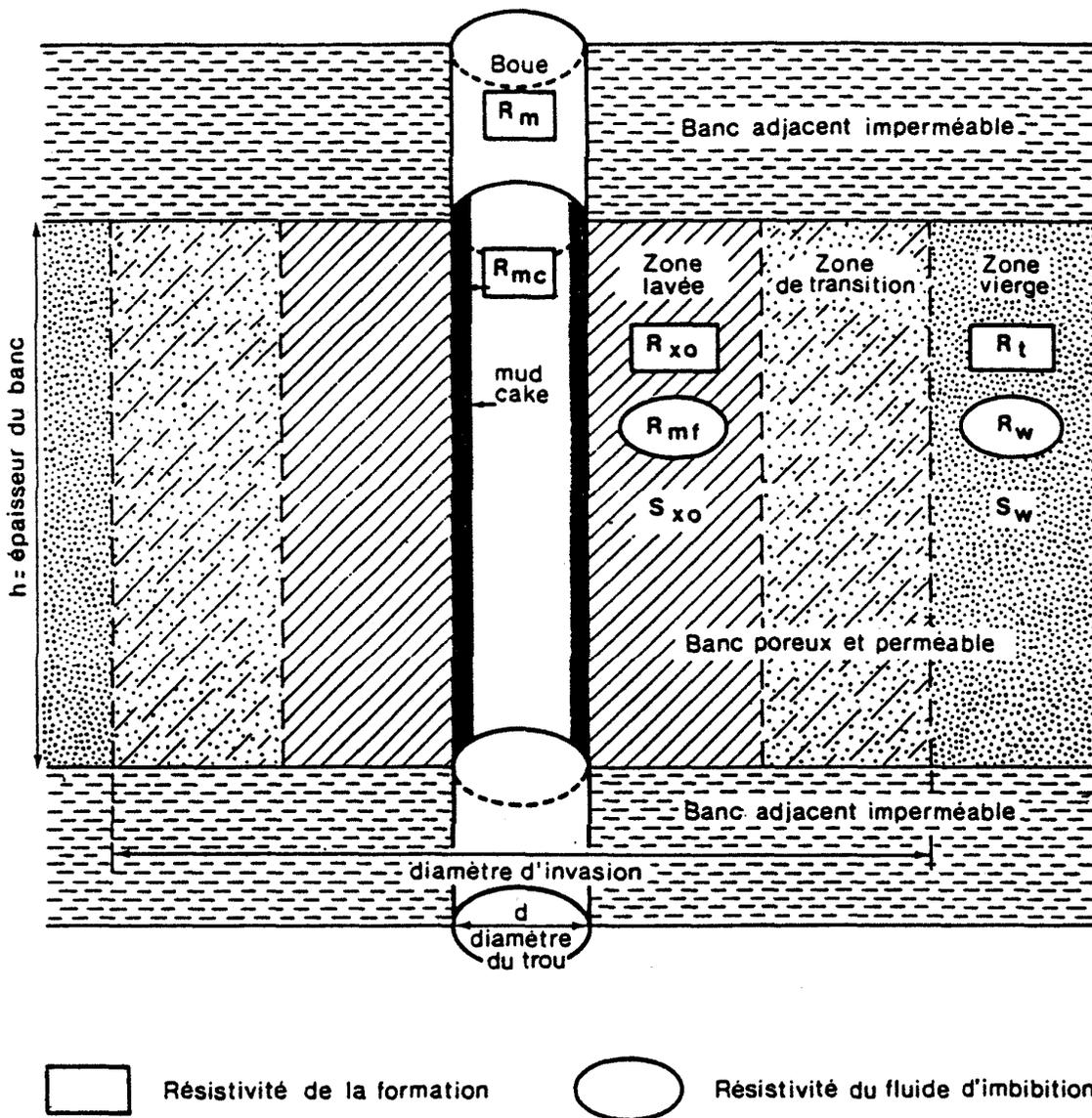


Figure 1.10 : Représentation schématique de l'invasion.

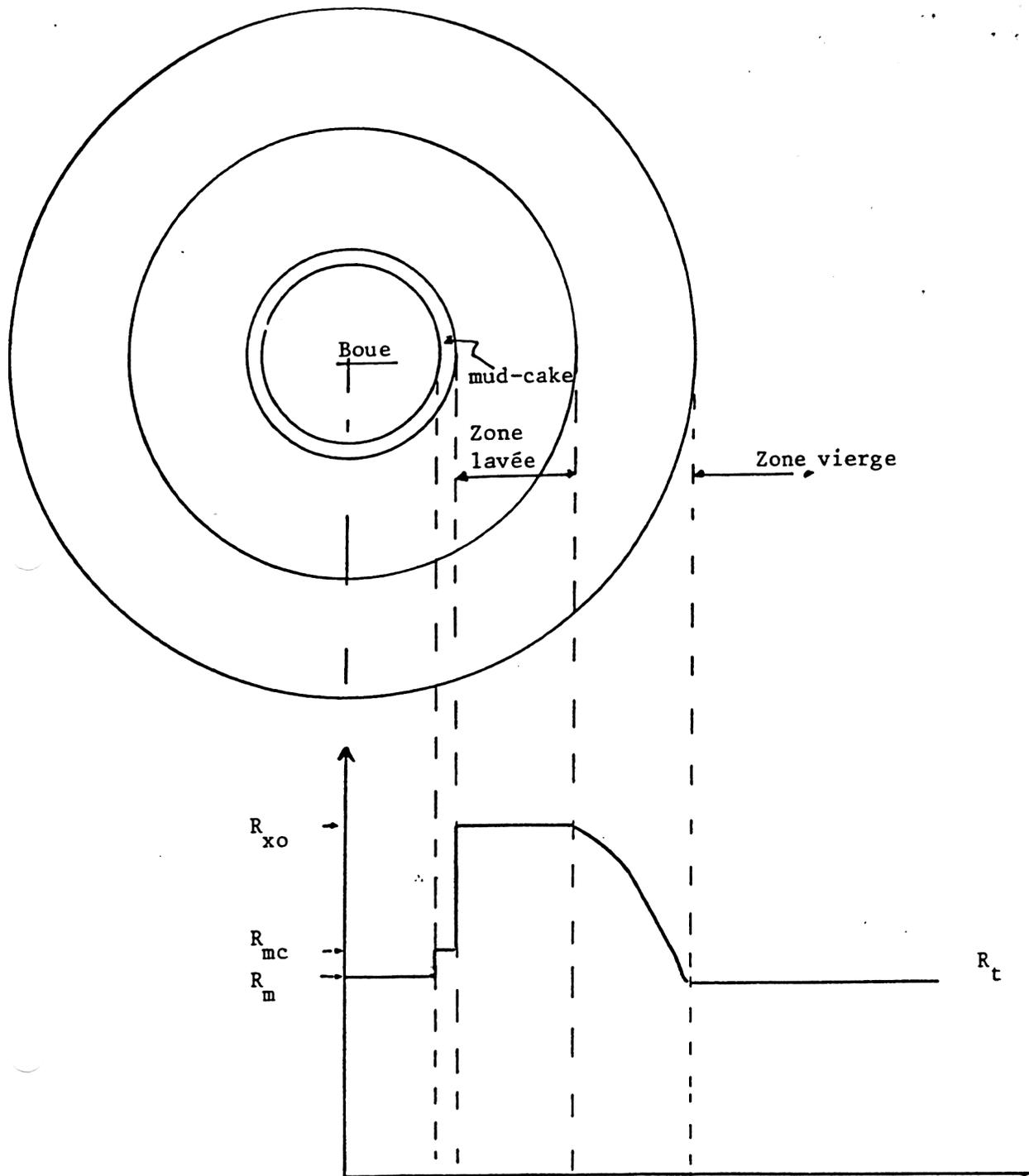


Figure 1.11 : Représentation schématique de la zone envahie.

igl

GEOLOG

CLIENT: Gester

Date : 23 02 2000

Lieu: Solvay, Usine de Tavaux

Coordonnées du forage:

Forage No: S1

Compagnie de Forage:

Altitude du forage au sol:

Altitude du forage tubage:

Référence origine altitude logging (dessin): Sol

Type de géologie: Quaternaire

Prof. de l'eau: 4.6 m

Profondeur du trou: 12.5 m

Diamètre du trou:

Type de tubage: PVC crépiné

Diamètre tubage ext.: 90 mm

Int.: 80 mm

Nature du fluide de forage: **Type: Eau**
Densité: 1 g/cc
Viscosité:

Temps écoulé après la dernière circulation de boue: 1 mois

R_m: **à T:** **°C**

R_{mf}: **à T:** **°C**

R_{mc}: **à T:** **°C**

—

Heure d'arrivée: 9h45

Heure de départ: 12h55

Diagraphies enregistrées:

Température, Résistivité du fluide, Gamma ray naturel, Polarisation spontanée, Monoélectrode, Normale 8 in, Normale 16 in, Normale 32 in, Laterolog 3, Electromagnétique, Gamma-gamma densité, Neutron-neutron porosité, Sonique.

—

Forage No : S1

<p>Log enregistré: Température Fichier: S1.ea0 Prof. début: 2.1 m Prof. fin: 12.2 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 5-15 °C Depth preset: 2.12 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>	<p>Log enregistré Résistivité du fluide Fichier: S1.ea0 Prof. début: 2.1 m Prof. fin: 12.2 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 0-10 Ohm.m Depth preset: 2.14 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>
<p>Log enregistré: Gamma ray naturel Fichier: S1.ea0/S1.ea1(reppeat) Prof. début: 0.7 m Prof. fin: 10.8 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 0-120 cps Depth preset: 0.63 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>	<p>Log enregistré: Polarisation spontanée Fichier: S1.ea0/S1.ea Prof. début: 4.5 m Prof. fin: 10.2 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 0-1000 mV Depth preset: 0.15 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>
<p>Log enregistré: Monoélectrode Fichier: S1.ea0 Prof. début: 6.2 m Prof. fin: 11.9 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 0-500 Ohms Depth preset: 1.78 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>	<p>Log enregistré: Normale 8 in Fichier: S1.ea0 Prof. début: 6 m Prof. fin: 11.9 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 0-100 Ohm.m Depth preset: 1.68 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>
<p>Log enregistré: Normale 16 in Fichier: S1.ea0 Prof. début: 6.1 m Prof. fin: 11.8 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 0-100 Ohm.m Depth preset: 1.57 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>	<p>Log enregistré: Normale 32 in Fichier: S1.ea0 Prof. début: 5.9 m Prof. fin: 11.6 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 0-100 Ohm.m Depth preset: 1.37 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>

<p>Log enregistré: Laterolog 3 Fichier: S1.ia0 Prof. début: 5.8 m Prof. fin: 12 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 0-200 Ohm.m Depth preset: 1.12 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>	<p>Log enregistré: Electromagnétique Fichier: S1.ia1 Prof. début: 1.9 m Prof. fin: 11.5 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 0-200 Ohm.m Depth preset: 1.01 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>
<p>Log enregistré: Gamma-gamma Fichier: S1.la1/S1.la2 (repeate) Prof. début: 1.3 m Prof. fin: 12 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 10000-0 cps Depth preset: 1.33 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>	<p>Log enregistré: Neutron-neutron Fichier: S1.ga0/S1.ga0 (repeate) Prof. début: 1 m Prof. fin: 12 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 0-1500 cps Depth preset: 1.06 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>
<p>Log enregistré: Sonique Fichier: S1bis.sf0 Prof. début: 4.6 m Prof. fin: 10.9 m Echelle verticale: 1/50 Echelle horizontale: 1400-2400 m/s Depth preset: 1.3 m Vitesse d'enregistrement: 2.5 m/min</p>	

Exemple de feuille de terrain à remettre lors d'une campagne de diagraphies.

LISTE DES TERMES UTILISES EN DIAGRAPHIE

BHT	Température du fond du trou	[°C] ou [°F]
T_f	Température de la formation	[°C] ou [°F]
TD	Profondeur totale	[m] ou [ft]
d	Diamètre du forage	[inches]
d_i	Diamètre moyen de la zone envahie	[inches]
R_m	Résistivité de la boue	[Ohms.m]
R_{mc}	Résistivité du mud-cake	[Ohms.m]
R_{mf}	Résistivité du filtrat	[Ohms.m]
R_w	Résistivité de l'eau d'imbibition	[Ohms.m]
R_t	Résistivité de la formation (zone vierge)	[Ohms.m]
R_{xo}	Résistivité de la zone lavée	[Ohms.m]
F	Facteur de formation	sans unité
φ	Porosité	[%] ou [0-1]
S_w	Saturation en eau (zone vierge)	[%] ou [0-1]
S_{xo}	Saturation en filtrat dans la zone lavée	[%] ou [0-1]
K	Perméabilité	[mDarcies]
Δt	Temps de transit	[μsec/ft]
ρ_b	Densité de la formation	[g/cm³]
ρ_{ma}	Densité de la matrice	[g/cm³]
ρ_f	Densité du fluide	[g/cm³]
cps	Coups par seconde	[cps]
cpm	coups par minute	[cps]
m	facteur de cimentation	sans unité
n	exposant de saturation	sans unité

2. LA RESISTIVITE

2.1. Introduction

Parmi les paramètres mesurés par les outils de diagraphies il en est un qui intervient à maintes reprises : **la résistivité électrique des roches**.

La résistivité électrique des roches **R**, 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 ϕ ,
- **du mode de distribution de l'électrolyte**.

2.1.1. La qualité de l'électrolyte

La résistivité d'un électrolyte dépend de : sa teneur en ions, 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 g/l = 1000 ppm, 1 mg/l = 1 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 et de la température, 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.

2.1.2. 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, ϕ = porosité en %, 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 :

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

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

$$R_t = R_w \cdot F$$

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.

2.1.3. 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.

2.1.4. 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 :

$$\mathbf{R}_{mf} > \mathbf{R}_w \text{ ce qui entraîne } \mathbf{R}_{xo} > \mathbf{R}_t$$

2.2. La saturation

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

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{\mathbf{R}_0}{\mathbf{R}_t}} \quad \text{et} \quad S_{xo} = \sqrt[n]{\frac{\mathbf{R}_{xo0}}{\mathbf{R}_{xo}}}$$

\mathbf{R}_0 , résistivité de la roche dans la zone saturée en eau, \mathbf{R}_t , résistivité de la roche dans la zone sous-saturée. \mathbf{R}_{xo0} , résistivité de la roche dans la zone saturée en eau de la zone envahie, \mathbf{R}_{xo} , résistivité de la roche dans la zone sous-saturée de la zone envahie.

Formule que l'on peut aussi écrire :

$$\frac{\mathbf{R}_0}{\mathbf{R}_t} = S_w^{-n}$$

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

$$\mathbf{R}_t = \mathbf{R}_w \cdot a \cdot \phi^{-m} \cdot S_w^{-n}$$

et pour la zone lavée :

$$\mathbf{R}_{xo} = \mathbf{R}_{mf} \cdot a \cdot \phi^{-m} \cdot S_{xo}^{-n}$$

avec S_{xo} = saturation en filtrat et S_w = saturation en eau.

Pour des réservoirs pétroliers 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.

2.3. Conclusions

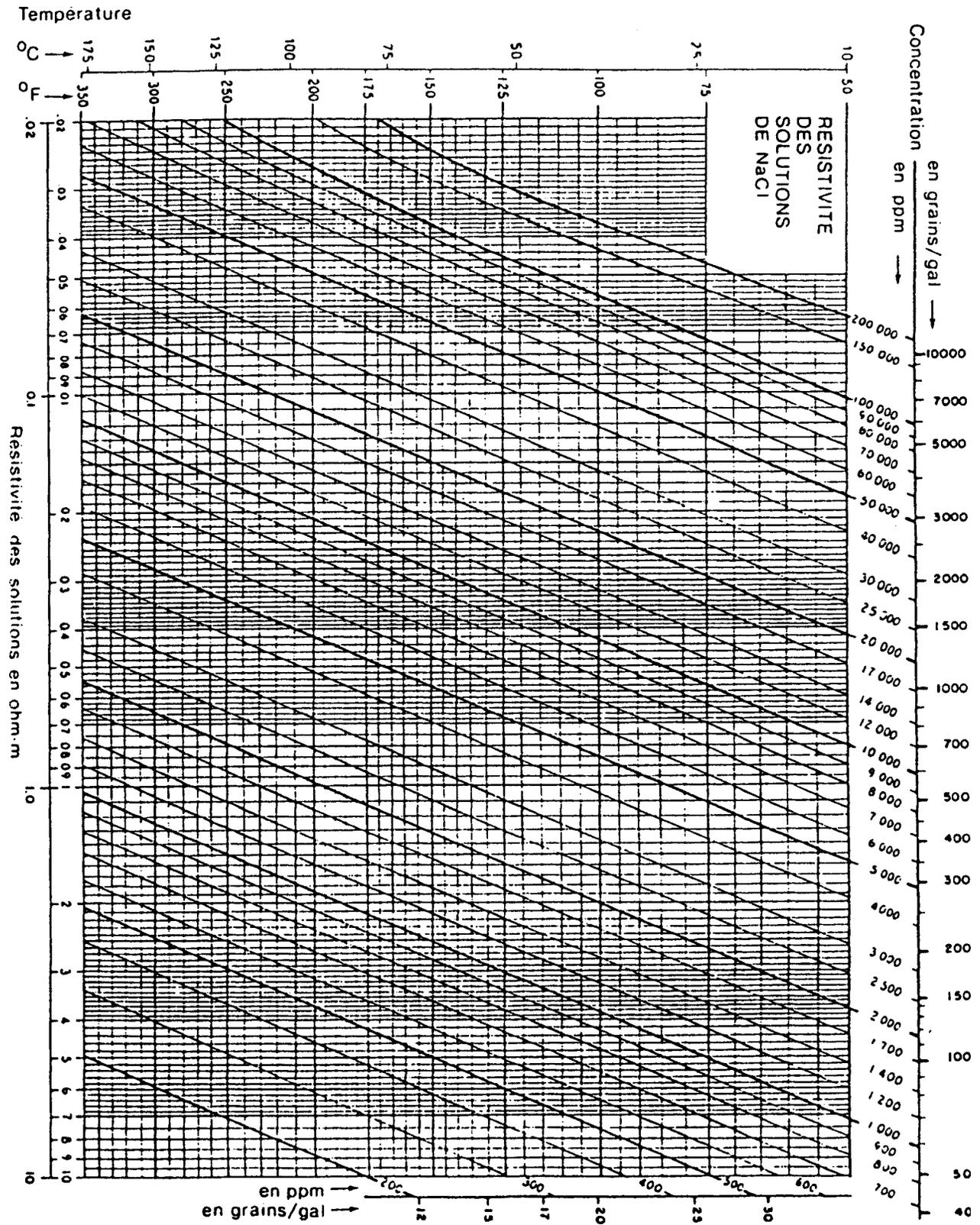
Il résulte de ce que nous venons de voir que les résistivités électriques mesurées dépendent pour une part des conditions géologiques naturelles et pour une part de l'action des fluides de forage.

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

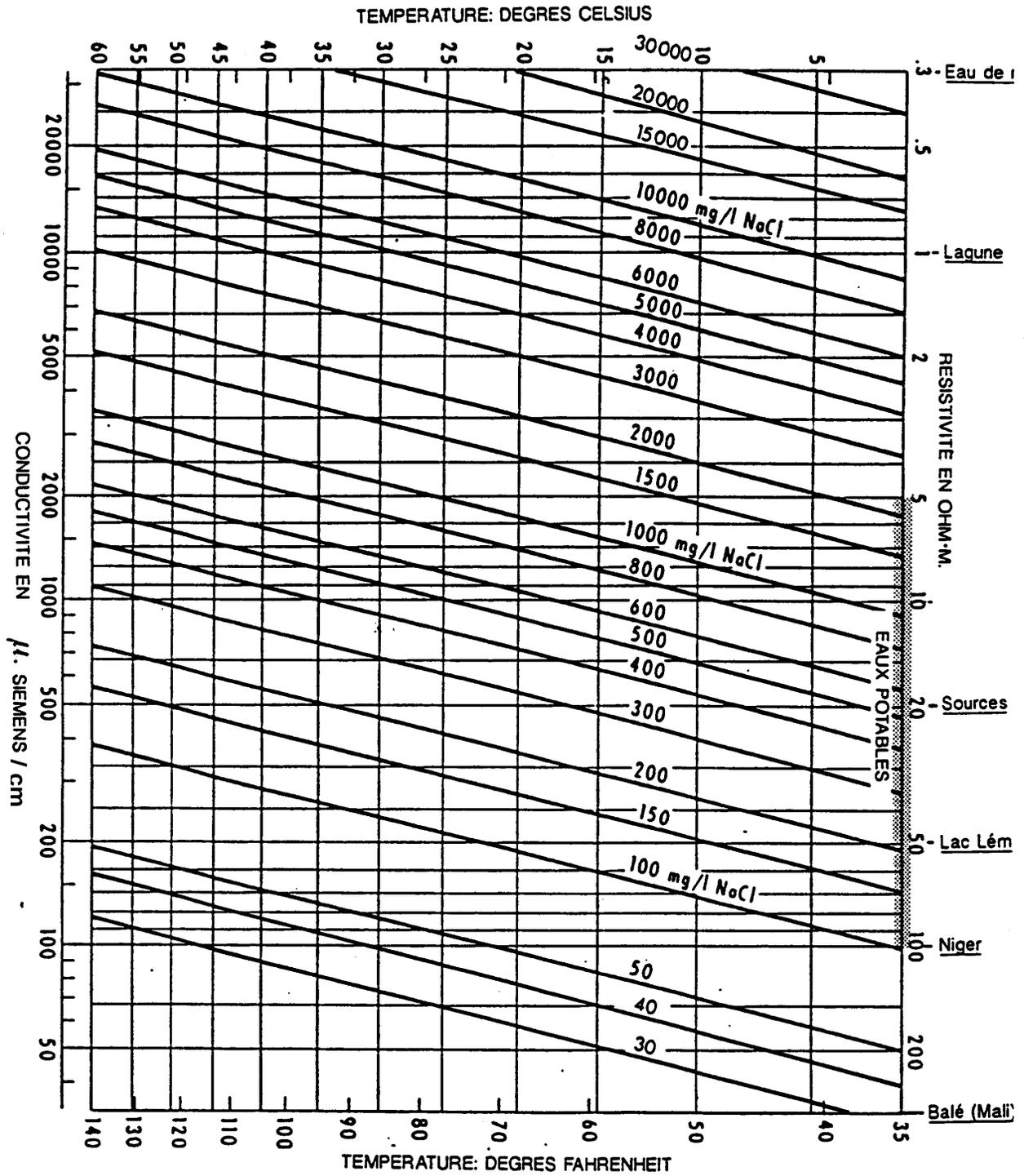
Il est indispensable, lorsque l'on désire interpréter quantitativement les mesures, de connaître **toutes les caractéristiques de la boue utilisée**. L'**abaque 4** permet lorsque l'on connaît la résistivité de la boue d'en déduire la résistivité du mud cake et celle du filtrat. On peut aussi appliquer la relation approximative suivante :

$$R_{mc} = 1.5 R_m \text{ et } R_{mf} = 0.75 R_m$$

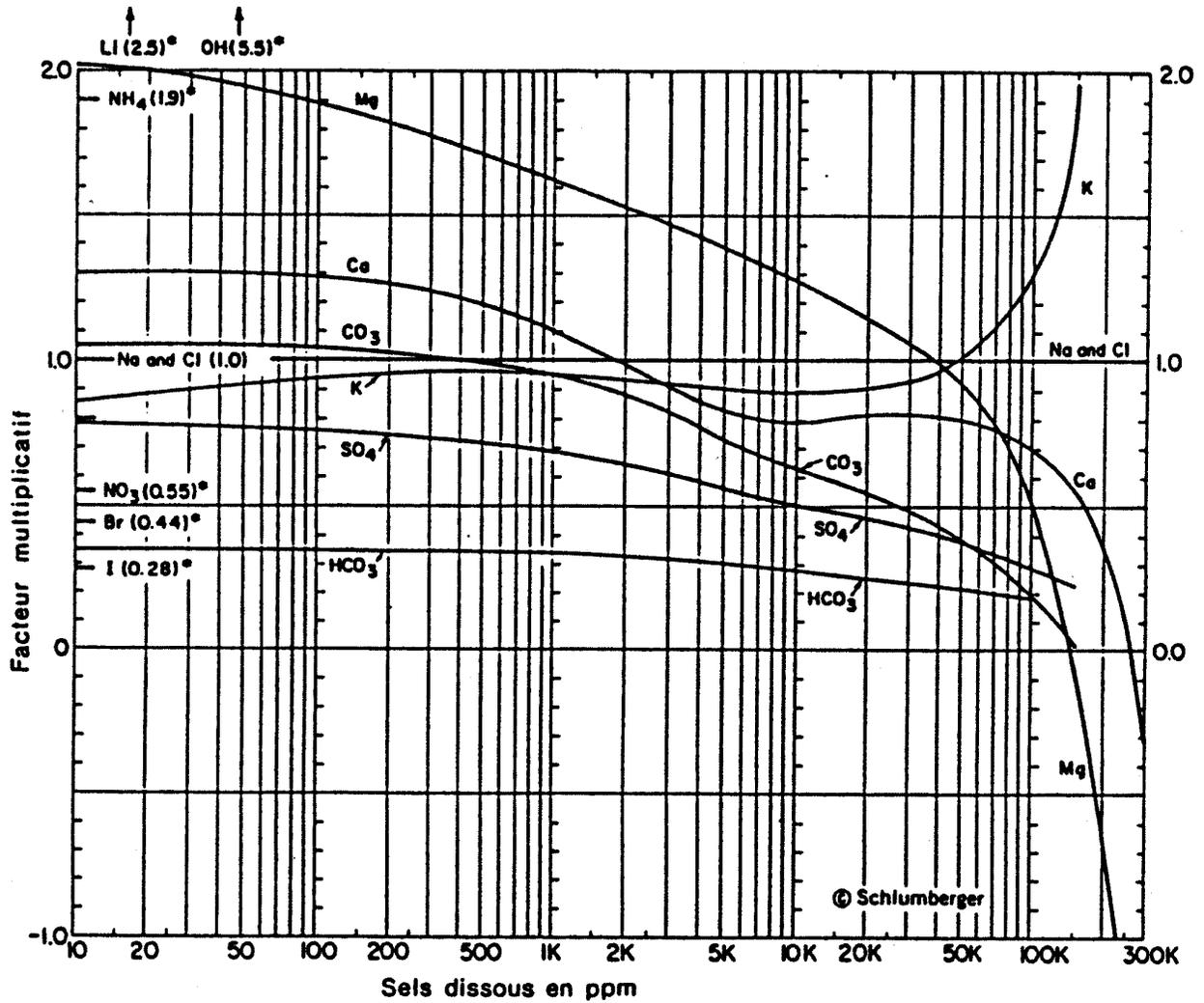
Lors des interprétations quantitatives, il ne faut pas oublier de ramener les diverses résistivités R_m , R_{mf} , R_{mc} , R_t , etc. à la température de la formation considérée.



Abaque 1 : Résistivité - Température - Salinité.



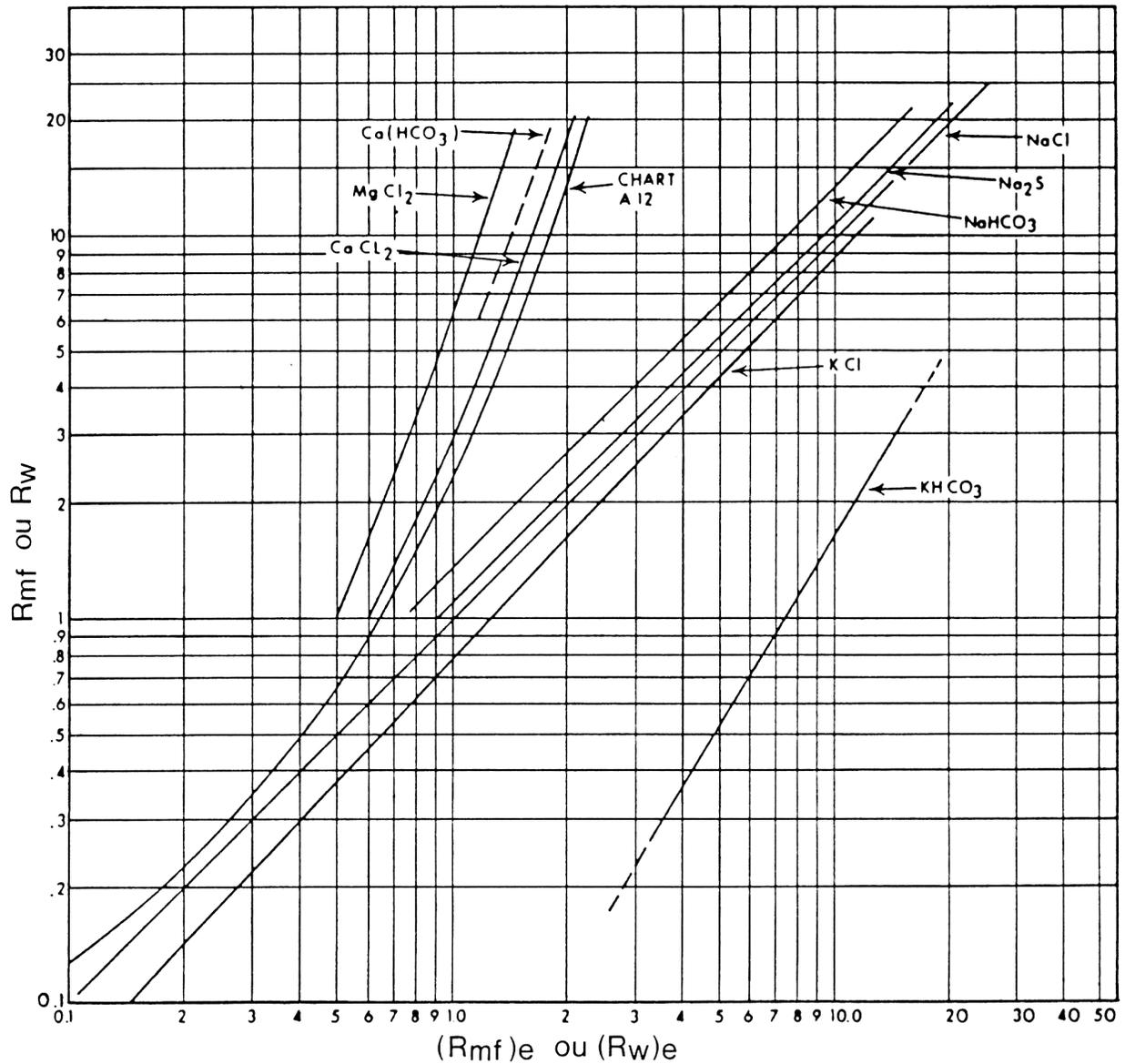
Abaque 1 Bis : Résistivité - Température - Salinité.



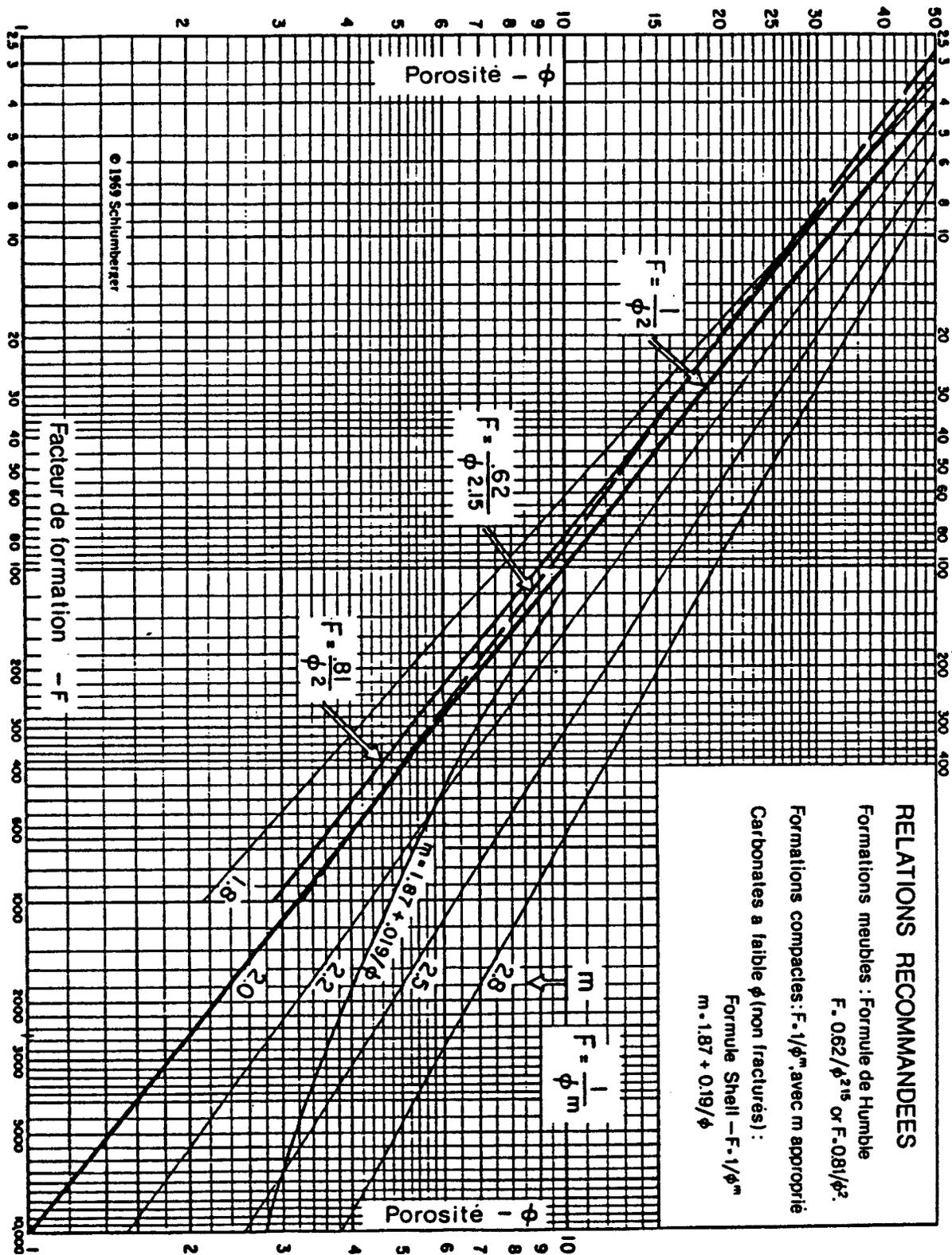
Exemple de calcul:

Ions	Concentration en ppm	facteur correctif	équivalent NaCl en ppm
Na ⁺	10	1	10
Ca ⁺⁺	3	1,3	3,9
Mg ⁺⁺	0,8	1,95	1,56
Cl ⁻	6	1	6
HCO ₃ ⁻	29,3	0,35	10,25
Salinité	49,1	Salinité en équivalent NaCl	31,71

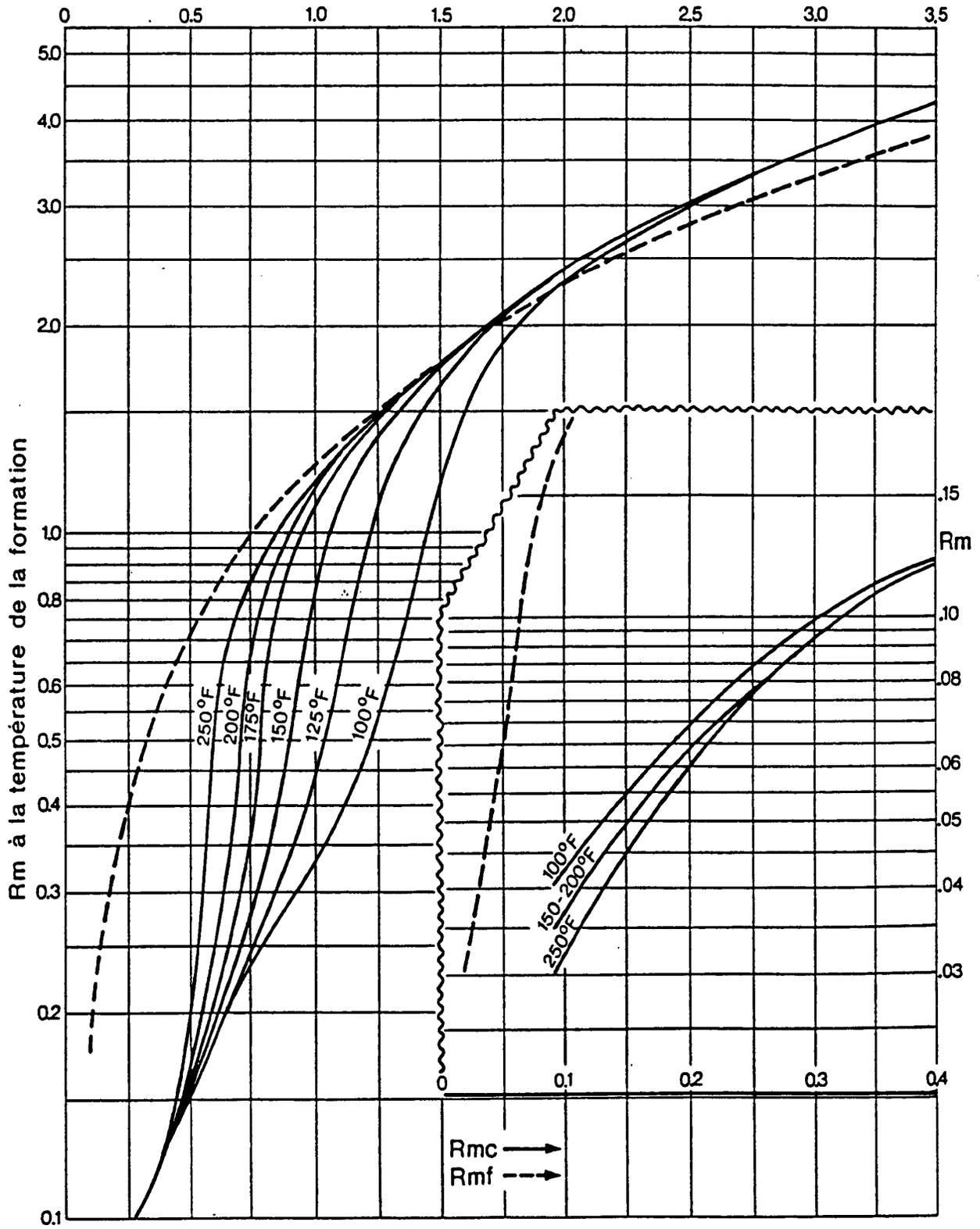
Abaque 2 : Résistivité des filtrats et des eaux de formations.



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} .

2.4. Travaux pratiques : Résistivité

1 - La température de surface est de 80 °F,

BHT = 180 °F,

TD = 10'000 ft,

Profondeur de la formation = 6'000 ft.

Quelle est la température de la formation ?

2 - La résistivité de la boue est de 1.2 à 75 °F.

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

3 - On vous donne sur le puits une résistivité de boue de 2.7 Ohm.m à 55 °F en surface.

BHT = 360 °F,

TD = 18'000 ft.

Quelle est la résistivité à 2'000 ft ?

4 - Un échantillon d'eau de votre puits est analysé et donne 90'000 ppm de NaCl à 55 °F.

Quelle est la résistivité de cette eau si votre réservoir est à 175 °F ?

5 - La formation a une porosité de 12 % et vous êtes dans des grès.

$R_w = 0.1$ Ohm.m et $R_{mf} = 1.0$ Ohm.m.

Si la zone a une saturation S_w de 100 %, quelle est la valeur de R_{x_0} et de R_t ?

6 - $R_{mf} = 2$ Ohm.m à 70°F et la salinité de l'eau d'imbibition est de 30'000 ppm NaCl.

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

La température de la formation est de 180 °F.

Si l'on admet que la saturation $S_w = 1$, quelle est la valeur de R_t ?

Quelle est la résistivité de la zone lavée R_{x_0} ?

Si maintenant on admet que la saturation n'est plus égale à 1 et que la résistivité de la zone lavée R_{x_0} est de 100 Ohms.m, quelle est la valeur de S_{x_0} ?

3. LE LOG PS

3.1. Introduction

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

Le log P.S. permet :

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

3.2. Le paramètre enregistré

3.2.1. 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 (Fig. 3.1).

3.2.2. Le potentiel de membrane

Considérons une formation poreuse et perméable, contenant un électrolyte R_w , cette formation est limitée en haut comme en bas par des argiles jouant le rôle de membrane.

Lorsque cet ensemble est traversé par le forage, l'électrolyte naturel est mis en présence du filtrat de résistivité R_{mf} .

Généralement l'eau de la formation est plus saline que la boue de forage, de ce fait $R_{mf} > R_w$.

Les argiles en présence de deux fluides de salinités différentes se comportent comme une membrane cationique, c'est à dire qu'elles laissent passer librement les cations Na^+ , mais sont imperméables aux anions Cl^- .

L'ensemble constitue une pile de concentration dont le pôle positif correspond à la formation la moins saline, le filtrat dans cet exemple. Une telle pile donne naissance à une force électromotrice E_m .

On appelle le potentiel ainsi créé **potentiel de membrane, shale potentiel**.

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

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

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

3.2.3. Le potentiel de jonction liquide

Une autre force électromotrice naturelle apparaît dans les forages. Elle est associée au potentiel de jonction liquide qui prend naissance là où le filtrat et l'eau de formation sont en contact direct, c'est à dire à la limite de la zone envahie.

En effet, lorsque deux solutions de salinités différentes sont en présence, on peut montrer qu'une **force électromotrice de jonction liquide** va apparaître entre ces deux solutions si la mobilité des anions et des cations n'est pas identique.

Dans le cas d'une solution de NaCl, la mobilité des anions est supérieure à celle des cations. Il en résulte un flux de charges négatives vers la solution la moins concentrée (la boue en général) et la création d'une force électromotrice qui vient s'ajouter à celle associée aux membranes argileuses.

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

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

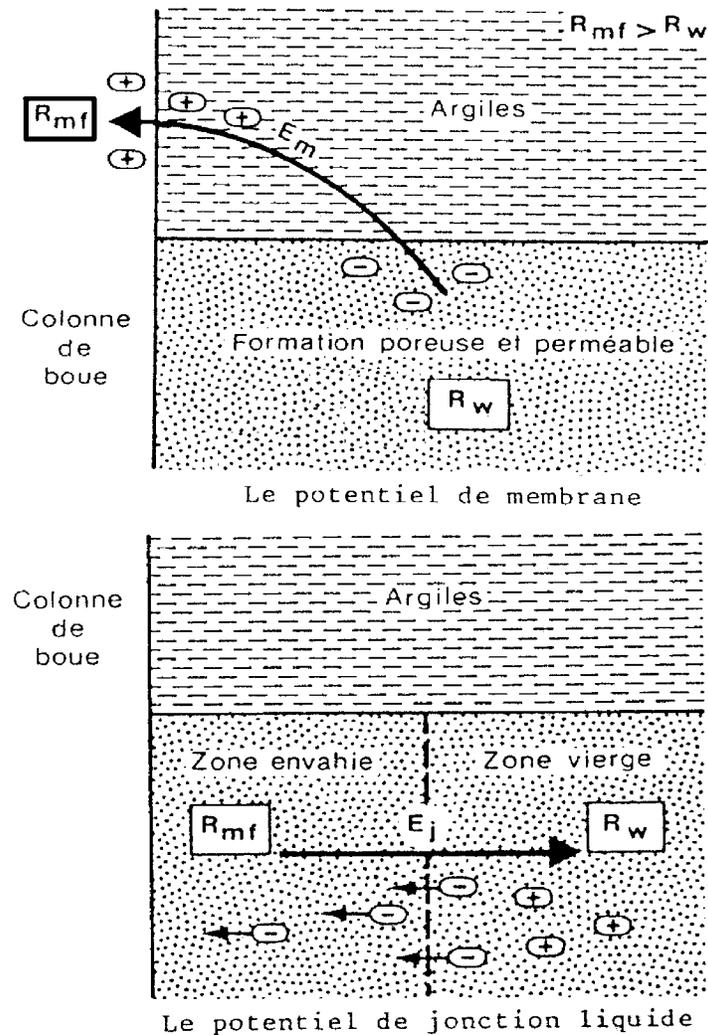


Figure 3.1 : Origine de la polarisation spontanée.

3.2.4. Cas général

Finalement, on arrive au schéma suivant avec un **potentiel positif** en face des formations argileuses et un potentiel **négalif** en face de la formation poreuse et perméable (Fig. 3.2), le circuit se fermant par la boue (on suppose que la boue est moins saline que l'eau de formation et que par conséquent $R_{mf} > R_w$).

La courbe en traits tirés correspond à l'enregistrement réel alors que la courbe en traits pleins représente le voltage théorique appelé P.S. statique (P.S.S.).

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

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

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

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

K = constante qui tient compte de la température.

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

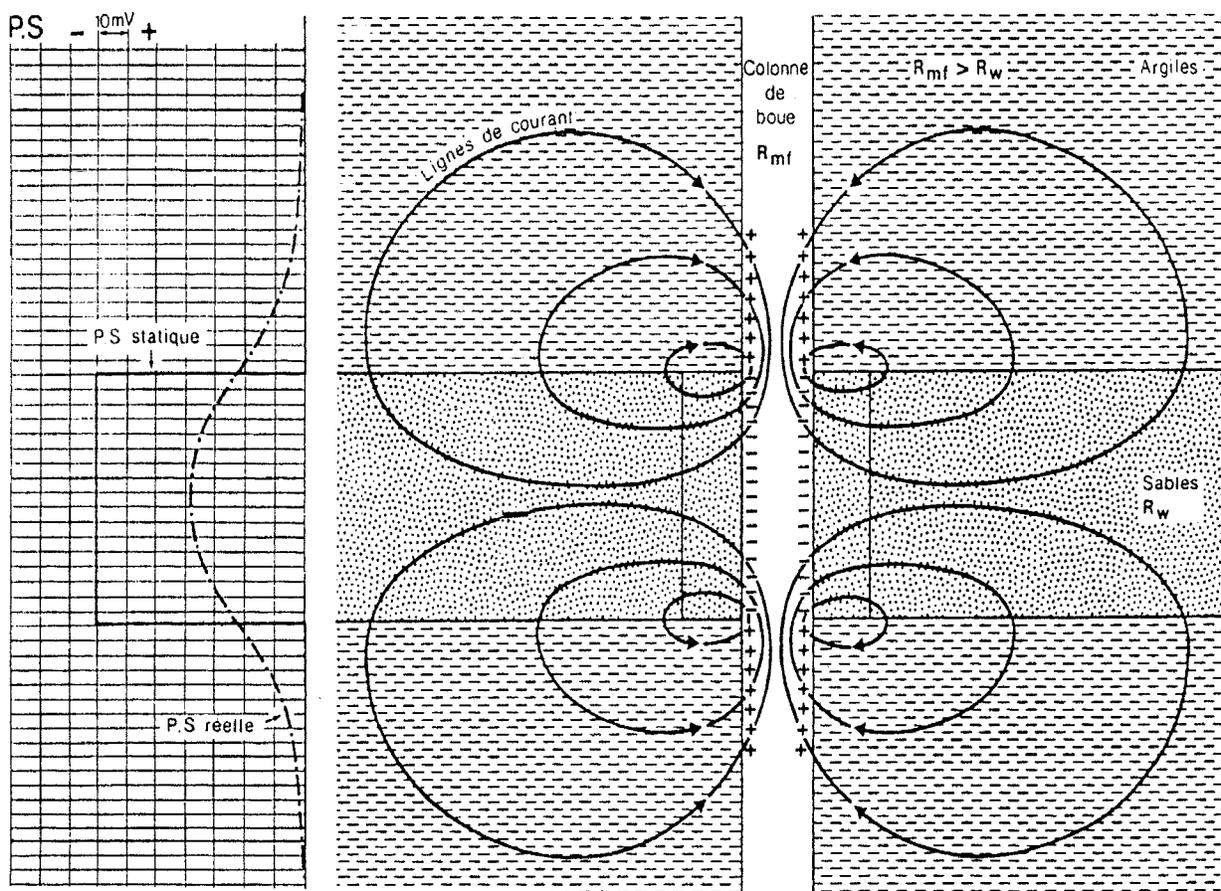


Figure 3.2 : Distribution schématique des courants de P.S.

3.3. La mesure

3.3.1. La mise en œuvre

On mesure à l'aide d'un voltmètre la différence de potentiel entre deux électrodes, l'une mobile dans le trou et l'autre fixe en surface (Fig. 3.3).

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

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

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

3.3.2. Facteurs parasites

Divers facteurs parasites peuvent affecter les mesures, ce sont :

- la nature des électrodes,
- les courants parasites (Fig. 3.4 et 3.5),
- la dérive de la référence (Fig. 3.6).

3.4. Interprétation qualitative

La figure suivante représente un log P.S. enregistré dans une série de sables et d'argiles.

On peut observer, c'est le cas le plus général, qu'en face des couches d'argiles les potentiels restent plus ou moins constants. L'enregistrement s'approche d'une droite. Celle-ci est appelée **shale base line ou ligne de base des argiles** (Fig. 3.7).

En face des bancs poreux perméables, la courbe montre une forte déflexion vers la gauche.

Lorsque ces bancs sont assez épais, il est possible de tracer **la ligne de base des sables, sand line**.

La limite des bancs est à l'inflexion de la courbe.

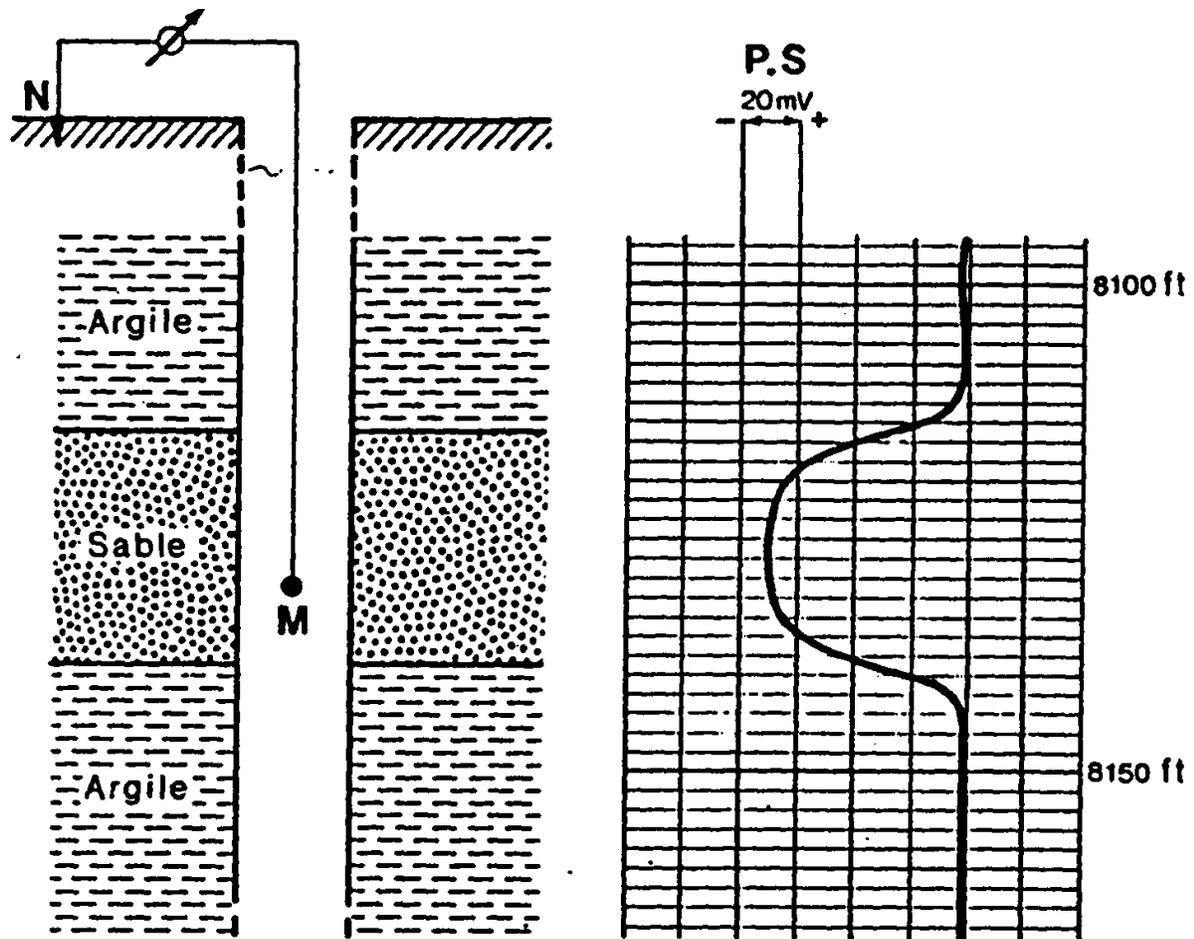


Figure 3.3 : Schéma de principe de mesure de la P.S.

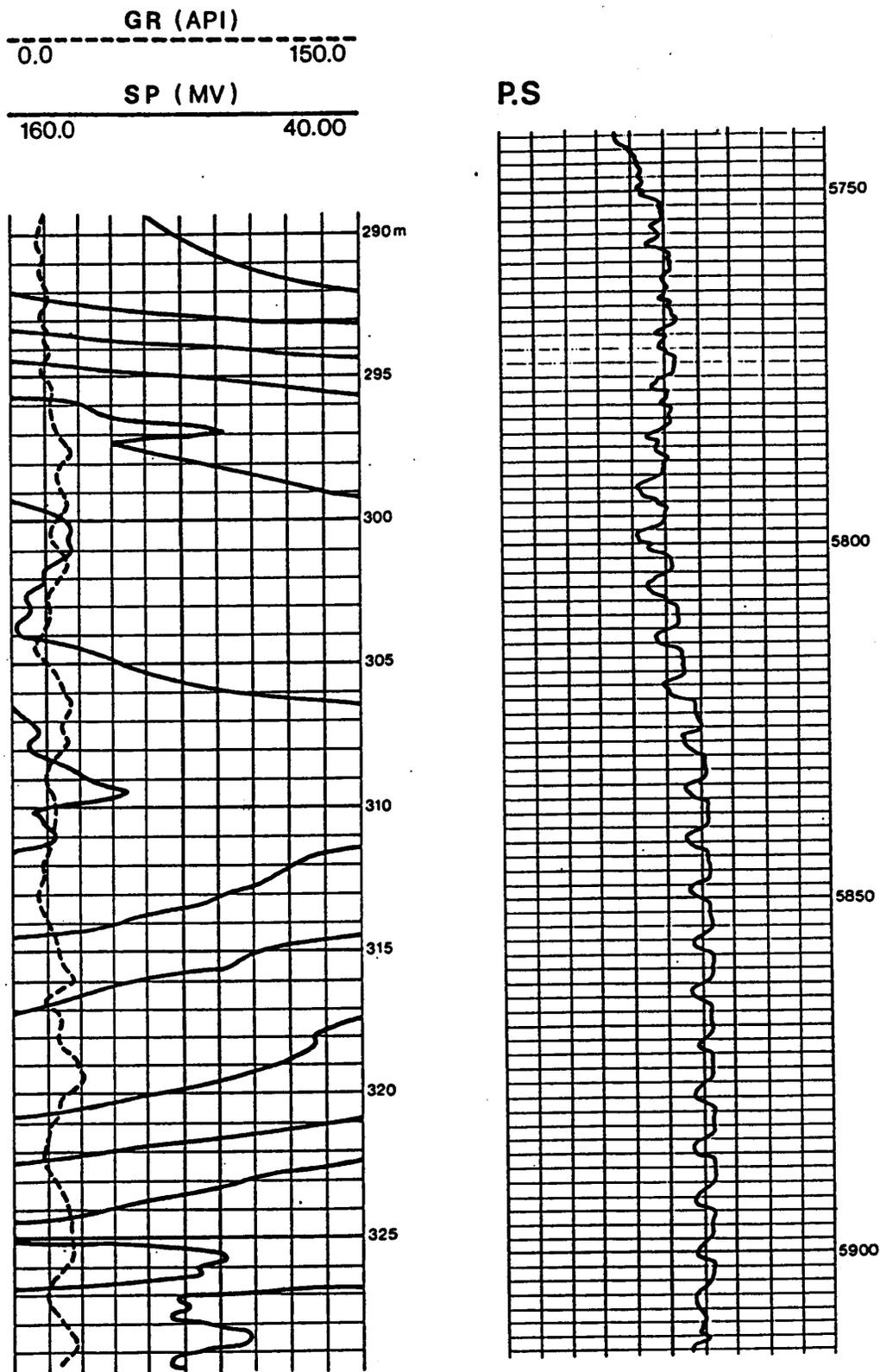


Figure 3.4 et 3.5 : Effet des courants parasites et effet du magnétisme sur le câble.

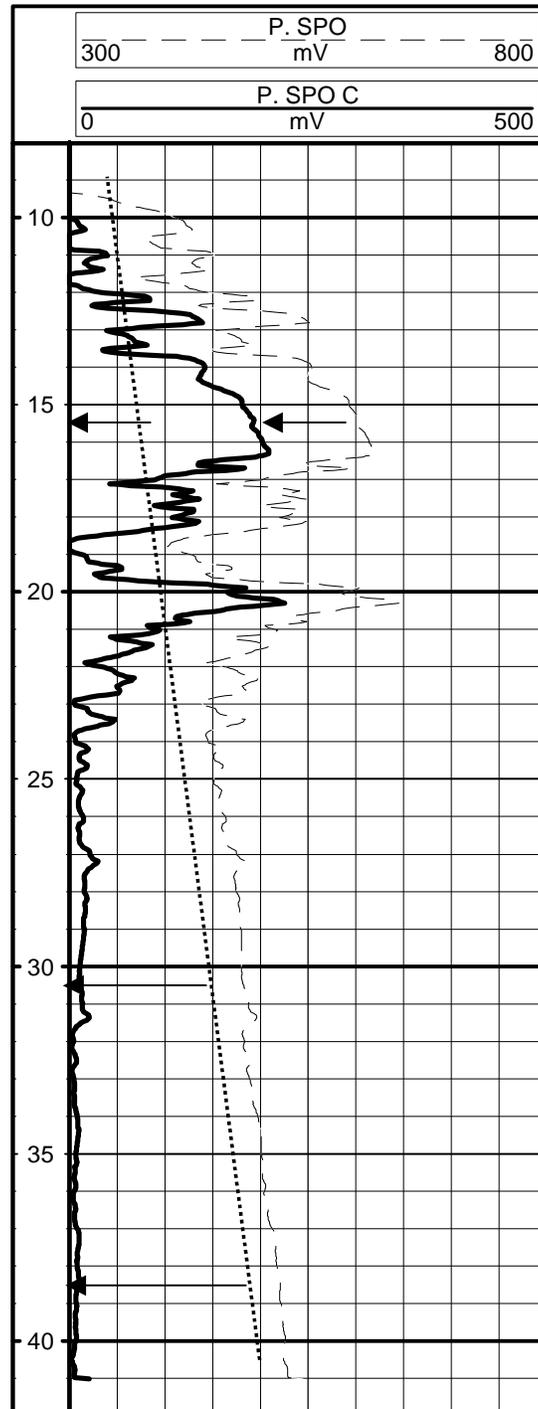


Figure 3.6 : Exemple de la dérive de la référence (Halle Fosse, EPFL, Août 1998).

P. SPO : Polarisation Spontanée.

P. SPO C : Polarisation Spontanée corrigée de la dérive.

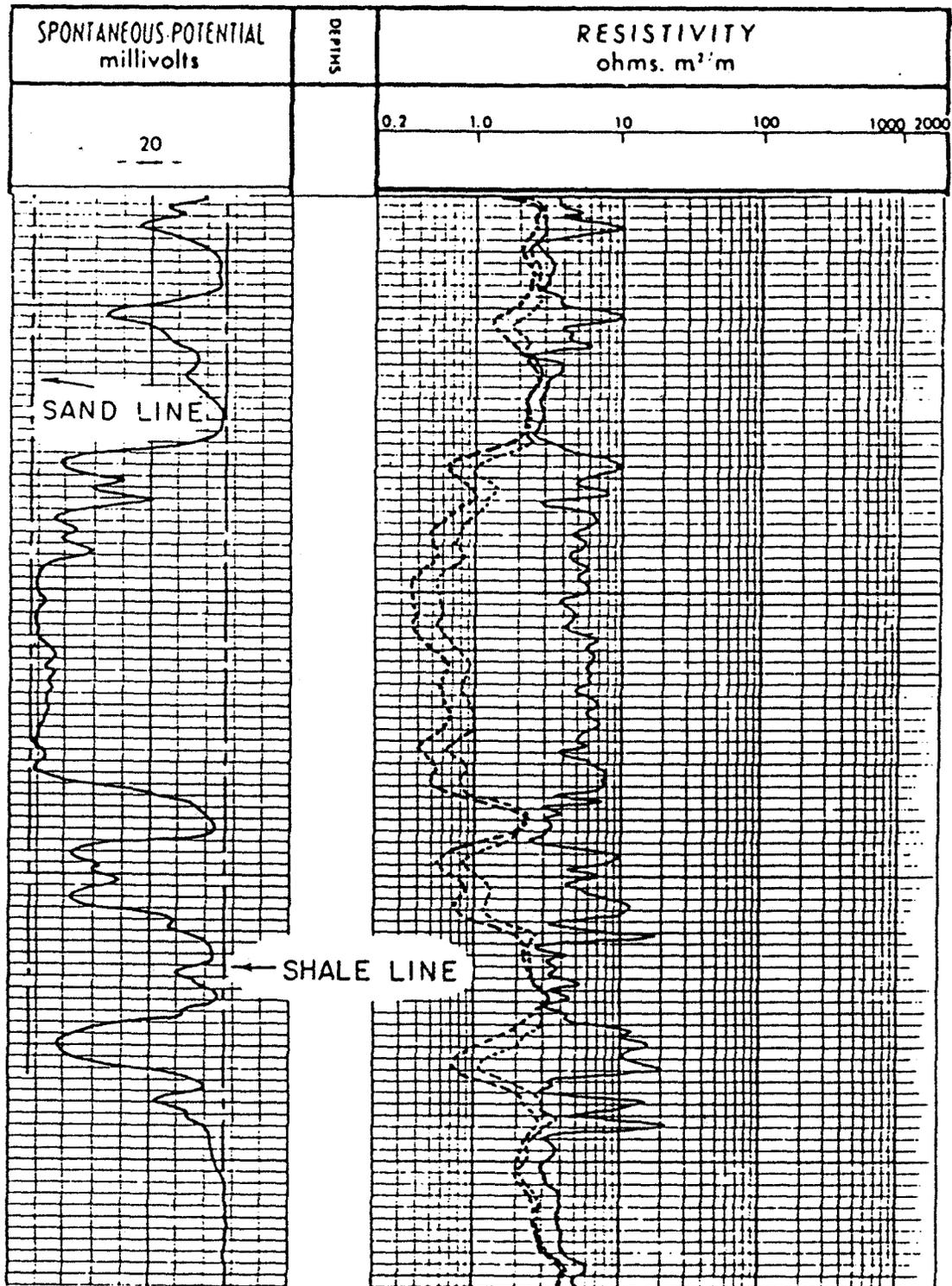


Figure 3.7 : Exemple de P.S. dans une série de sables argileux.

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

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

Influence de la salinité des fluides en présence (Fig. 3.8)

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

La P.S. est dite **normale** c'est le cas que nous avons envisagé jusqu'à présent.

Le positif est alors en face des argiles et le négatif en face des formations propres. La déflexion est d'autant plus marquée que le contraste des salinités est important.

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

Dans ce cas on obtient une P.S. dite **inverse**, le positif est en face des sables et le négatif en face des argiles. Ce phénomène se produit assez souvent en prospection hydrologique.

- Eau de formation de même salinité que le filtrat $R_{mf} = R_w$.

La P.S. est alors **plate**, l'enregistrement ne montre pas de différence entre les argiles et les bancs poreux et perméables.

Influence de l'épaisseur des bancs (Fig. 3.9)

Les limites correspondent aux points d'inflexion de la courbe P.S.

Si le banc est épais la déflexion est maximum et montre une forme aplatie.

Si le banc est mince la courbe dessine un pic, le potentiel statique n'est pas atteint. Dans ce cas pour connaître la valeur maximale de la P.S. il faut utiliser des abaques qui permettent de corriger en fonction de l'épaisseur du banc. Epaisseur que l'on détermine sur des autres diagraphies.

Une augmentation du diamètre du forage diminue la déflexion P.S.

De même, lorsque la zone lavée s'agrandit la déflexion P.S. décroît.

Influence de la résistivité (Fig. 3.9)

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

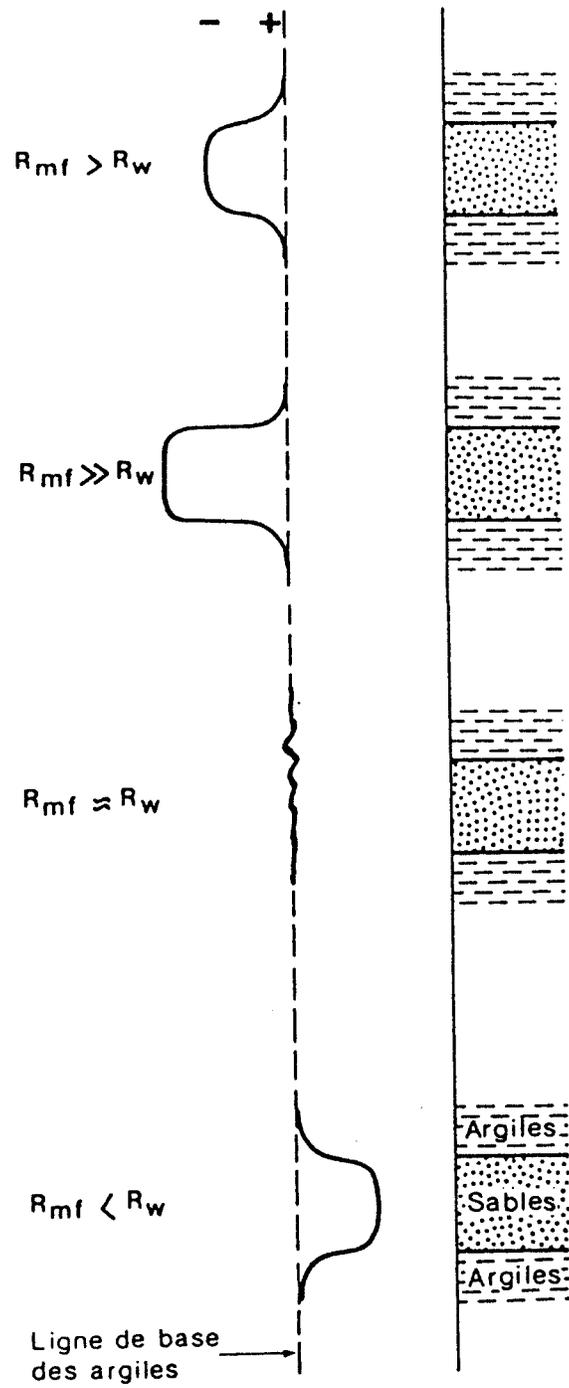


Figure 3.8 : Influence de la salinité.

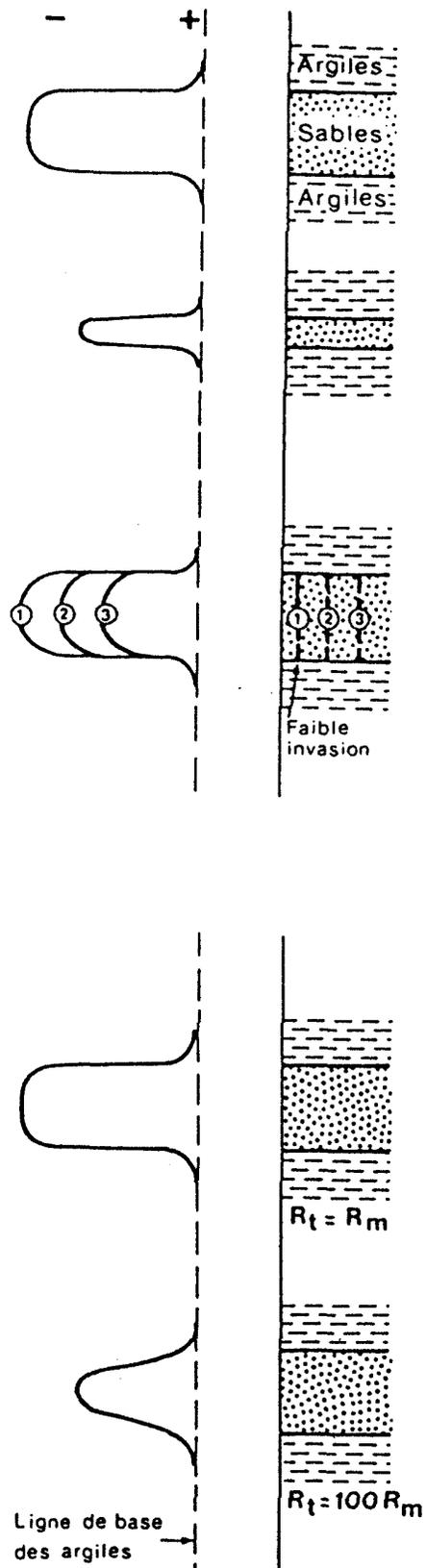
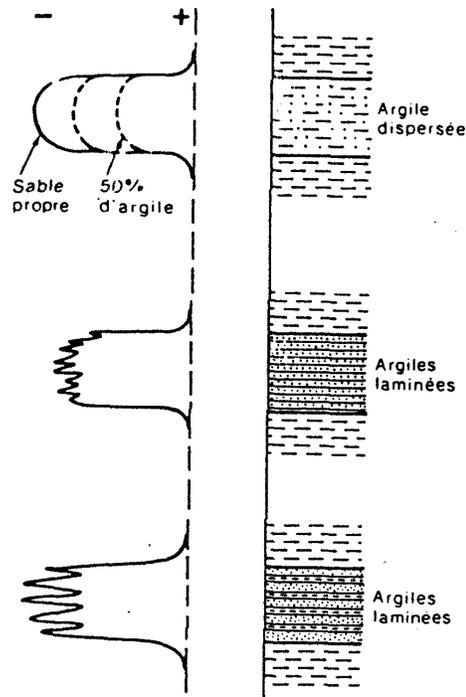


Figure 3.9 : Influence de l'épaisseur de banc et de la résistivité.



. Influence de la présence d'argile

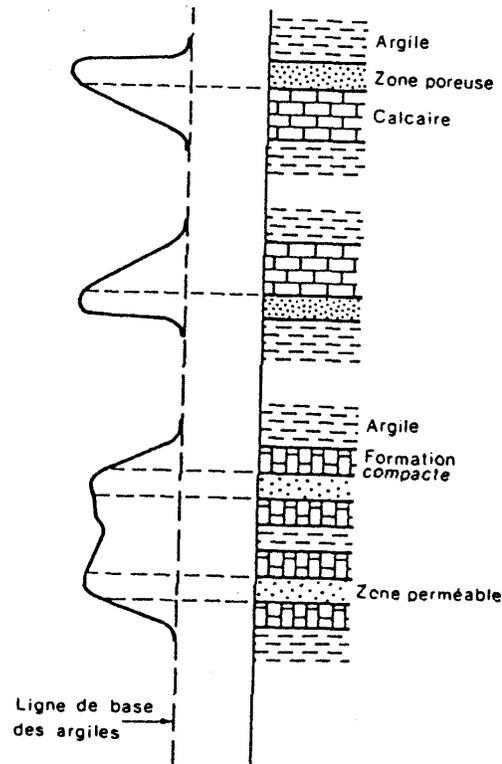


Figure 3.10 : Influence de la présence d'argile et effet des formations compactes.

Influence de la présence d'argile (Fig. 3.10)

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

Cette propriété permet d'ailleurs de calculer le pourcentage d'argile présent dans un réservoir.

Effet des formations compactes (Fig. 3.10)

Les niveaux argileux intercalés entre des bancs compacts se marquent par un changement de pente de la courbe P.S.

La courbe P.S. demeure généralement rectiligne en face des formations compactes.

Dérive de la ligne de base (Fig. 3.6)

La dérive de la ligne de base est souvent provoquée par des modifications de l'électrode de référence. Un manque d'homogénéité de la boue peut provoquer des effets similaires. Parfois le changement de la ligne de base peut être imputé à des variations géologiques, soit une variation de la salinité de l'électrolyte saturant les roches, soit un changement des propriétés des argiles (Fig. 3.12).

Effet de la perméabilité

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

3.5. Interprétation quantitative

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

L'interprétation quantitative classique de la P.S. est basée sur les suppositions 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 $R_{mf} > R_w$.

3.5.1. Détermination de R_w à partir de la P.S.

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

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

III Déterminer la température de la formation à la profondeur choisie.

IV Ramener R_{mf} à la température de la formation. Si cette nouvelle valeur de R_{mfe} est inférieure à 0.1 Ohm.m on doit transformer en R_{mf} à l'aide de l'**abaque 5**.

V Lire la valeur de la déflexion P.S. (nombre de millivolts depuis la ligne de base). Il y a lieu dans certains cas d'apporter une correction pour l'épaisseur du banc. Cette correction se fait de la façon suivante :

- Déterminer l'épaisseur du banc à partir des points d'inflexion. Vérifier sur d'autres logs.
- Sur un log électrique lire la valeur de la résistivité pour la profondeur considérée.
- Ramener R_m à la température de la formation.

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

VI L'**abaque 7** permet maintenant retrouver R_{we} .

- Si cette valeur est supérieure à 0.1 Ohm.m on la garde comme valeur de R_w .
- Si R_{we} est inférieure à 0.1 Ohm.m il faut utiliser l'**abaque 4** pour obtenir R_w .

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

3.5.2. Calcul du pourcentage d'argile

Nous avons vu que l'on peut dans certaines conditions tracer sur le log P.S. la ligne de base des argiles qui correspond à un volume de 100 % d'argile. Il est aussi possible de tracer la ligne de base des sables qui représente alors 0 % d'argile. Cette particularité permet d'estimer le volume d'argile en un point donné (Fig. 3.11).

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

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

V_{sh} = volume d'argile en %

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

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

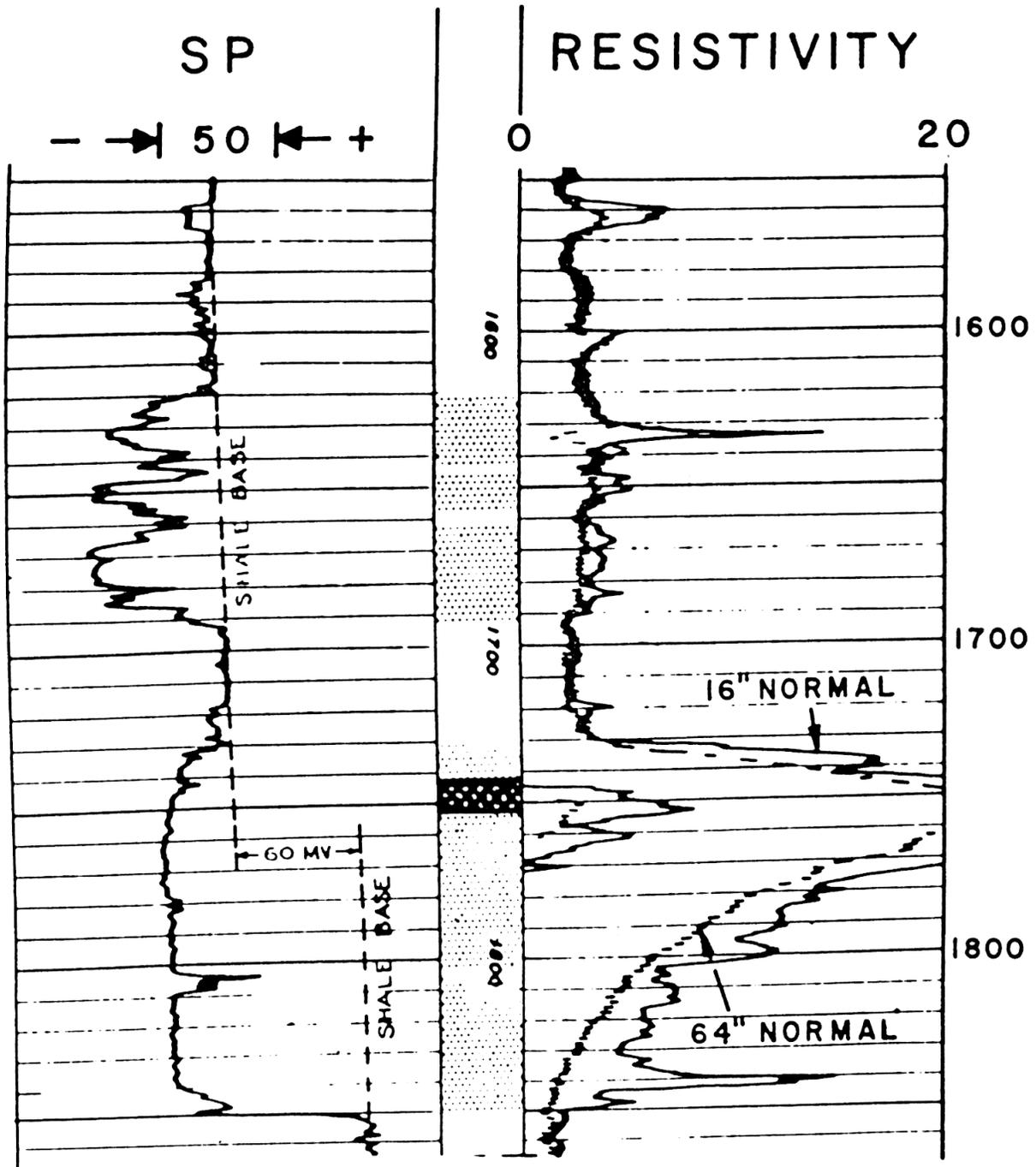


Figure 3.12 : Changement de la ligne de base des argiles (D'après Guyod).

3.6. Travaux pratiques

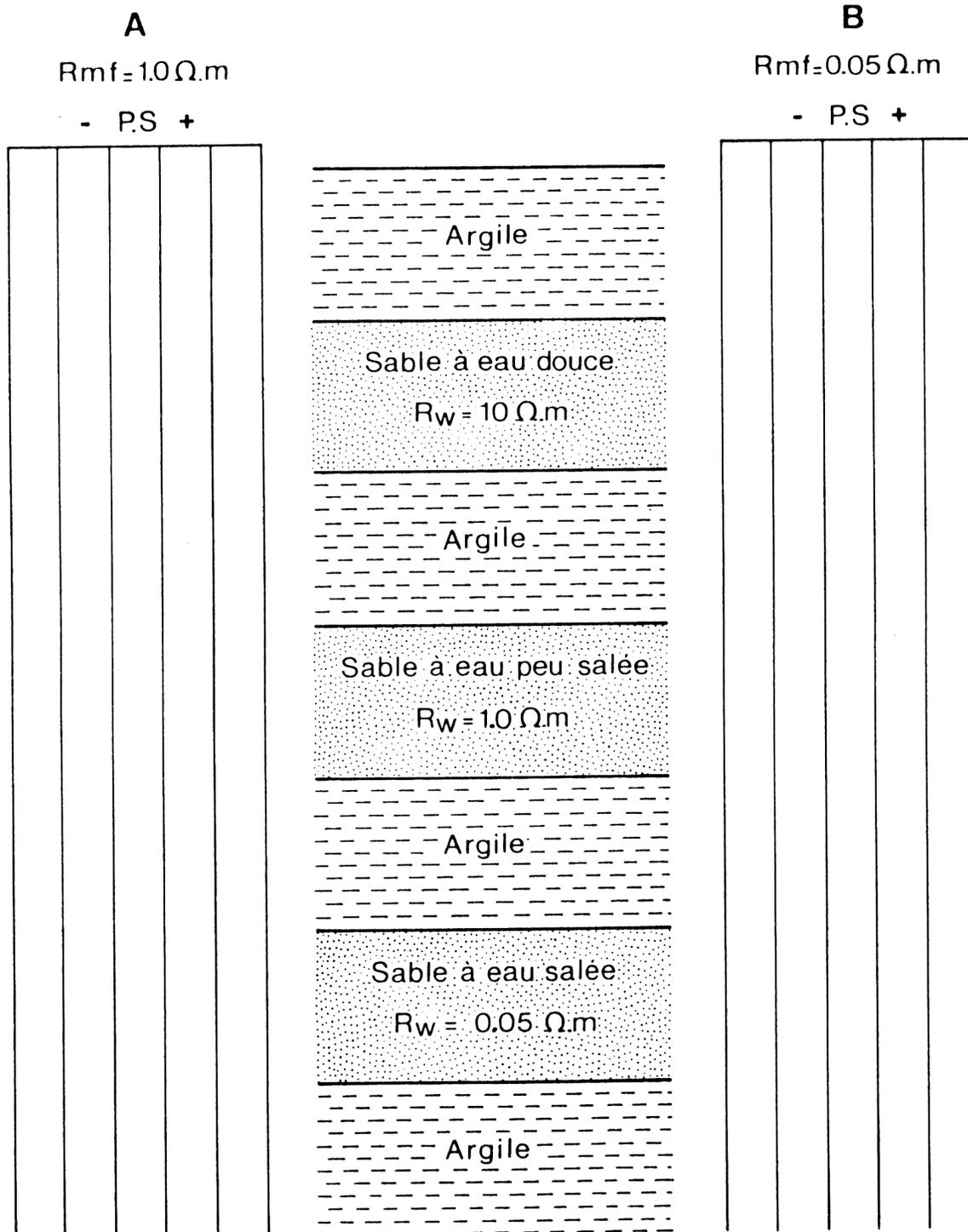


Figure 3.13 : Dessiner le log P.S. dans les deux cas.

Déterminer R_w à partir des données suivantes :

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 :

Epaisseur du banc :

Valeur de R_i lue sur la courbe normale :

Facteur de correction (abaque 6) :

Valeur de la déflexion P.S. corrigée :

R_{we} :

R_w :

salinité équivalente en NaCl :

P.S. = -55 mV, R_i = 100 Ohm.m, Epaisseur du banc = 12 ft, Profondeur de la formation = 350 ft, Profondeur totale = 400 ft, Température BHT = 140 °F, Température de surface = 100 °F, R_{mf} = 10 Ohm.m @ 90 °F, R_m = 1.0 Ohm.m @ 90 °F.

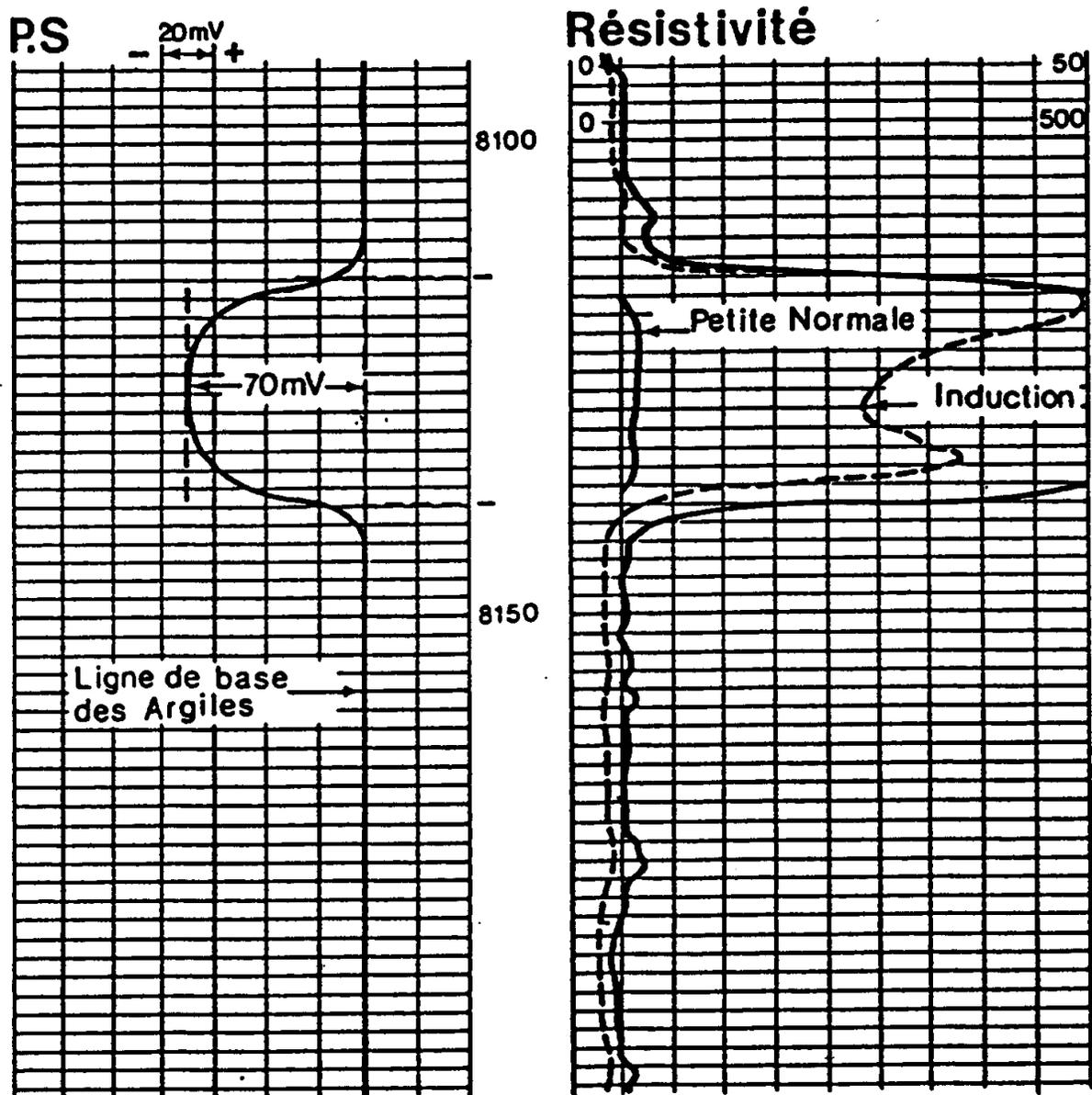


Figure 3.14 : Exemple de log P.S. $R_{mf} = 2 \text{ Ohm.m @ } 70^\circ\text{F}$, $R_m = 2.5 \text{ Ohm.m @ } 70^\circ\text{F}$,
Température de surface = 60°F , BHT = 164°F , Profondeur du forage = 10'500 ft.

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
 Rm = 0.35 Ohm.m at 70° F
 Rmf = 0.28 Ohm.m at 70° F

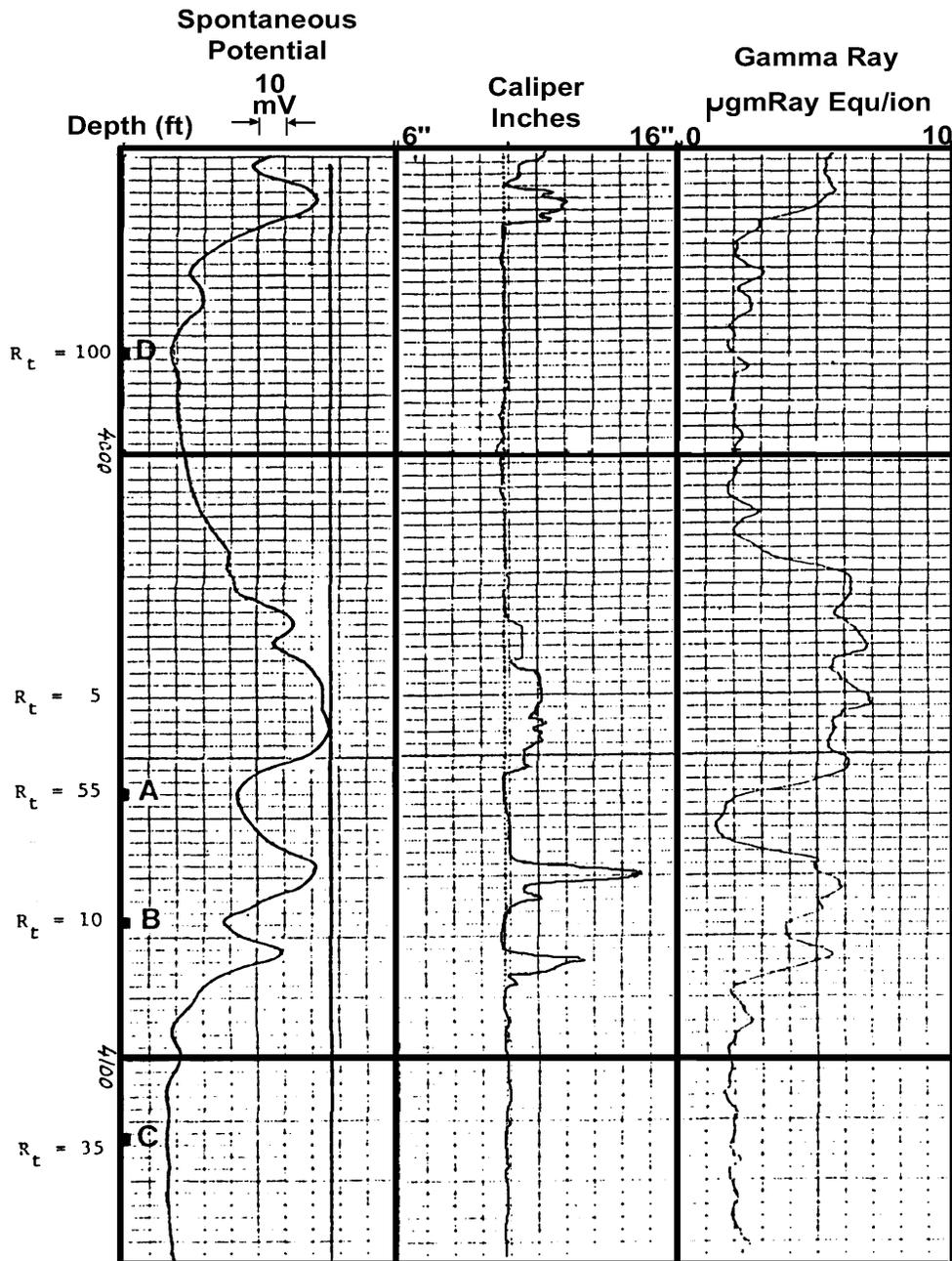


Figure 3.15 : Travaux pratiques de diagraphies aquifères.

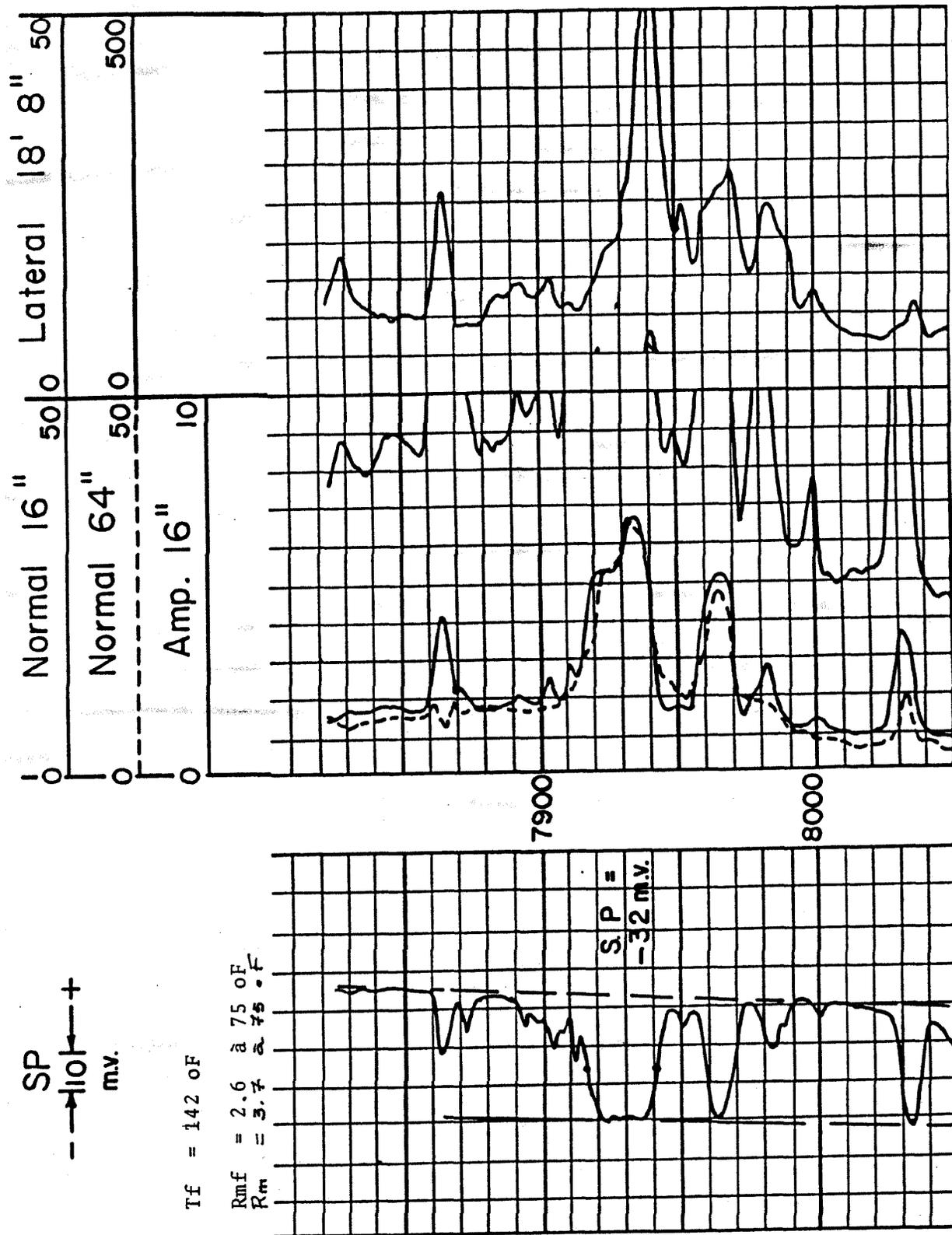
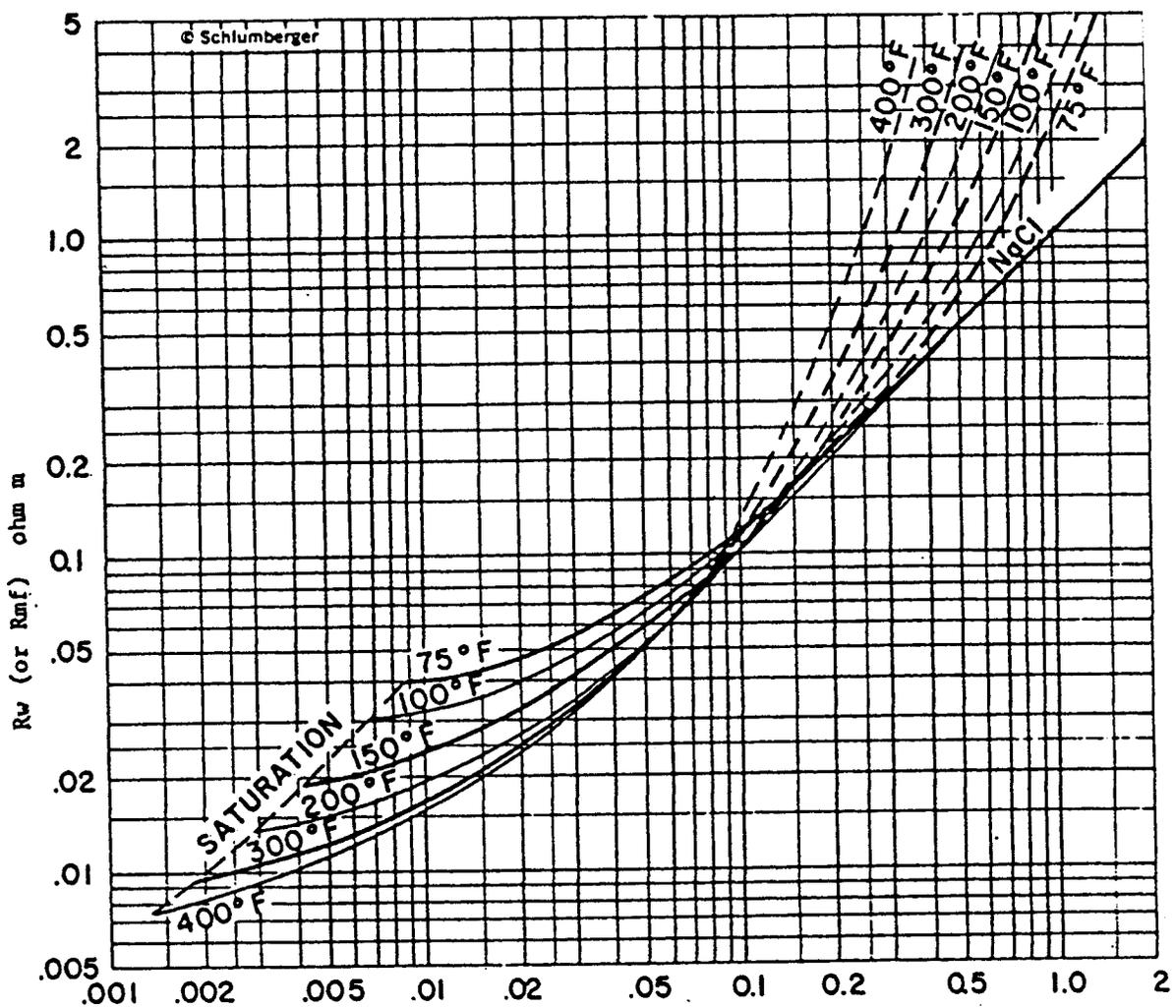
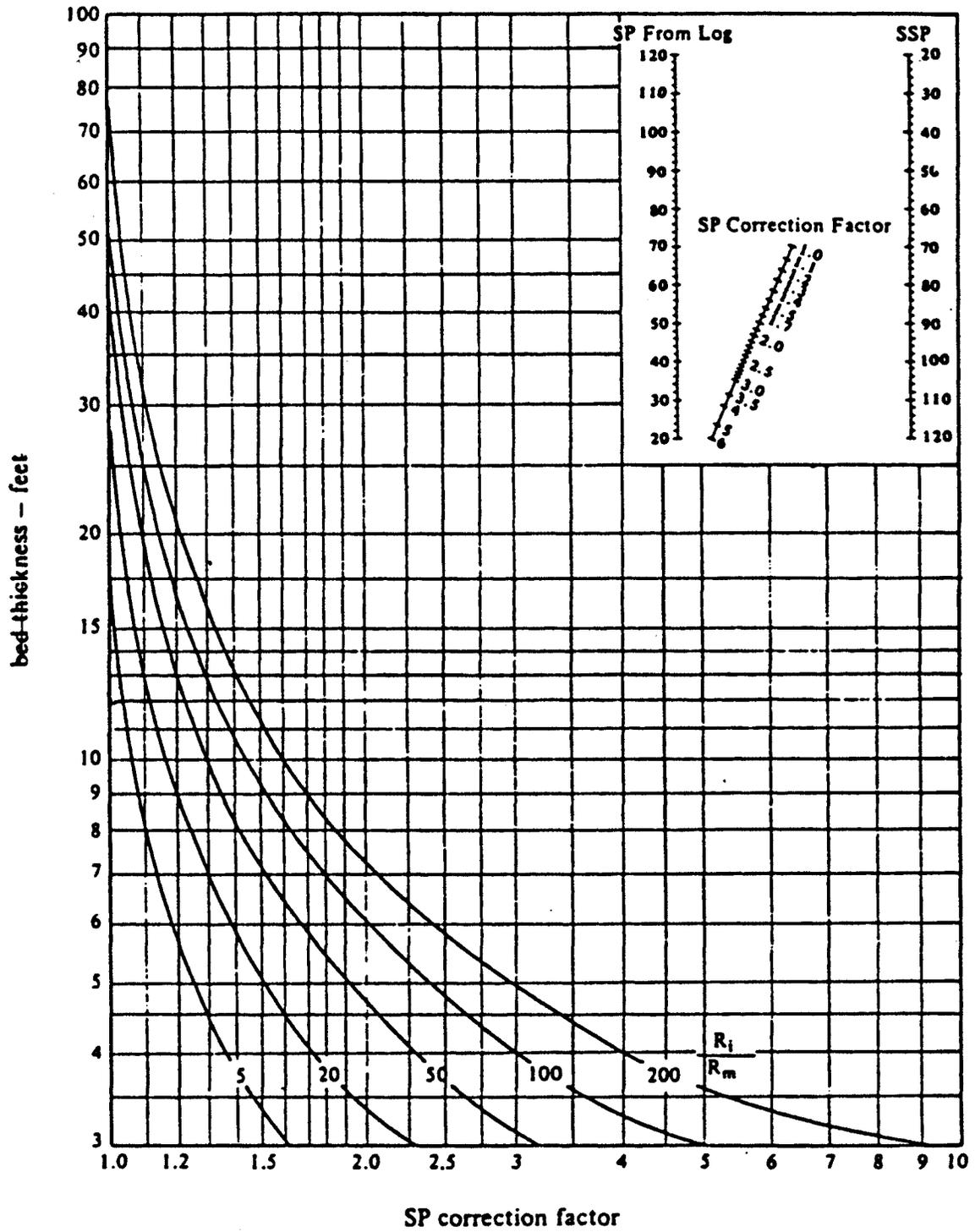


Figure 3.16 : Travaux pratiques de diagraphies aquifères.

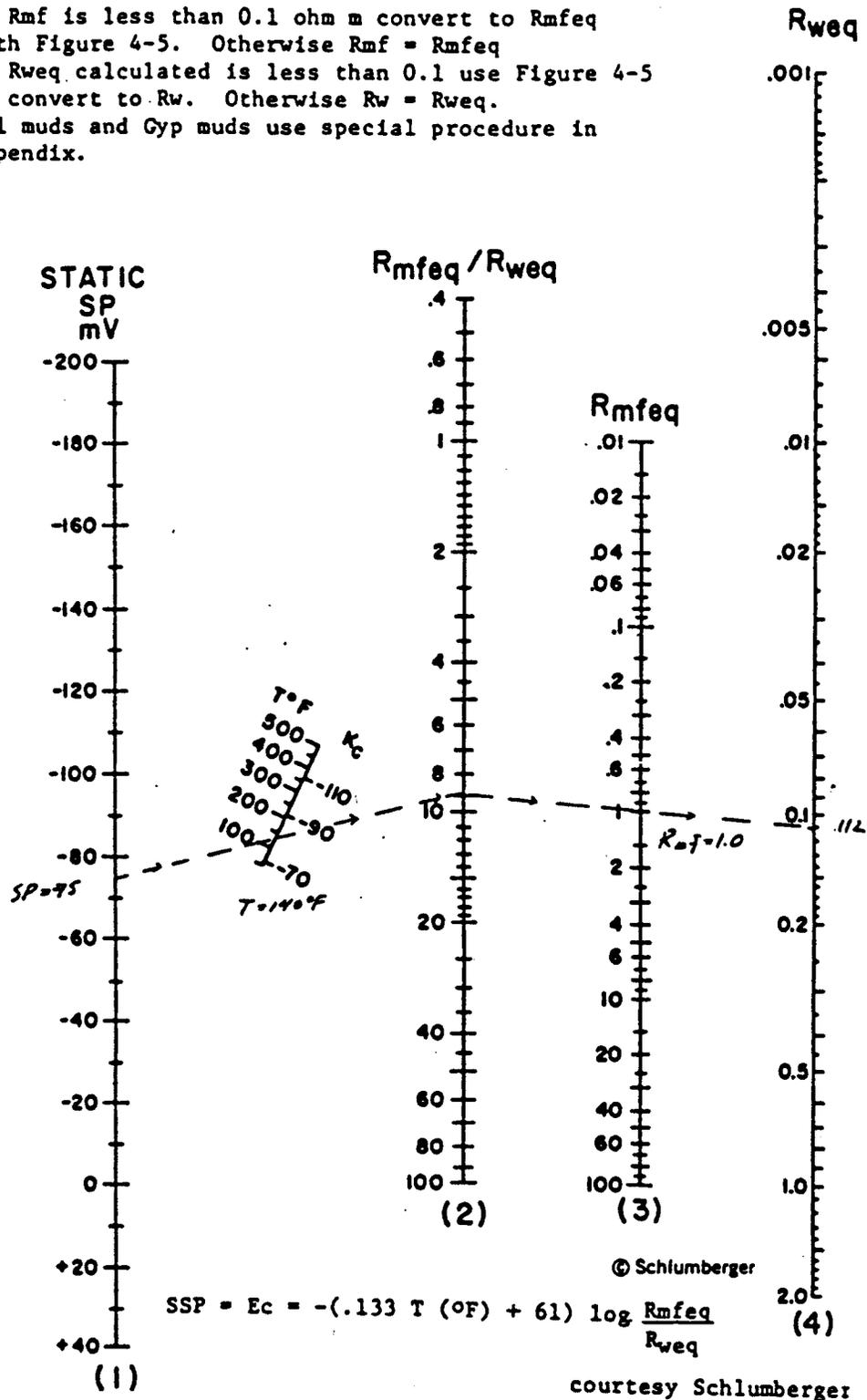


Abaque 5 : Transformation R_{weq} en R_w et R_{mfe} en R_{mf} .



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

- a) If R_{mf} is less than 0.1 ohm m convert to R_{mfq} with Figure 4-5. Otherwise $R_{mf} = R_{mfq}$
- 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.

4. LES LOGS ELECTRIQUES

4.1. Introduction

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

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

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 désignée 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.

4.2. Le log single point ou monoélectrode

4.2.1. Principe

Mesure de la **résistance** en ohms entre une électrode descendue dans le forage et une électrode de référence en surface (Fig. 4.1).

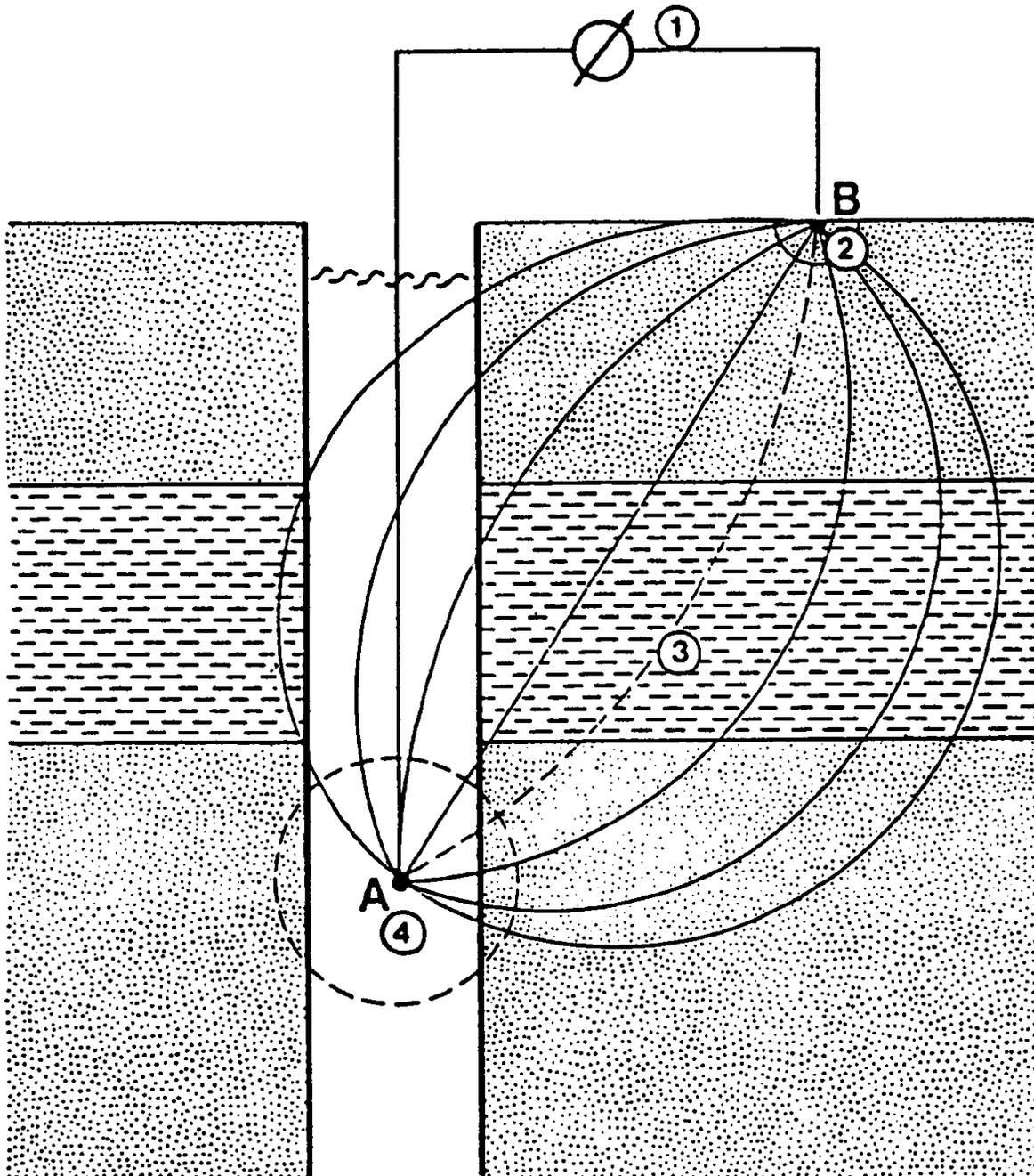


Figure 4.1 : Schéma de principe du single point.

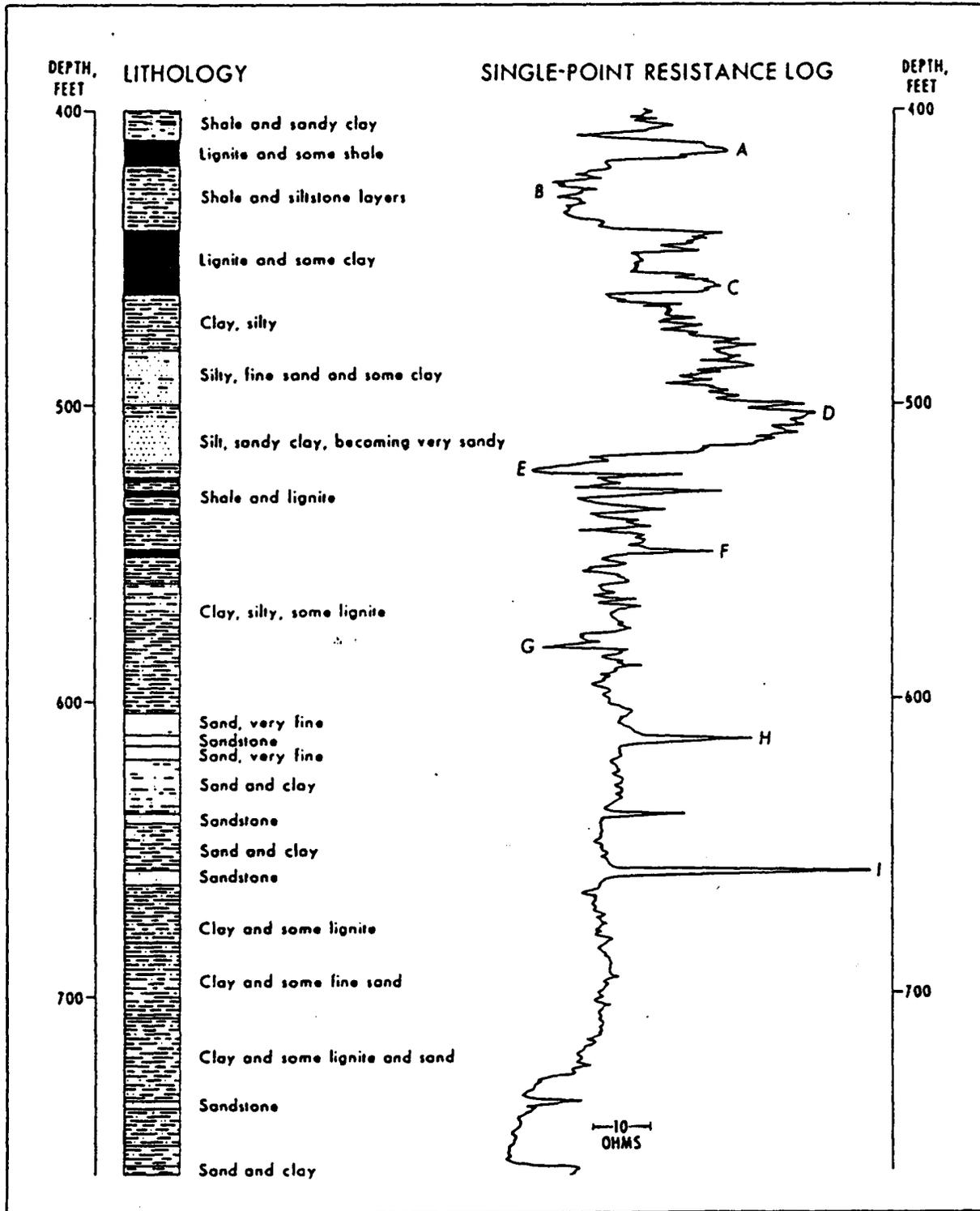


Figure 4.2 : Exemple d'enregistrement du single point.

4.2.2. Réponse du single point.

L'interprétation **n'est que qualitative**. Cependant, l'outil possède un très bonne **définition verticale** (Fig. 4.2 et 4.3).

La courbe est symétrique par rapport au milieu du banc et les limites des couches aux points d'inflexions. 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.

En résumé c'est un très bon outil qualitatif avec une très bonne définition verticale.

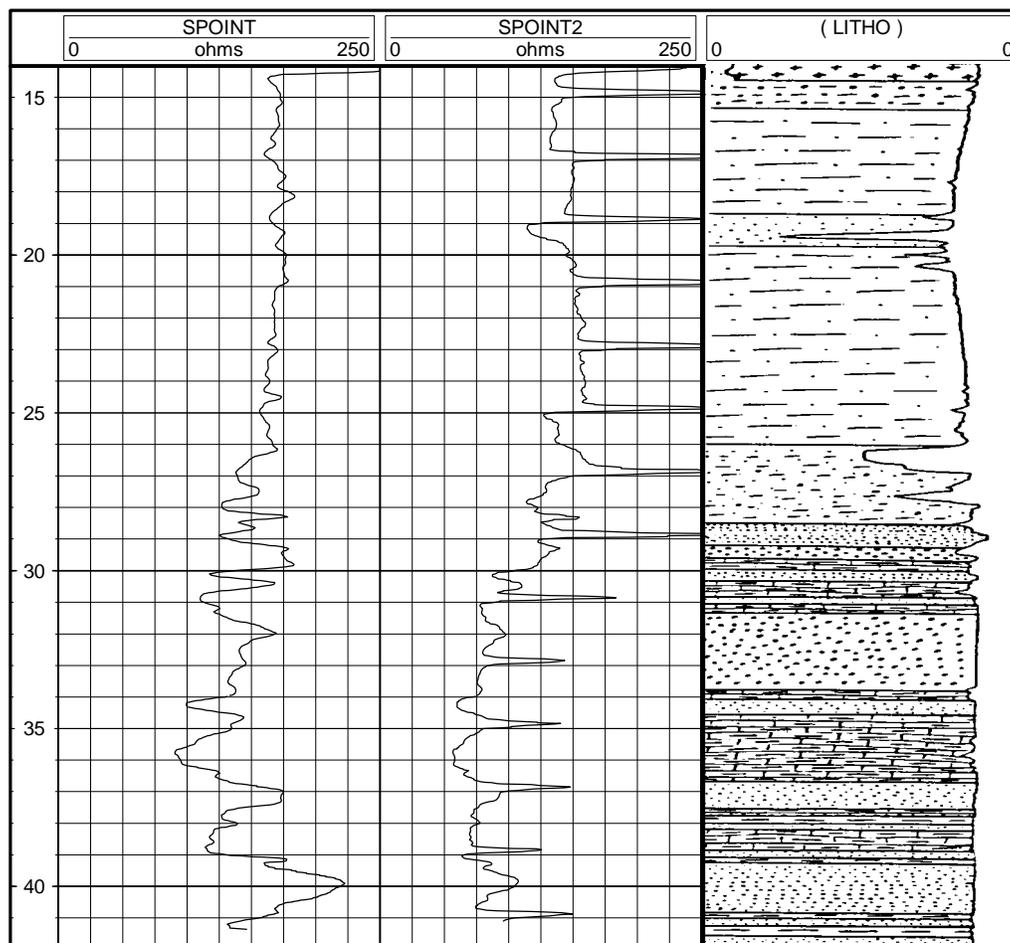


Figure 4.3 : Enregistrement de single point.

SPOINT : Single Point en trou nu (Halle Fosse, EPFL, Août 1998).

SPOINT2 : Single Point en trou tubé PVC crépinné (Halle Fosse. Août 1998).

4.3. Le dispositif normal ou Normal device

4.3.1. Principe

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. I étant maintenu constant, le potentiel mesuré varie avec R, on a :

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

Le point de mesure est O, milieu de AM. **Le rayon d'investigation** d'une telle sonde est égal à 2 AM. **La définition verticale** est égale à 2 AM.

Deux espacements sont utilisés dans la pratique :

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

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

4.3.2. Réponse de la sonde normale

La 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** (Fig. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9).

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

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_{x_0} ,
- la grande normale donne des valeurs comprises entre R_{x_0} et R_t et très tributaires de la profondeur d'invasion.

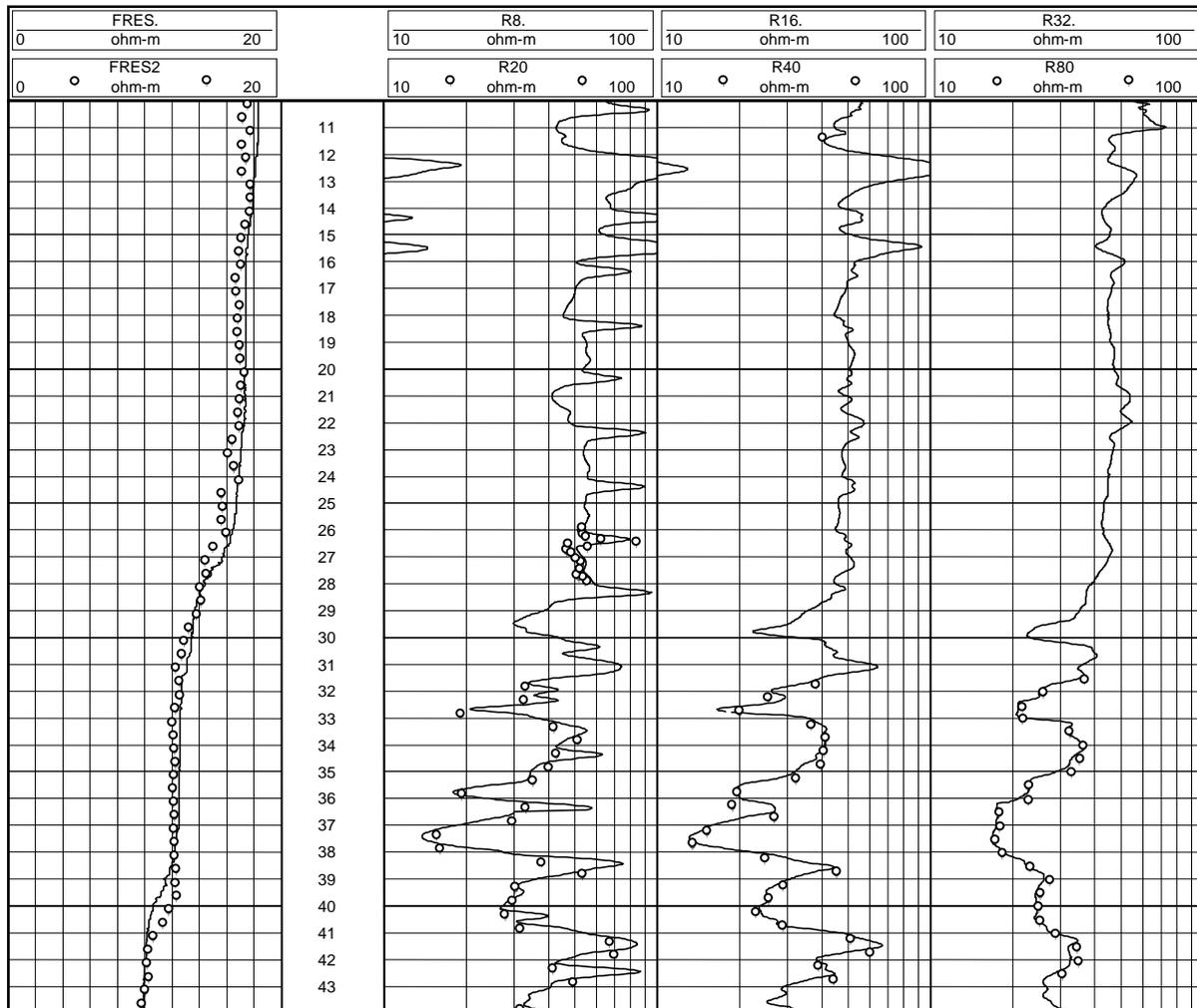


Figure 4.4 : Enregistrement de diagraphies expéditives.

FRES : Résistivité du fluide, sonde Mount Sopris (Halle Fosse, EPFL, Août 1998).

FRES2 : Résistivité du fluide, sonde expéditive (Halle Fosse, EPFL, Août 1998).

R8 : Normale AM=8'', sonde Mount Sopris (Halle Fosse, EPFL, Août 1998).

R20 : Normale AM=20 cm, sonde expéditive (Halle Fosse, EPFL, Août 1998).

R16 : Normale AM=16'', sonde Mount Sopris (Halle Fosse, EPFL, Août 1998).

R40 : Normale AM=40 cm, sonde expéditive (Halle Fosse, EPFL, Août 1998).

R32 : Normale AM=32'', sonde Mount Sopris (Halle Fosse, EPFL, Août 1998).

R80 : Normale AM=80 cm, sonde expéditive (Halle Fosse, EPFL, Août 1998).

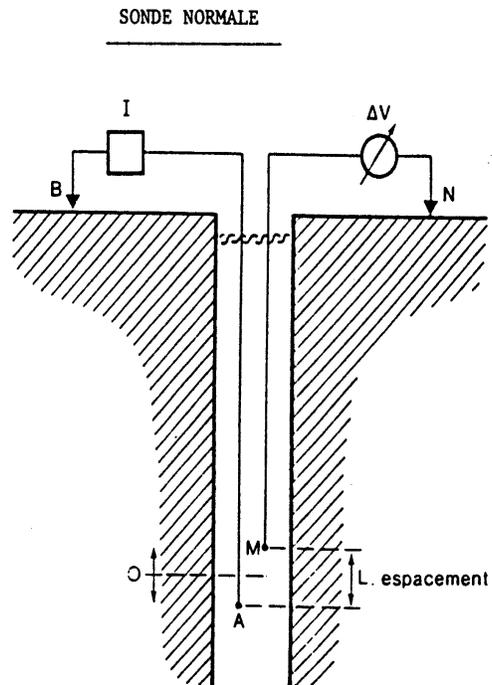


Figure 4.5 : Sonde normale.

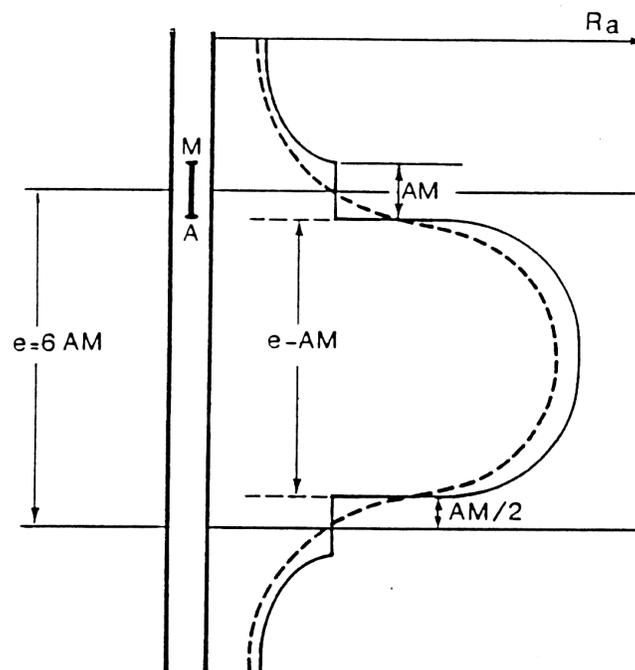


Figure 4.6 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc
AM Espacement

Banc résistant épais, sonde normale.

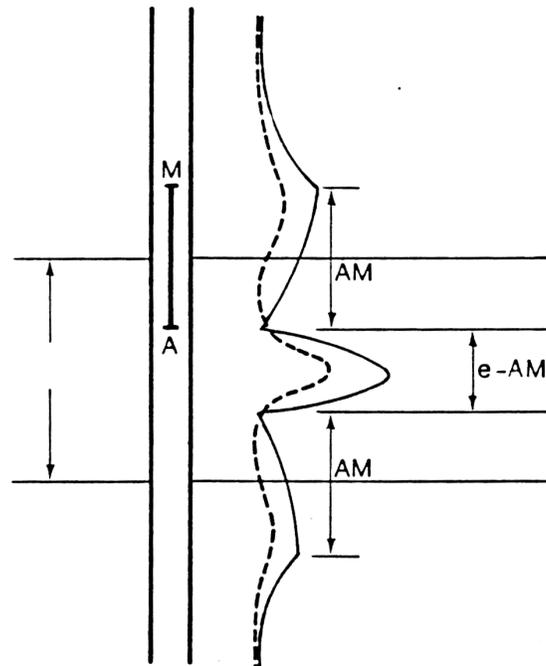


Figure 4.7 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc
AM Espacement

Banc résistant d'épaisseur moyenne, sonde normale.

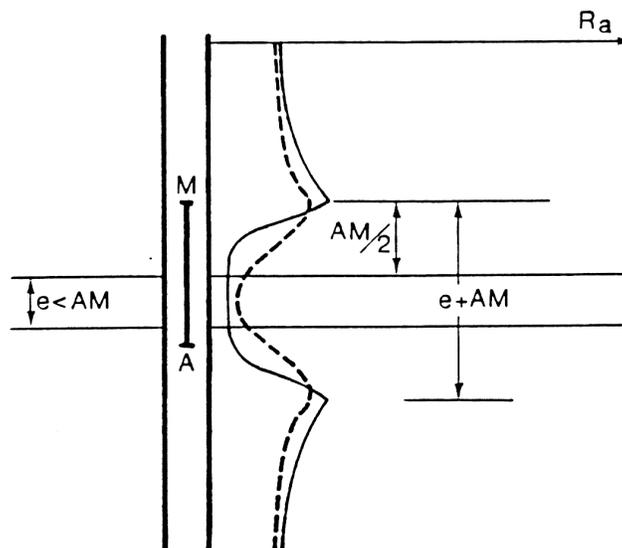


Figure 4.8 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc
AM Espacement

Banc résistant mince, sonde normale.

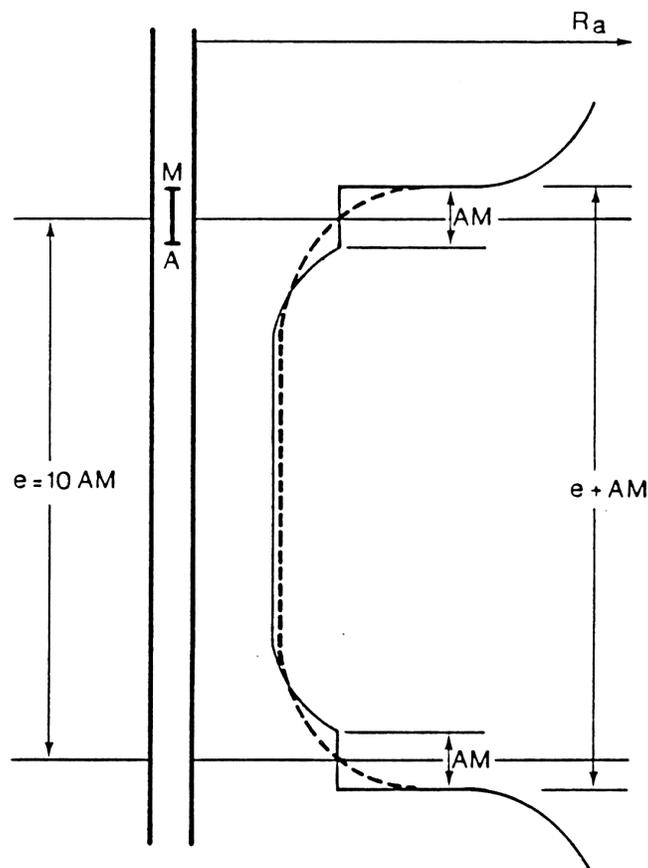


Figure 4.9 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc
 AM Espacement

Banc conducteur, sonde normale.

4.4. La sonde latérale

4.4.1. Principe

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 (Fig. 4.10). Le point de mesure est O, milieu de MN.

- **L'espacement** dans ce cas est de 18'8", 5m70.
- **La profondeur d'investigation** est égale à AO.
- **La définition verticale** est égale à AO.

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

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

SONDE LATÉRALE

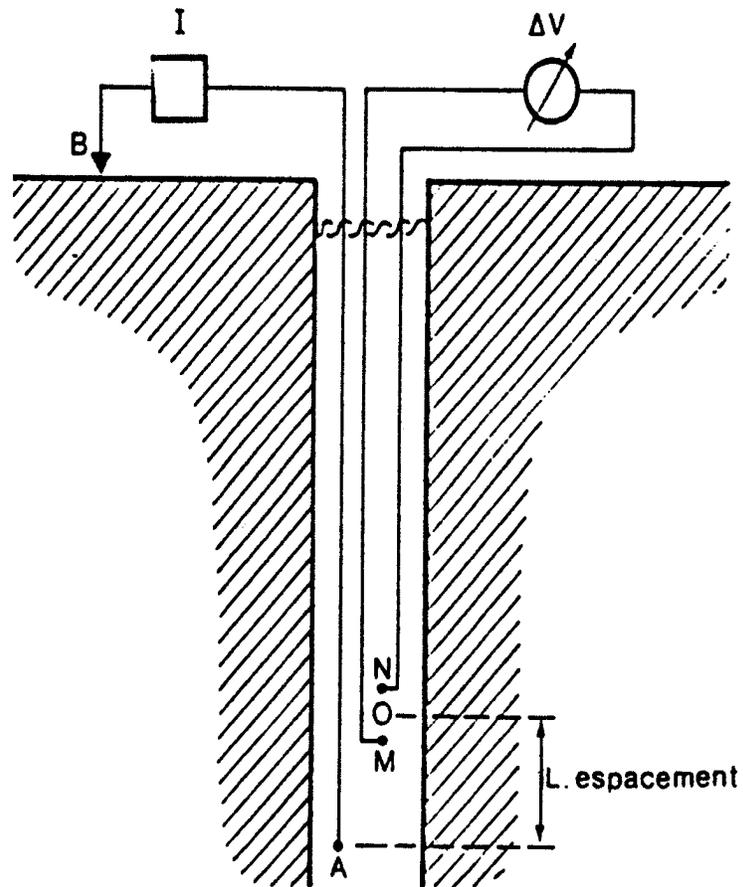


Figure 4.10 : Sonde latérale.

4.4.2. Réponse de la sonde latérale

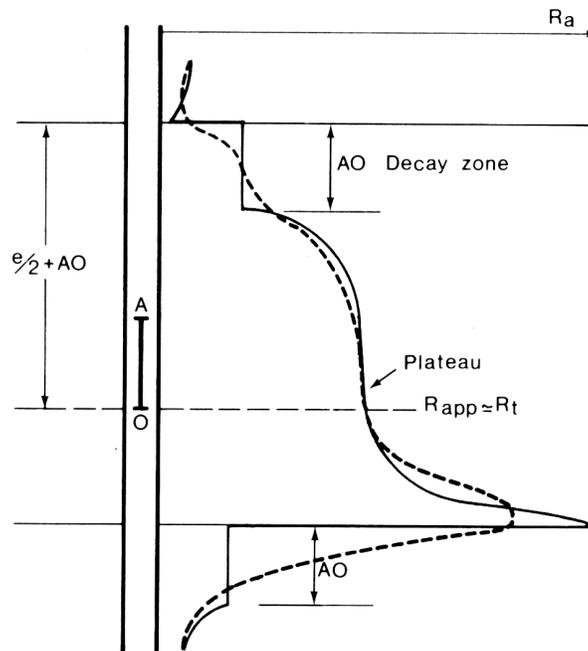
La sonde latérale fournit une courbe **dissymétrique** qu'il s'agisse de couches résistantes ou conductrices (Fig. 4.11, 4.12, 4.13 et 4.14).

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 (Fig. 4.15).



**Figure 4.11 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc
AO Espacement**

Banc résistant épais, sonde latérale $e \gg AO$.

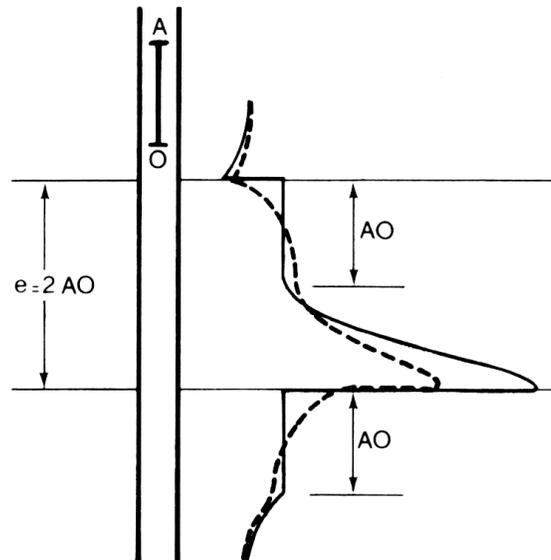


Figure 4.12 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc
AO Espacement

Banc résistant d'épaisseur moyenne, sonde latérale $e=2AO$.

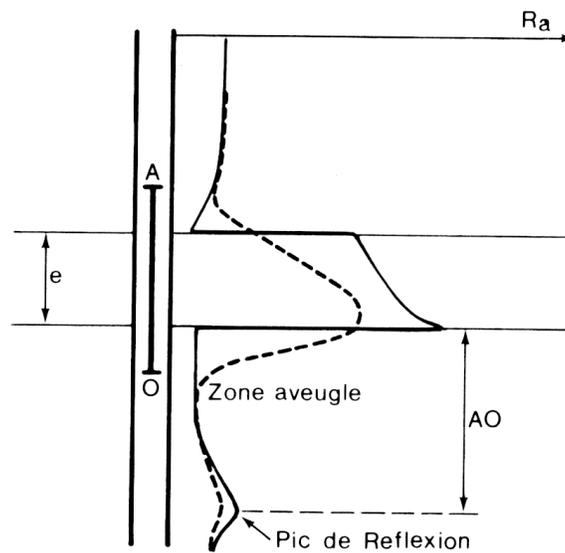
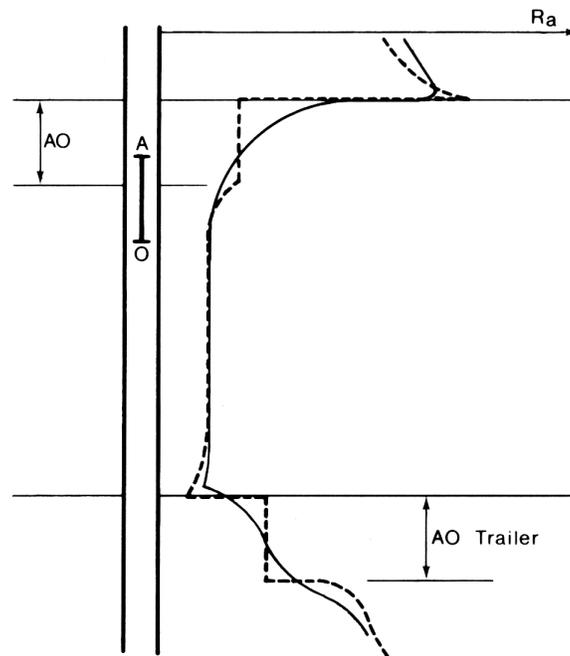


Figure 4.13 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc
AO Espacement

Banc résistant mince, sonde latérale $e < AO$.

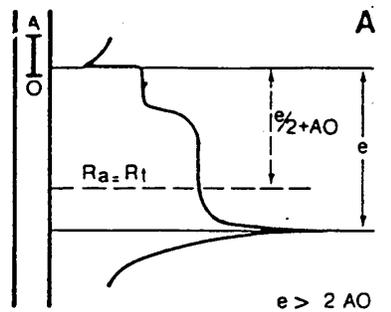


**Figure 4.14 : — Courbe théorique --- Courbe mesurée e épaisseur du banc
AO Espacement**

Banc conducteur, sonde latérale.

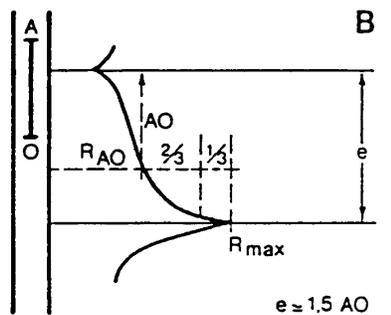
Règle du point milieu

$R_t = \text{Valeur lue à la distance } e/2 + AO$



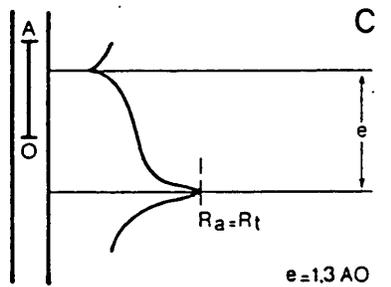
Règle des deux tiers

$R_t = R_{AO} + (R_{\max} - R_{AO}) * 2/3$



Règle du pic

$R_t = R_{\max}$



$R_t = R_{\max} * R_s / R_{\min}$

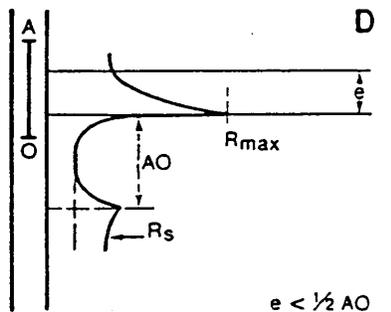


Figure 4.15 : Règles de lecture de la sonde latérale.

4.4.3. Détermination du pourcentage d'argile

Dans les zones à faibles résistivités, la résistivité dépend surtout de la teneur en argile et de la résistivité de l'argile. On peut donc utiliser la formule empirique suivante :

$$V_{sh} = \sqrt{\frac{R_{sh}}{R_t}}$$

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

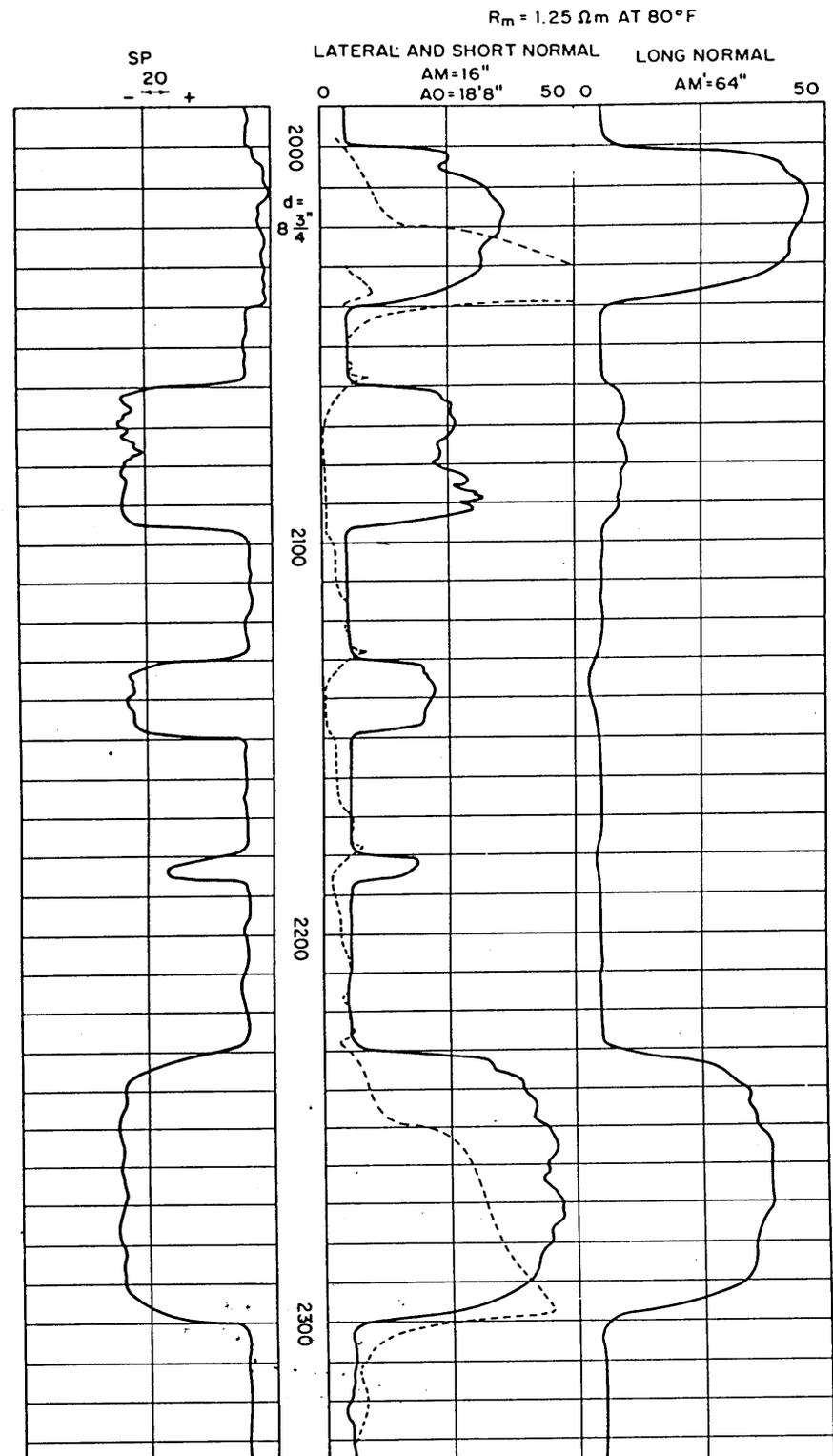


Figure 4.17 : Pirson, il s'agit d'une série de réservoirs de sables argileux. Le fluide peut être de l'eau douce, de l'eau salée ou des hydrocarbures. Donner pour les différents réservoirs les valeurs de résistivité des deux normales et de la latérale. Que vous suggèrent ces valeurs ? Calculer S_w et S_{x0} à 2260' Dessiner la coupe lithologique.

4.5. 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 (Fig. 4.19). 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 (Fig. 4.18).

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 ainsi :

- Le latérolog 7, LL7 , a une nappe de courant de 1 mètre d'épaisseur.
- Le latérolog 3, LL3 ,a un faisceau de courant de 30cm. 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.
- 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} .

Construits de telle façon à focaliser le courant électrique dans la formation, ils permettent une meilleure détermination de la résistivité.

Très bonne définition verticale.

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.

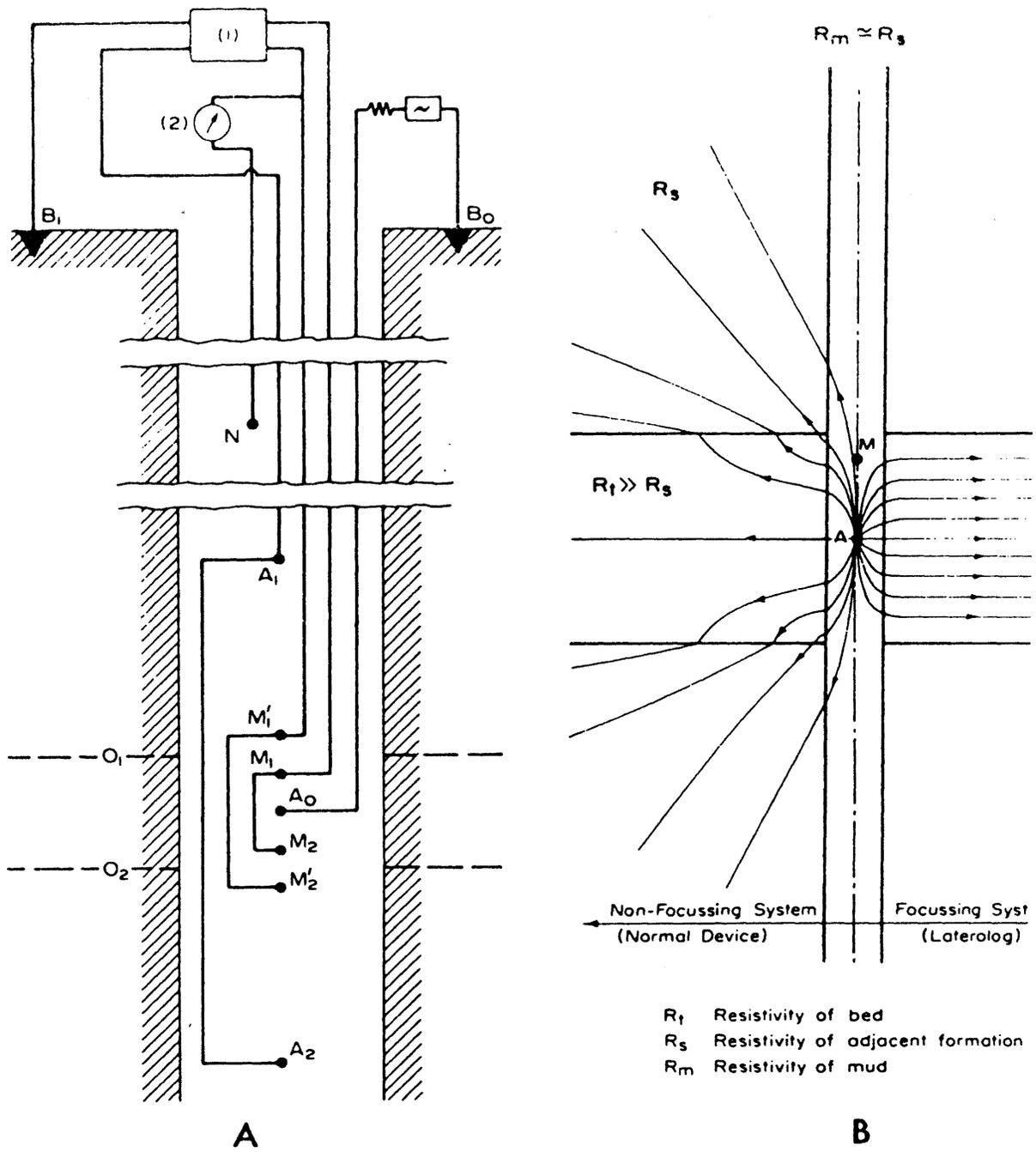


Figure 4.18 : Outil laterolog, arrangement des électrodes et comparaison de la distribution du courant pour l'outil normale et laterolog.

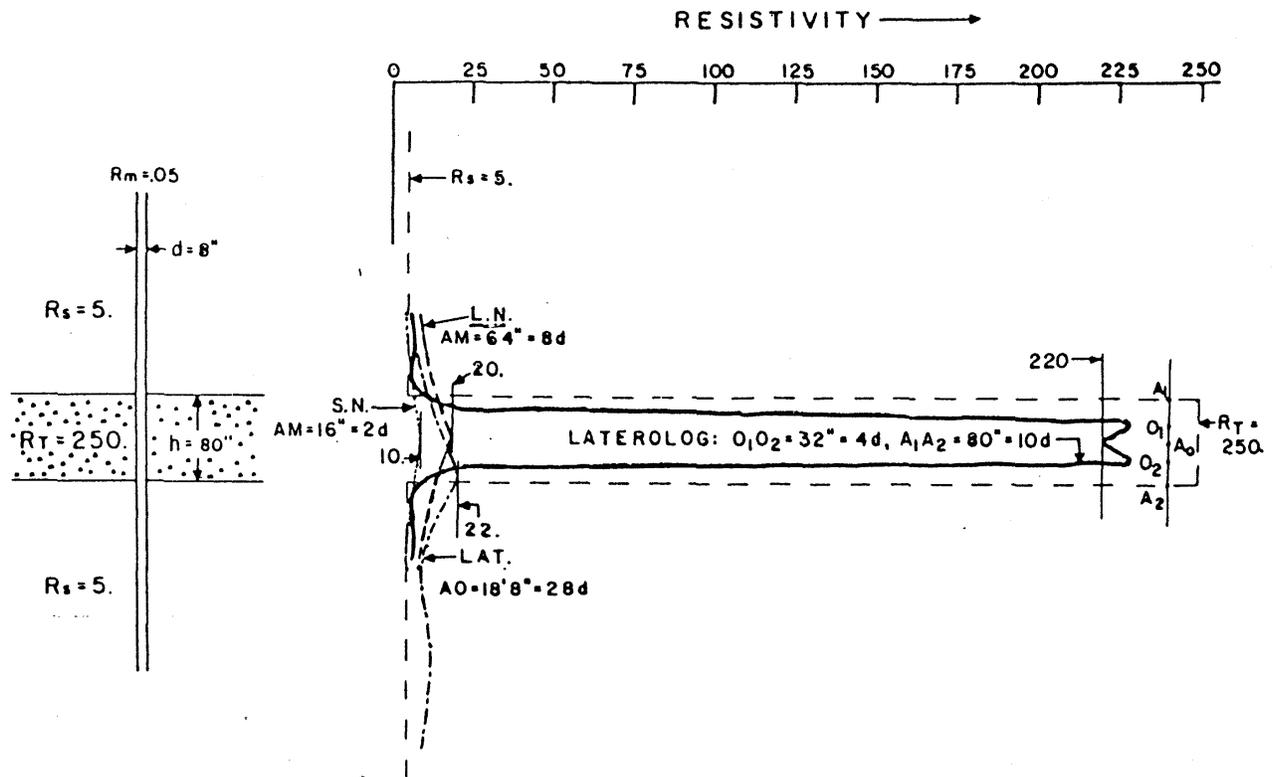


Figure 4.19 : Réponse de la sonde latérog en face d'un banc fin, résistant, non envahit avec une boue très salée.

4.6. Les outils électromagnétiques

Lorsque le trou est rempli d'air ou que le tubage est en plastique plein (isolant) il faut alors utiliser des outils électromagnétiques (Fig. 4.20).

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.

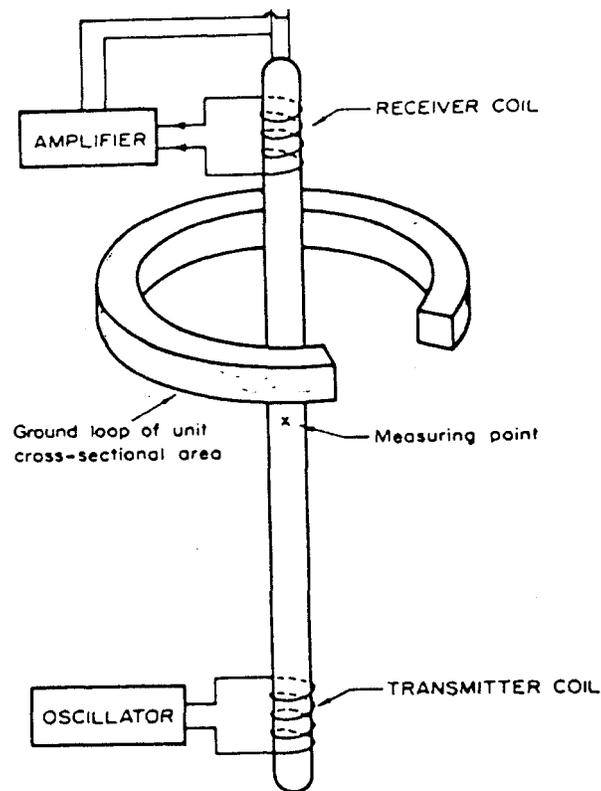


Figure 4.20 : Schéma de l'outil à induction.

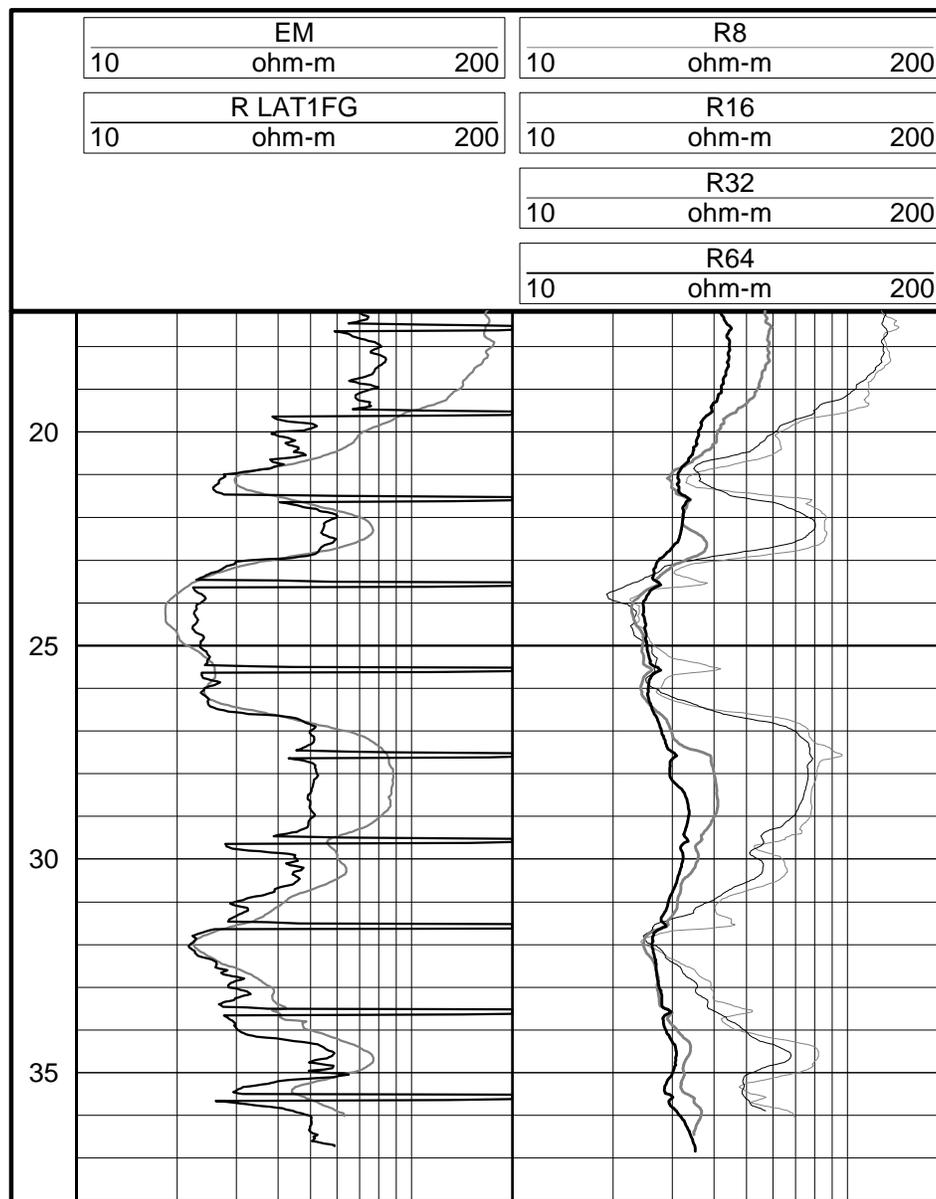


Figure 4.21 : Enregistrement de diagraphies électriques.

EM : Electro Magnétique (Cugy, Juin 1998).

R LAT1FG : Laterolog (Cugy, Juin 1998).

R8 : Normale 8'' (Cugy, Juin 1998).

R16 : Normale 16'' (Cugy, Juin 1998).

R32 : Normale 32'' (Cugy, Juin 1998).

R64 : Normale 64'' (Cugy, Juin 1998).

Des corrections sont apportés aux mesures électriques pour corriger l'effet du tubage PVC de 4'' (Fig. 4.22):

$$R_{\text{Laterolog corrected}} = 0.69 * R_{\text{Laterolog measured}}$$

$$R_{\text{Electro magnetic corrected}} = 1.12 * R_{\text{Electro magnetic measured}}$$

$$R_{\text{Normal 8'' corrected}} = 0.8 * R_{\text{Normal 8'' measured}}$$

$$R_{\text{Normal 16'' corrected}} = 0.9 * R_{\text{Normal 16'' measured}}$$

$$R_{\text{Normal 32'' corrected}} = 0.9 * R_{\text{Normal 32'' measured}}$$

$$R_{\text{Normal 64'' corrected}} = 0.9 * R_{\text{Normal 64'' measured}}$$

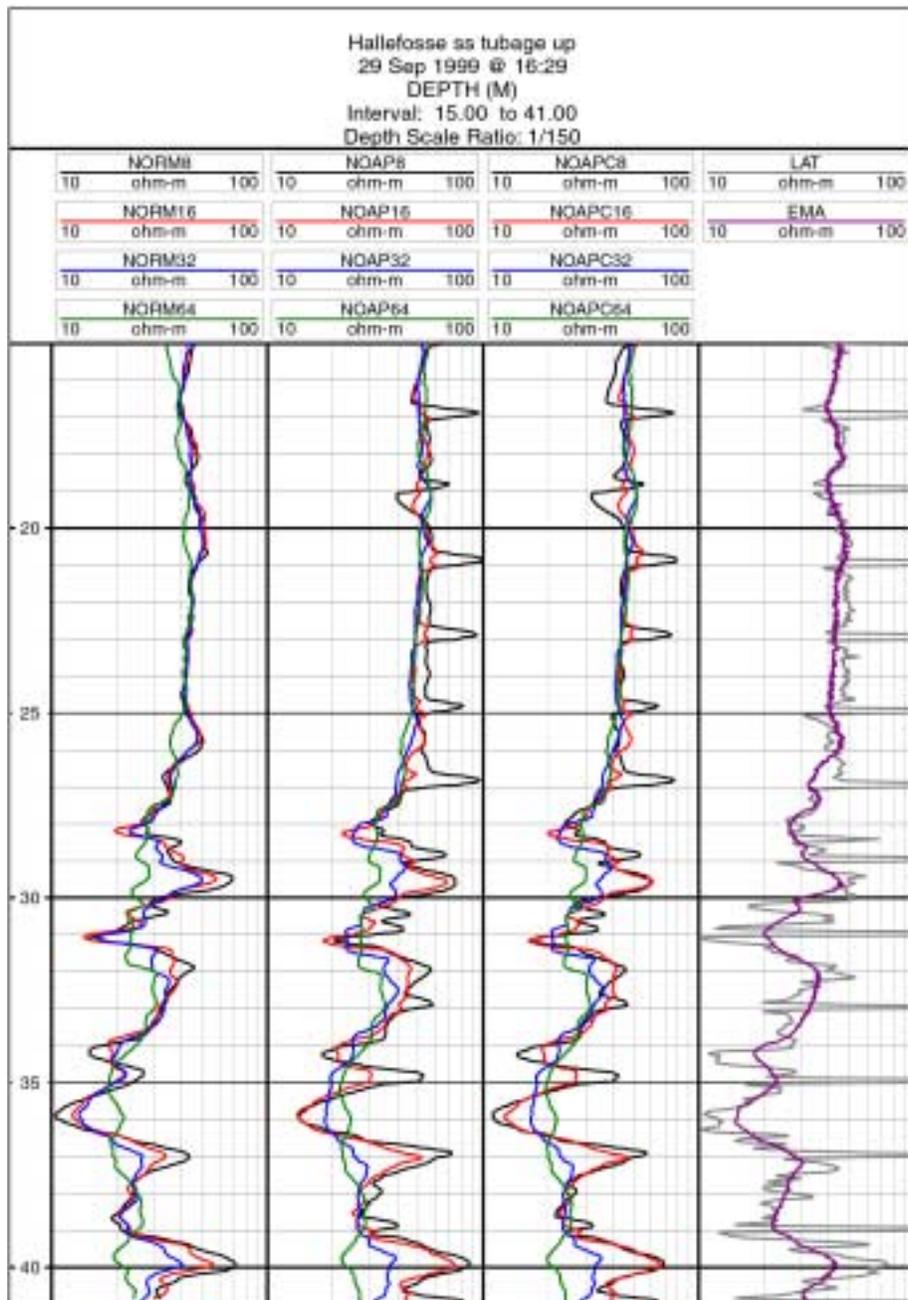


Figure 4.22 : Mesures électriques corrigées de l'effet du tubage PVC.

4.7. Travaux pratiques : les outils de résistivité

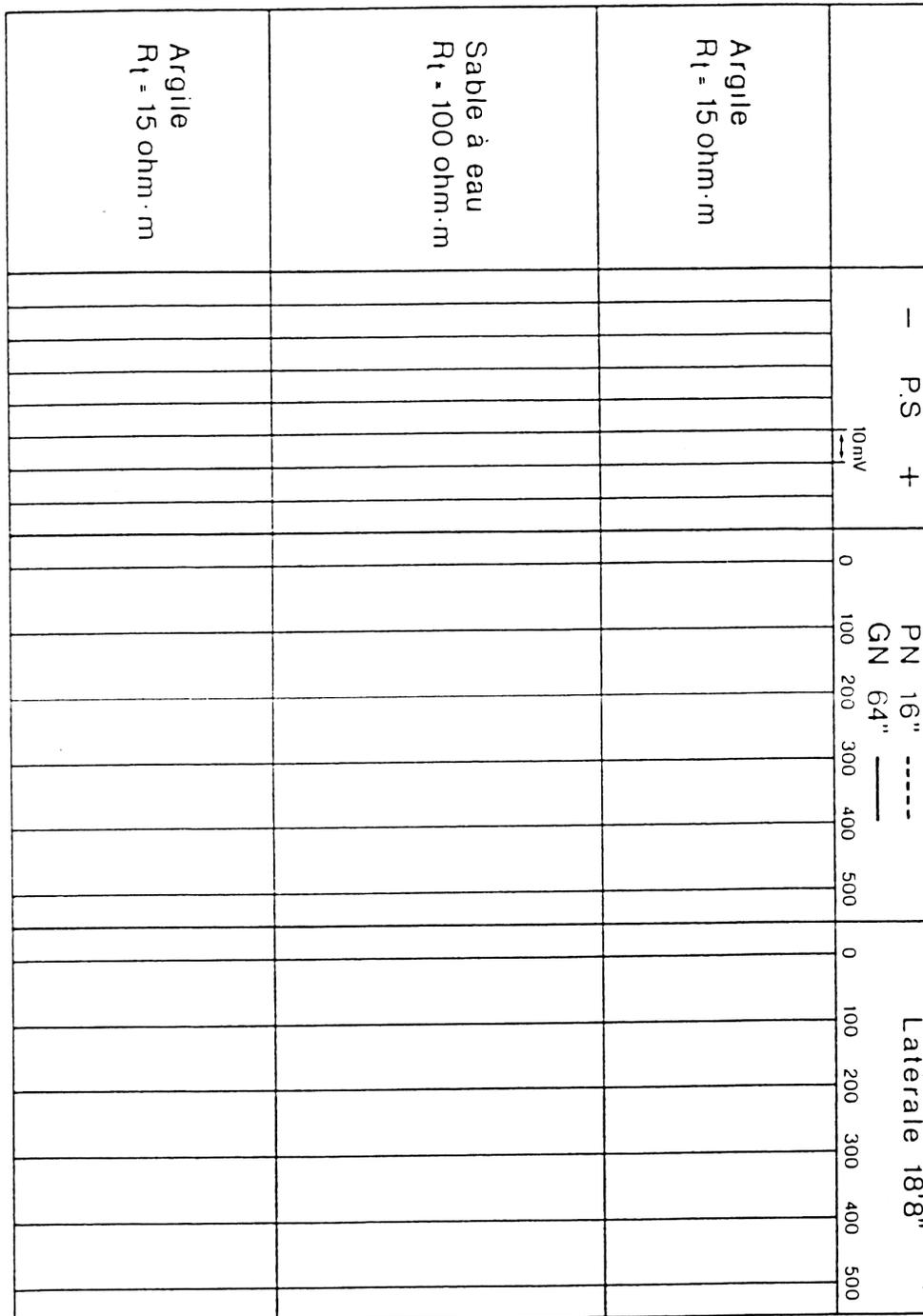


Figure 4.23 : Dessiner les courbes P.S., PN 16'', GN 64'', latérale 18'8''. Pour obtenir les valeurs numériques on fait les hypothèse suivantes : $R_{mf} = R_{mfe} = 20 \Omega\cdot\text{m}$, $R_w = R_{we} = 5 \Omega\cdot\text{m}$, $T_f = 100 \text{ }^\circ\text{F}$.

5. LE GAMMA RAY

5.1. Introduction

Les diagraphies font un usage intensif de la mesure de la radioactivité dans les forages. Les logs nucléaires ont en effet un grand avantage, **ils peuvent être enregistrés en trous ouverts ou tubés, vides ou remplis de n'importe quel type de fluide.**

Les plus couramment utilisés sont : **le gamma ray**, qui est une mesure de la radioactivité naturelle, Le log **gamma-gamma** et le log **neutron** qui sont des mesures de radioactivité provoquée.

5.2. La radioactivité naturelle.

Le log nucléaire le plus simple, **le gamma ray**, est une mesure de **la radioactivité naturelle** existant dans certaines roches (Fig. 5.1).

Ce log apporte des informations lithologiques ; il met bien en évidence les charbons, les évaporites et surtout les niveaux d'argiles qui constituent souvent les limites des réservoirs dans le sous-sol.

D'autre part, le log gamma permet d'estimer le pourcentage d'argile dans les formations sableuses. Contrairement au log P.S. qui a la même fonction, il peut être utilisé dans les forages tubés, en présence de boues résistantes et dans les forages remplis d'air.

Les éléments radioactifs dominants

De très nombreux isotopes naturels sont radioactifs. Seuls trois d'entre eux jouent un rôle notable dans la radioactivité naturelle des minéraux et des roches. Les autres sont extrêmement peu stables ou extrêmement rares.

Les trois isotopes qui intéressent le géophysicien sont : l'uranium, le thorium et le potassium 40.

Toutes les roches peuvent à priori être radioactives du fait de la dissémination très générale de ces éléments, cependant leur fixation préférentielle sur les sédiments fins fait que ceux-ci sont généralement plus radioactifs que les sédiments grossiers. D'autre part les argiles se montrent le plus souvent fortement radioactives cette particularité peut avoir des causes très diverses :

- Il s'agit d'argiles potassiques.
- Les argiles ne sont pas potassiques mais elles s'accompagnent de nombreux minéraux accessoires à potassium, uranium et thorium.
- Les argiles, à l'origine non radioactive, ont adsorbé des cations comportant uranium et thorium. Ce cas est fréquent.

De plus certains types lithologiques sont naturellement radioactifs : niveaux de sels potassiques, hard ground phosphatés, grès micacés de mer du nord etc.

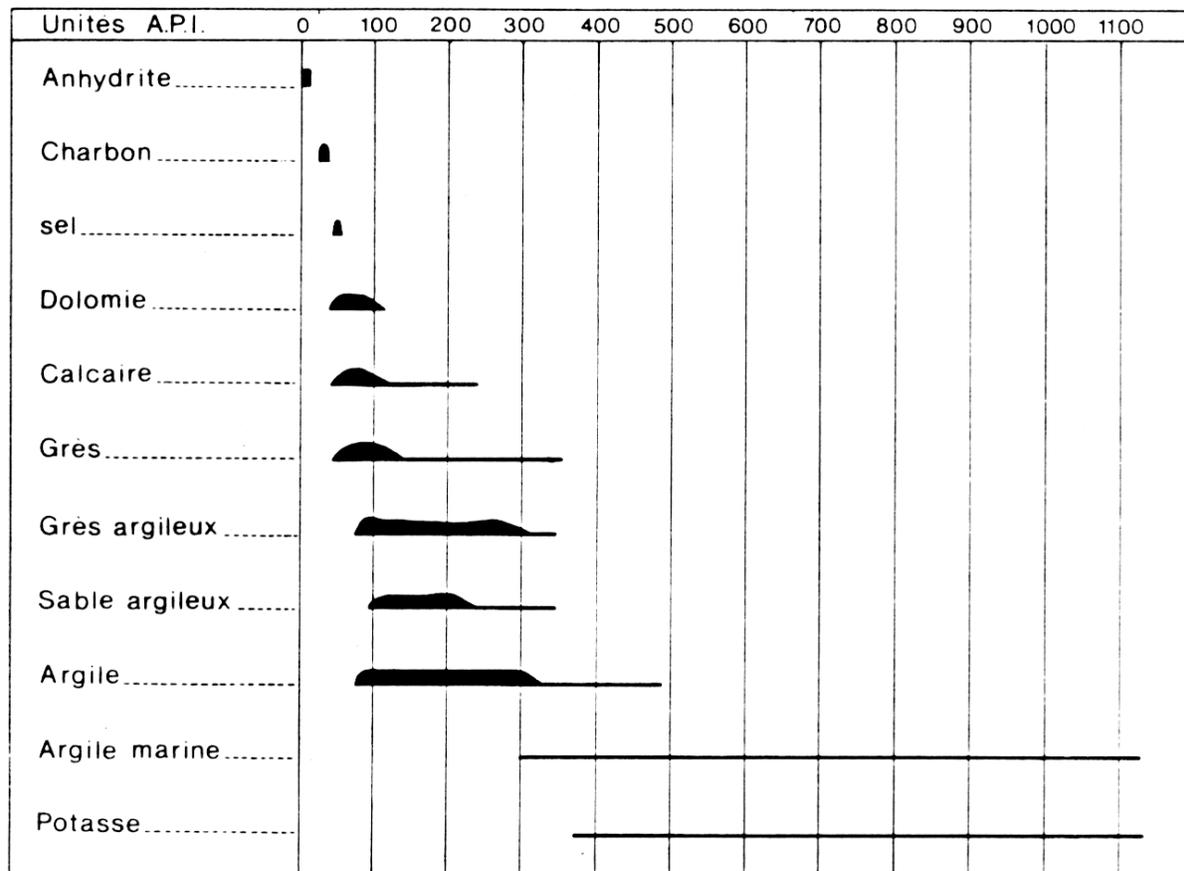


Figure 5.1 : Radioactivité des principales roches sédimentaire.

En fait les principales roches réservoirs peuvent être classées selon leur degré de radioactivité.

Roches à radioactivité élevée :

- granites potassiques et roches en décaillant,
- certains sables et grès riches en minéraux accessoires à uranium et thorium,
- phosphates,
- évaporites potassiques,
- la plupart des argiles,
- schistes noirs.

Roches à radioactivité moyenne :

- grès et sables,
- gneiss.

Roches à radioactivité faible :

- calcaires et dolomies,
- charbons en général,
- évaporites sans potassium, halite, anhydrite,

- roches basiques et ultrabasiques.

5.3. Le paramètre enregistré

Il existe plusieurs outils gamma ray ; on peut en effet mesurer tout l'éventail des émissions gammas produites par la formation ou, par un choix convenable de fenêtres d'énergie, faire une discrimination entre le rayonnement dû au potassium, celui dû au thorium et celui dû à l'uranium. On parle dans ce cas de spectrométrie gamma (Fig. 5.5).

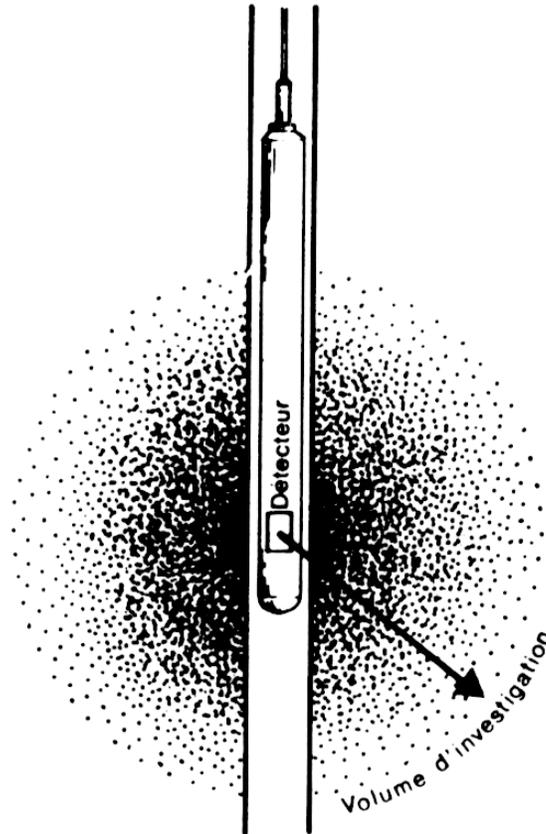


Figure 5.2 : Volume d'investigation du gamma ray.

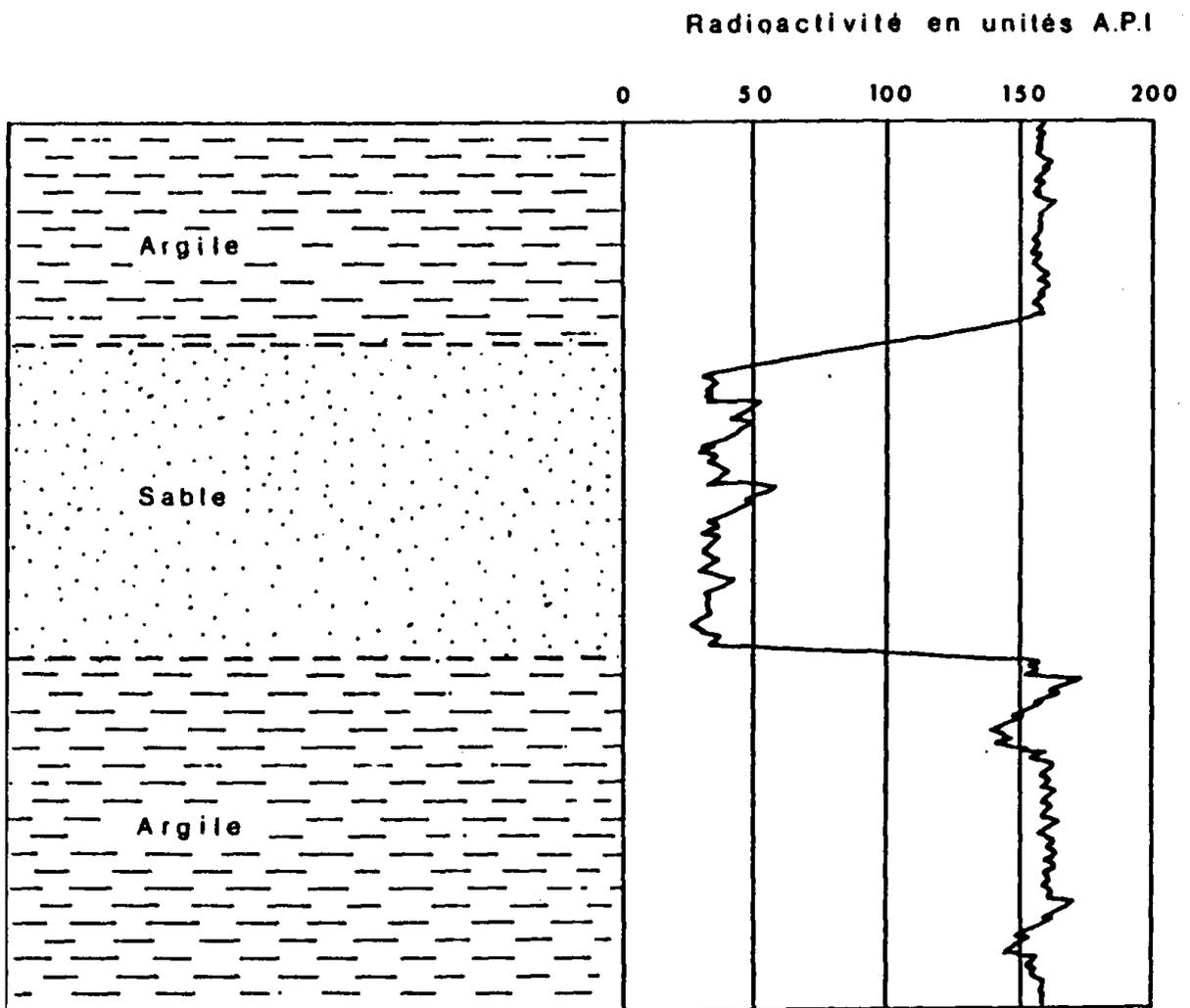


Figure 5.3 : Radioactivité naturelle des argiles.

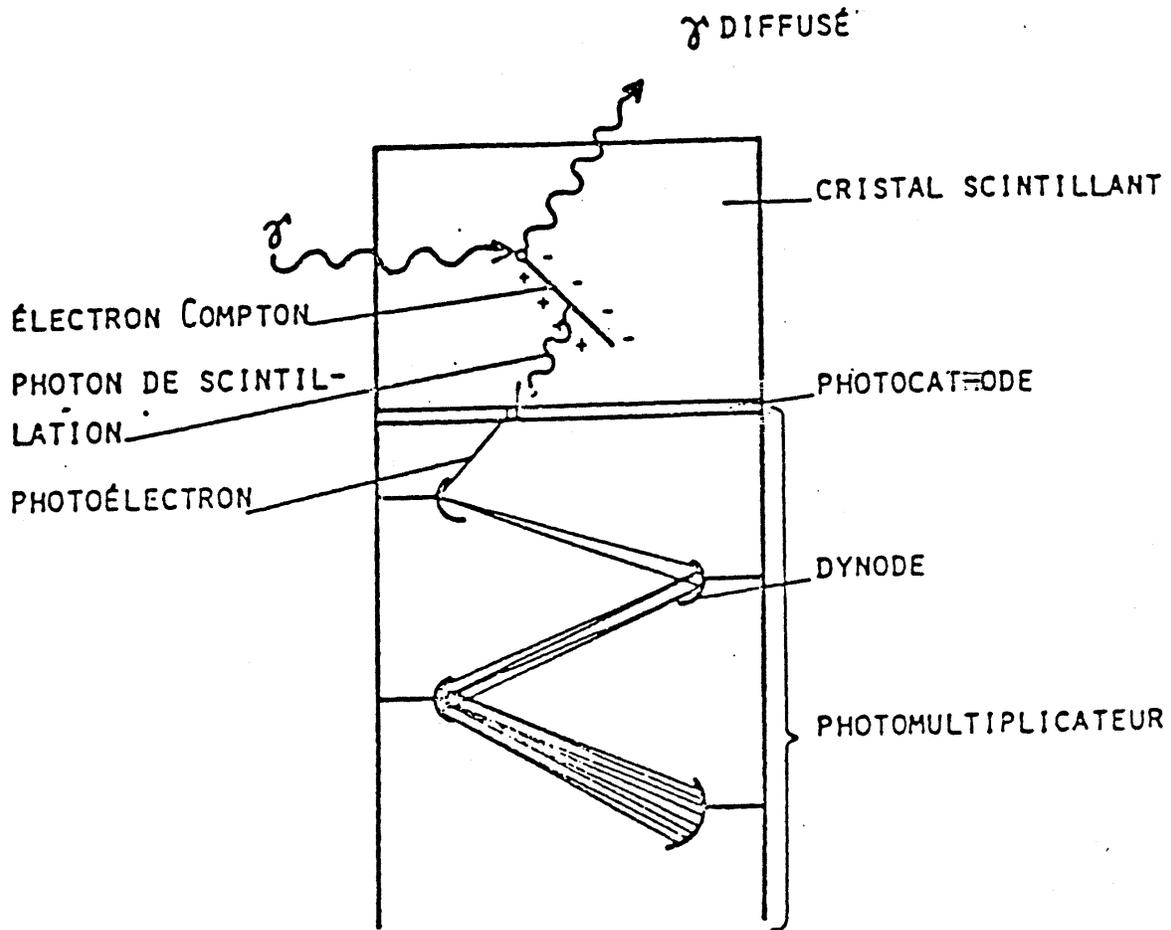


Figure 5.4 : Principe de fonctionnement du compteur à scintillation.

5.4. La mesure

5.4.1. La mise en œuvre

Les outils modernes utilisent un compteur à scintillation qui fonctionne de la façon suivante : un cristal scintillant (le plus souvent iodure de sodium activé au thallium) émet un photon lumineux lorsqu'il est atteint par un rayon gamma. Cette photo émission est transformée par un photomultiplicateur en une impulsion électrique amplifiée pour devenir mesurable. L'intensité de chaque émission lumineuse est proportionnelle à l'énergie des photons gammas qui l'ont produite. En définitive donc l'impulsion électrique mesurée est proportionnelle à l'énergie de la radiation gamma incidente (Fig. 5.4).

La sensibilité de ces compteurs est fonction de la taille et de la forme du cristal. Plus le cristal utilisé est grand, plus le nombre d'impulsions mesurées est important.

Le cristal mesure en général quelques centimètres cubes, ce qui permet une excellente définition verticale par contre la température a une grande influence et ces compteurs sont le plus souvent dans des vases Thermos.

5.4.2. Echelle et unités

Les diagraphies gamma ray sont enregistrées avec des unités très variées. En diagraphie pétrolière, l'unité utilisée est actuellement l'A.P.I. (American Petroleum Institute). Cette unité est normalisée, 16,5 unités A.P.I. correspondent à une concentration d'éléments radioactifs équivalente à 1 µgramme de radium par tonne.

Les argiles ont une activité variant entre 100 et 200 A.P.I., les sables 30 à 80, les carbonates 10 à 50.

Dans les appareils simples qui servent aux recherches d'eau, les unités ne sont que relatives et rarement calibrées, il s'agit le plus souvent de coups par secondes, **cps**, ou coups par minute, **cpm**.

Par convention, la valeur de la radioactivité **augmente vers la droite** sur les enregistrements.

Le nombre d'A.P.I. ou de cps pour une radioactivité donnée dépend de la taille du cristal de l'électronique de l'outil, mais aussi de la constante de temps et de la vitesse d'enregistrement

En effet un facteur important dans l'interprétation des logs nucléaires est la nature statistique de l'émission radioactive.

Il est impossible de prédire combien d'atomes vont se désintégrer ou combien de photons gammas seront émis pendant une courte période de temps. La mesure se fait donc pendant un certain **temps T que l'on appelle constante de temps**. T représente le temps en secondes pendant lequel on fait une moyenne des événements mesurés (Fig. 5.5 et 5.6).

Une constante de temps importante tend à réduire la magnitude des fluctuations.

Un autre paramètre important est **la vitesse d'enregistrement**, en effet si l'on choisit une grande constante de temps cela entraîne des distorsions aux limites de bancs si la vitesse d'enregistrement n'est pas adaptée. La vitesse d'enregistrement sera d'autant plus lente que la constante de temps choisie sera grande.

On considère généralement que la sonde ne doit pas se déplacer de plus d'un pied pendant une constante de temps. C'est une règle qui permet d'obtenir de bonnes diagraphies de rayons gammas.

De plus pour quantifier la partie aléatoire de la partie réellement due à la formation de la mesure il est obligatoire de faire une repeat section (doublé le log avec le même outil). La différence entre les deux logs correspondra à la partie aléatoire du signal.

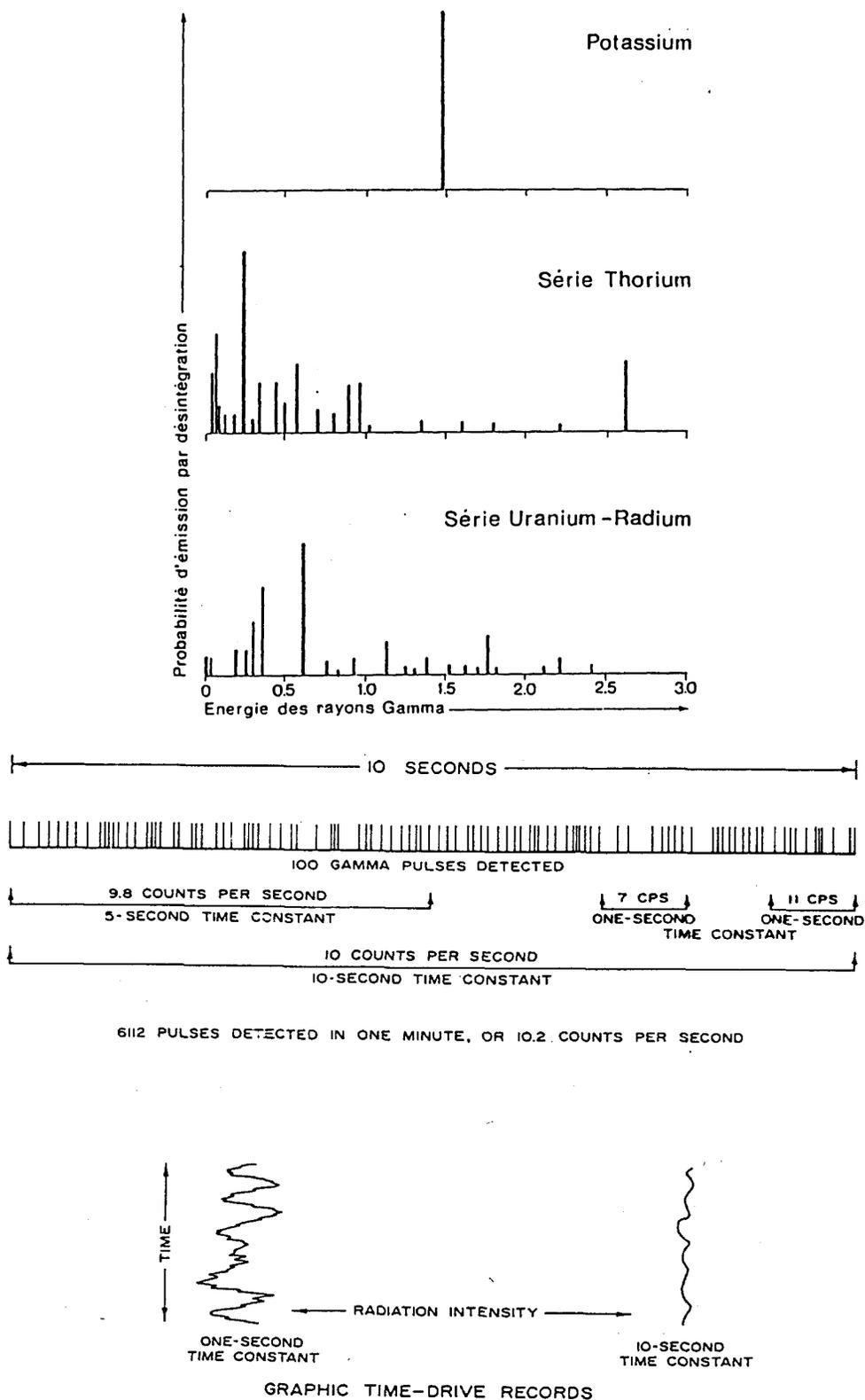


Figure 5.5 : Effet de la constante de temps et spectrométrie gamma.

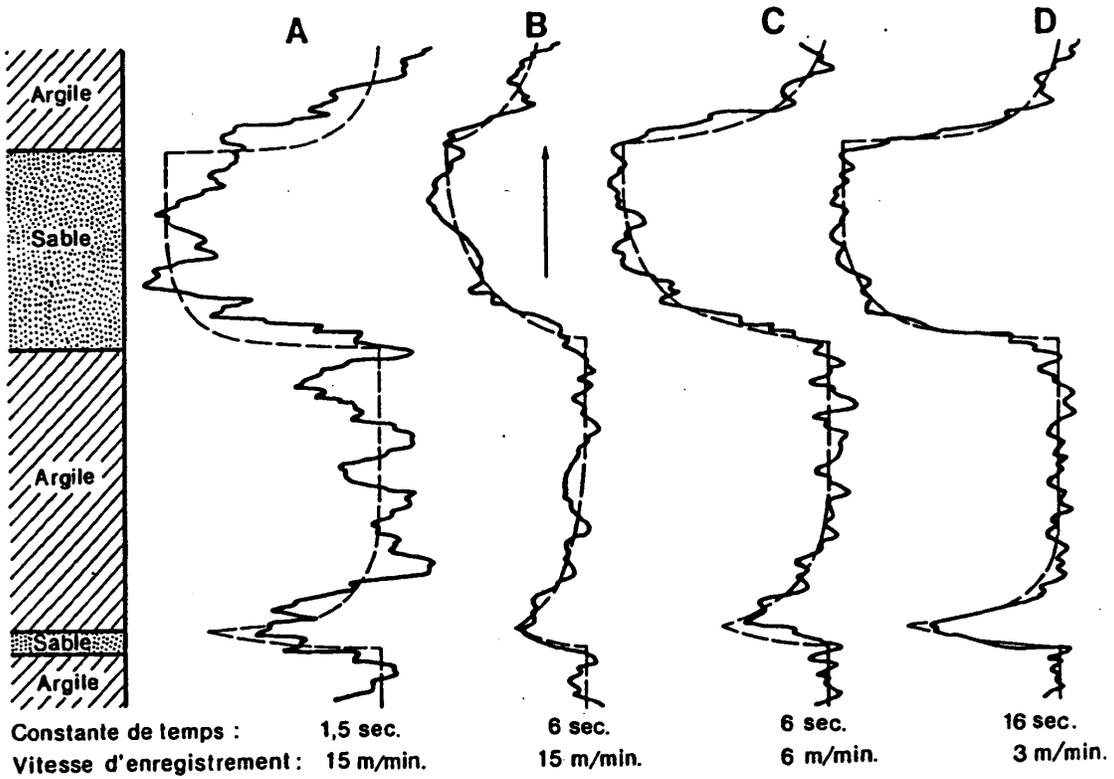
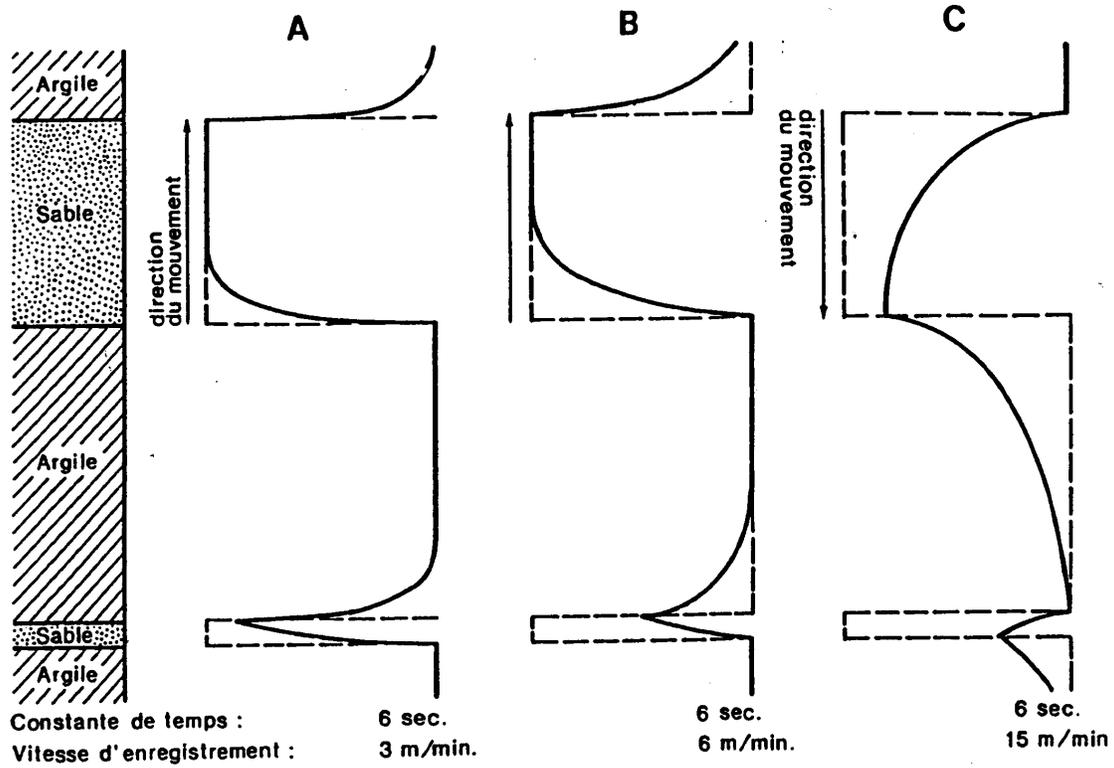


Figure 5.6 : Effets de la vitesse d'enregistrement et de la constante de temps.

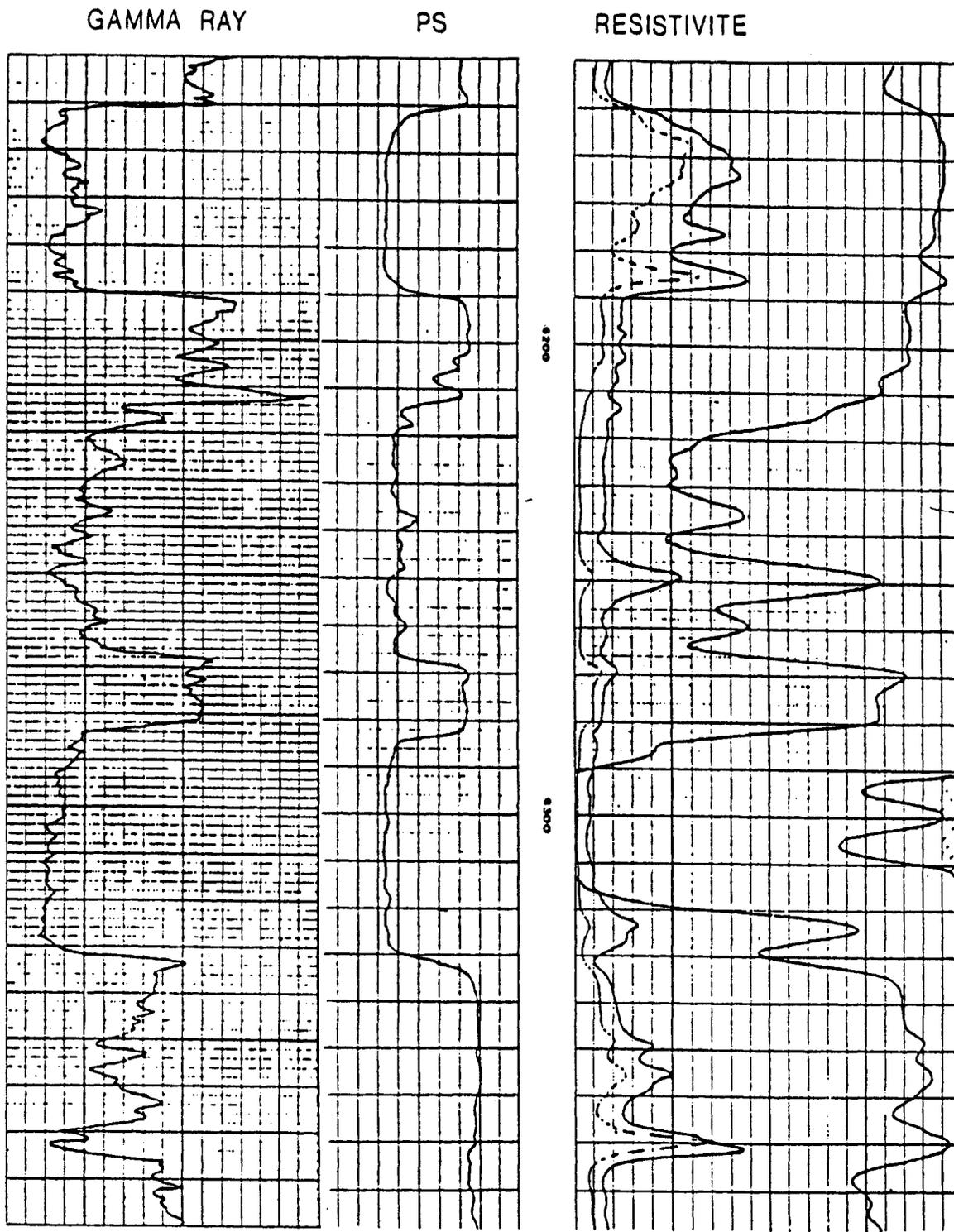


Figure 5.7 : Exemple d'enregistrement du GR. GR : 10 cps par division, PS : 10 mV par division, R : 10 Ohm.m par division.

5.5. Interprétation qualitative

On définit le volume d'investigation d'une sonde gamma ray comme étant le volume sphérique centré sur le détecteur, dont proviennent 99 % des photons gammas détectés. Ce volume n'a pas de limites bien marquées, il dépend de l'instrument, du fluide de forage, du diamètre du trou, de la présence du tubage, de la densité de la roche etc.

Le rayon de la sphère d'investigation varie entre 20 cm pour les formations denses telles que la dolomie, jusqu'à 90 cm dans des lignites (Fig. 5.2).

Le log gamma va être influencé par :

- **Le diamètre du trou** - Il est évident que lorsque le détecteur de rayons gammas se trouve en face d'une cave, il ne mesurera pas autant de rayons gammas. Cette diminution sera d'autant plus forte que la densité de la boue est élevée.
- **Le tubage** - Le log gamma peut s'enregistrer en trou tubé. L'acier du tubage joue le rôle d'écran, de telle sorte que l'activité mesurée n'est pas comparable aux mesures faites en trou ouvert.

Les corrections à apporter pour le diamètre du trou, la densité de la boue et l'épaisseur du tubage sont données par différents abaques. Ils permettent de normaliser toutes les mesures de radioactivité naturelle effectuées dans les sondages.

5.6. Interprétation quantitative

Il faut pour que l'évaluation du pourcentage d'argile soit possible que la série contienne un véritable banc d'argile, et une zone de sable (ou calcaire) propre qui serviront de référence.

Le volume d'argile au point X se calcule alors de la façon suivante (Fig. 5.8) :

$$I_{sh} = \frac{GR_X - GR_{propre}}{GR_{argile} - GR_{propre}}$$

Cet indice d'argile, I_{sh} , peut être assimilé au volume d'argile en l'absence de toute autre précision sur la formation considérée, c'est un volume en excès.

Pour une estimation plus précise il faut utiliser un abaque calculé à cet effet, et qui tient compte du type de roches grâce à l'**abaque 8**.

5.7. Conclusions

Le log gamma ray apporte quantité d'informations, il met bien en évidence les niveaux imperméables qui sont souvent des bancs d'argiles. Il est à cet effet particulièrement utile quand la P.S. est inemployable.

Le log gamma ray peut être aussi utilisé pour la détection et l'évaluation de minerais radioactifs.

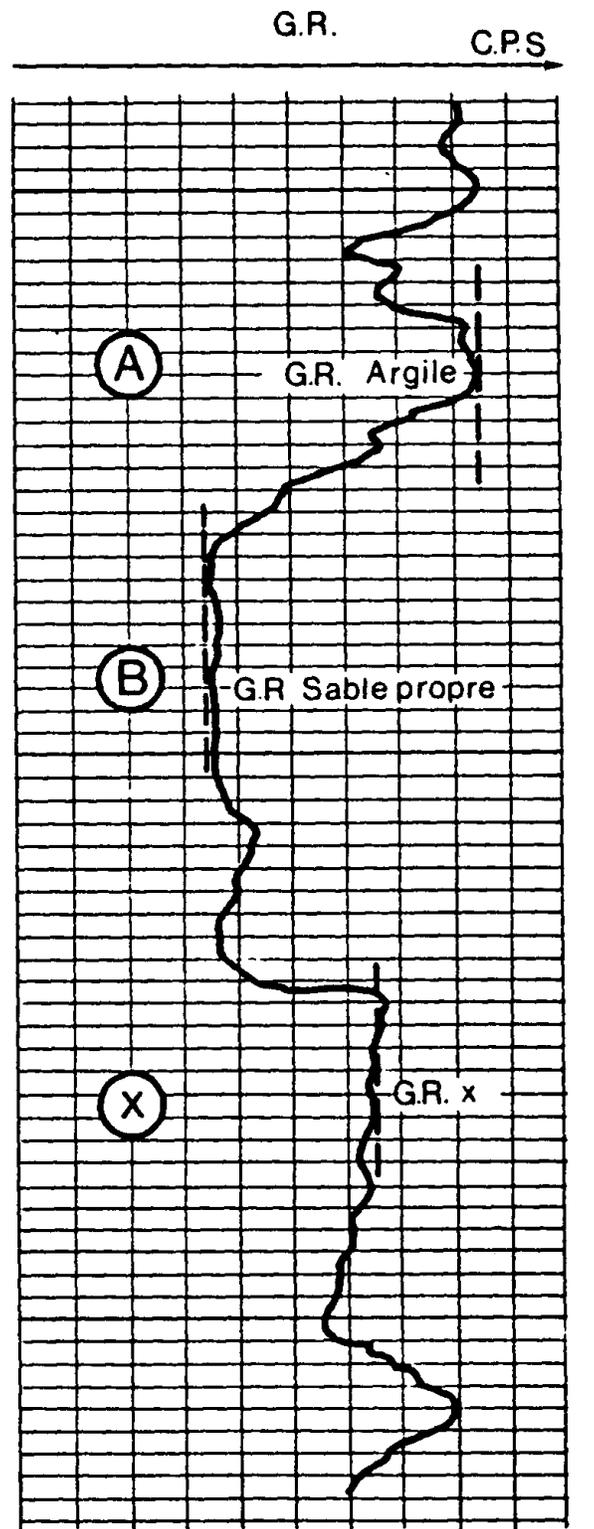


Figure 5.8 : Calcul du pourcentage d'argile.

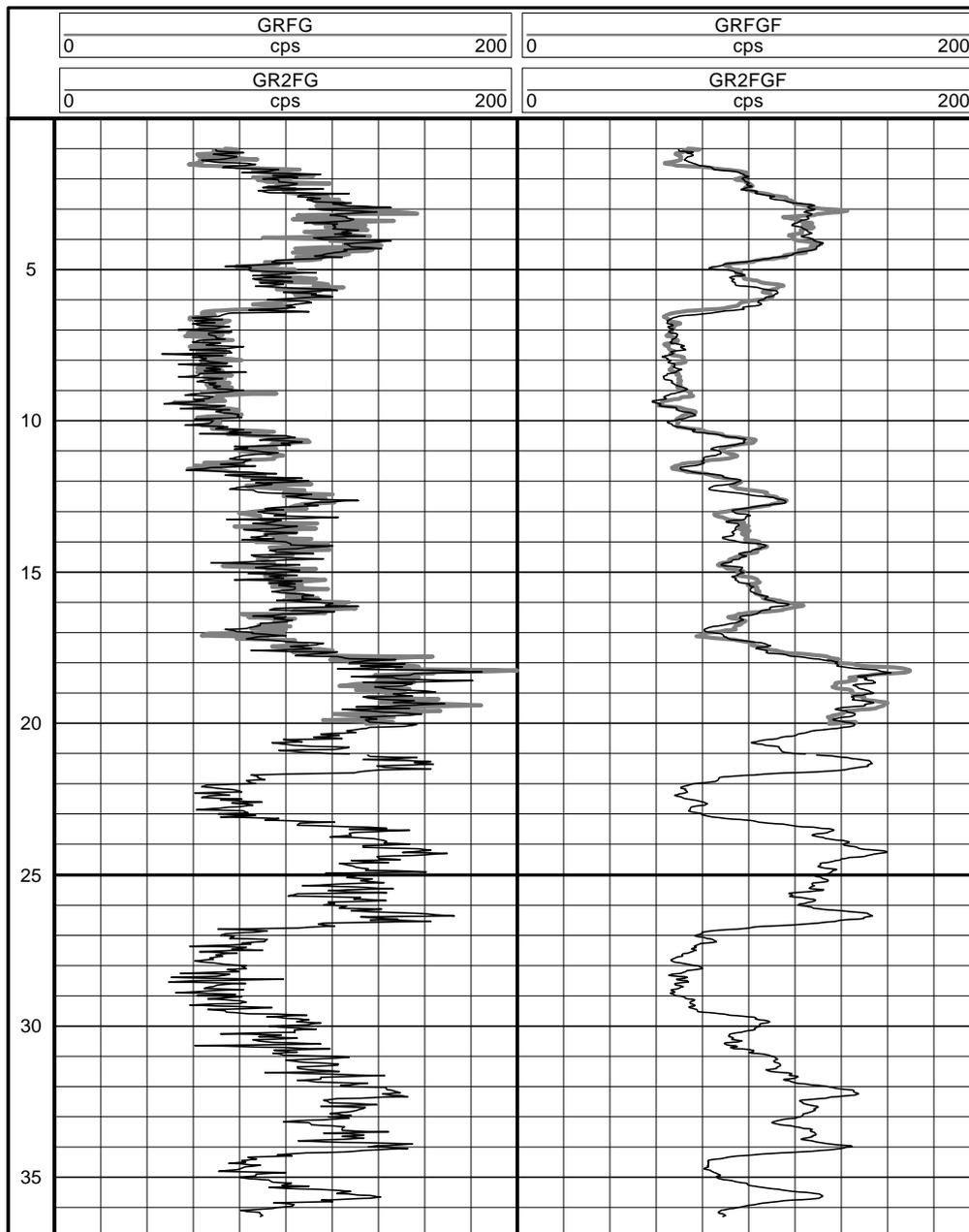


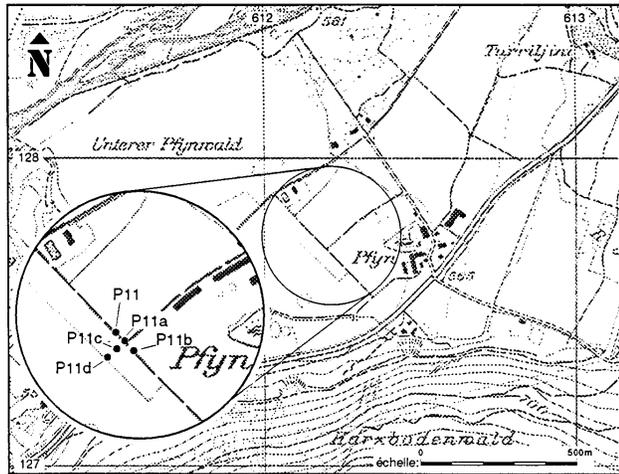
Figure 5.9 : Gamma Ray naturel (Cugy).

GRFG : Gamma Ray mars 1997.

GRFGF : Gamma Ray mars 1997 filtré sur 40 cm.

GR2FG : Gamma Ray avril 1998.

GR2FGF : Gamma Ray avril 1998 filtré sur 40 cm.



GRF : Gamma Ray filtré sur 23 points
 GRRF : Gamma Ray Repeat Section filtré sur 23 points

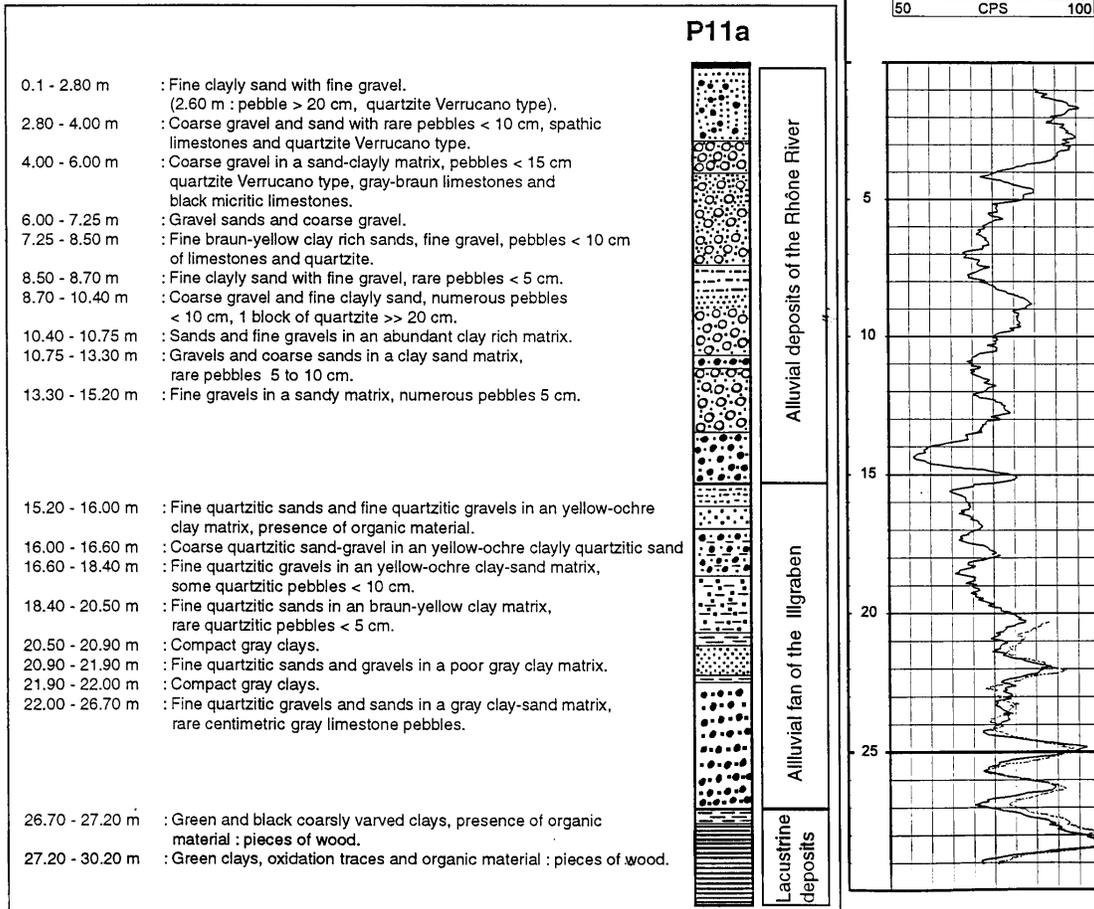


Figure 5.10 : Lithologie et gamma ray dans des sédiments quaternaires du Valais.

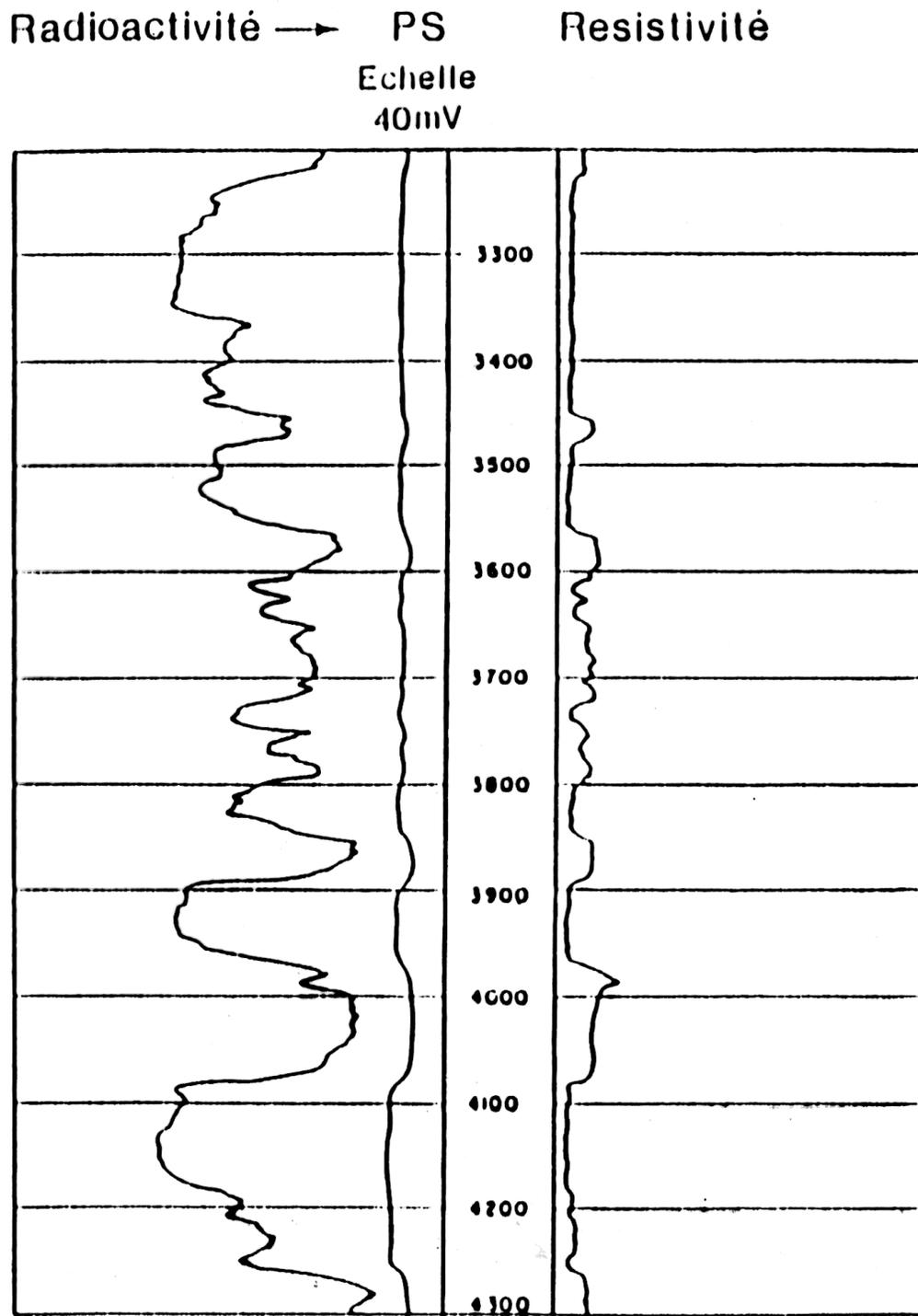


Figure 5.11 : Exemple de gamma ray avec une PS plate.

5.8. Travaux pratiques : gamma ray

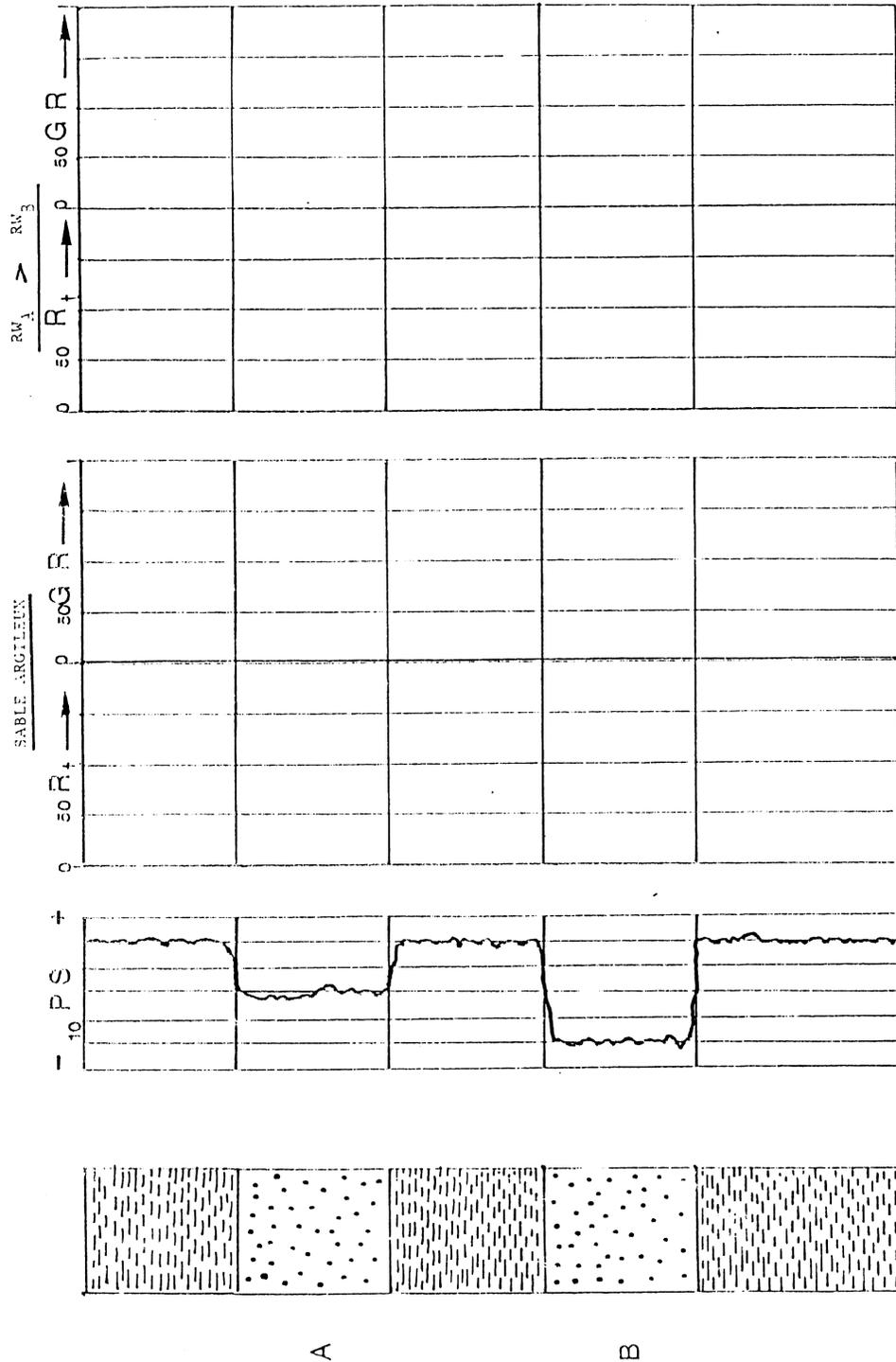


Figure 5.12 : Le log P.S. vous donne une déflexion moins importante en A. Ceci peut provenir soit d'une présence d'argile soit d'une différence entre R_{WA} et R_{WB} . Dessiner dans les deux cas l'allure des courbes R_t et G.R.



Figure 5.13 : Déterminer les lithologies et les teneurs en argile.

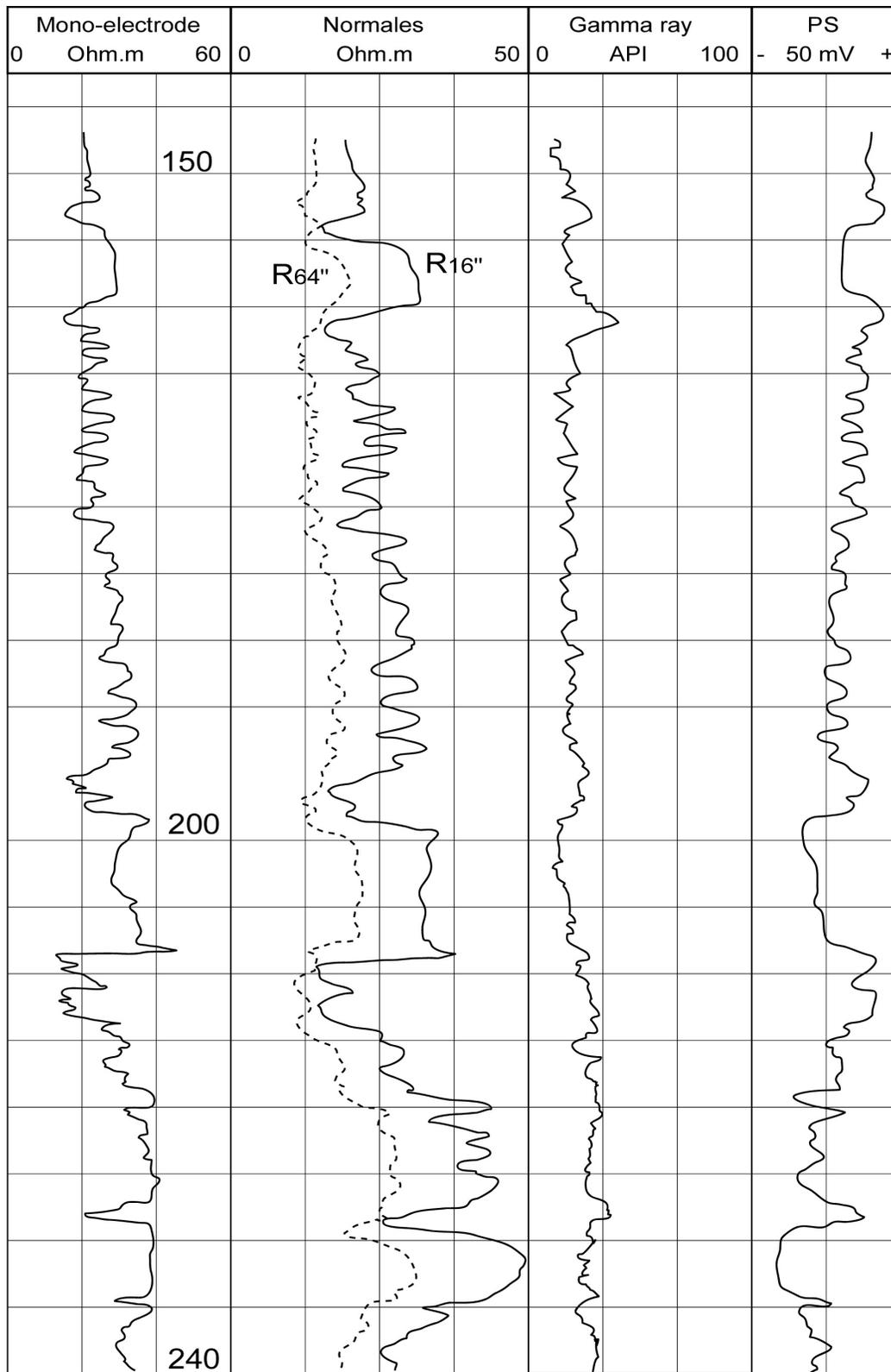


Figure 5.14 : Déterminer la lithologie à partir des diagraphies.

GR = log response in the zone of interest,
API units

GR_{cl} = log response in clean beds, API units

GR_{sh} = log response in shale beds, API units

The gamma ray shale index has been empirically correlated with the fractional volume of shale in formations by the curves shown in Figure 10.1. Curve 1 is the linear relation where the shale volume equals I_{GR} and provides an upper limit of shale content in any kind of formation. Curve 2, used for pre-tertiary formations, is defined by the exponential relationship:

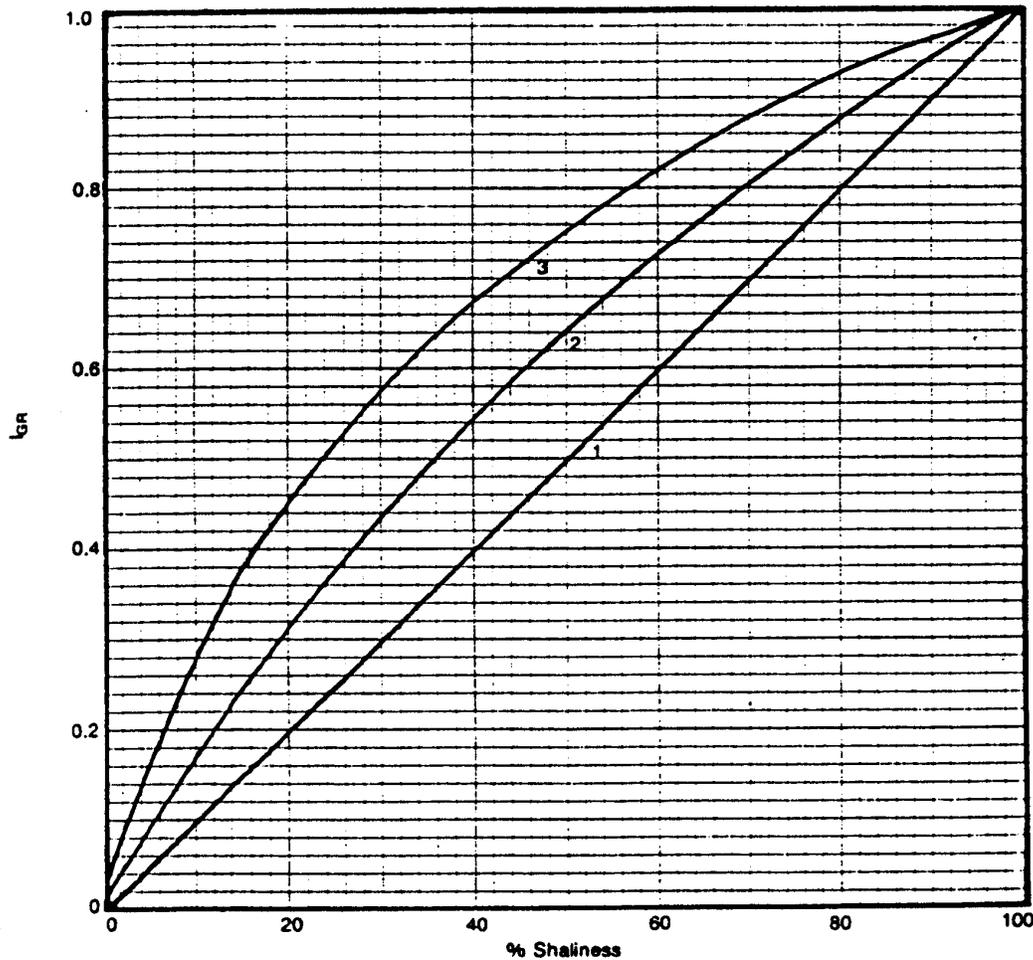
$$V_{sh} = 0.33(2^{2 \times I_{GR}} - 1)$$

This relationship is applicable in the case of highly consolidated Mesozoic and older rocks. If used in the case of younger, unconsolidated formations, it would result in shale volume estimations that are too high.

Curve 3, meant for tertiary clastics, is defined by the equation:

$$V_{sh} = 0.083(2^{3.7 \times I_{GR}} - 1)$$

If two formations of different geological age have the same amount of radioactive shale per unit volume, the Gamma Ray Log response would be lower in the case of more consolidated and dense formations. This is because the gamma ray absorption increases with the density of the medium through which it passes.



Abaque 8 : Détermination de V_{sh} à partir de I_{sh} .

6. LA RADIOACTIVITE PROVOQUEE

6.1. Introduction

Les diagraphies de cette nature sont toutes basées sur le principe de l'interaction entre une radioactivité incidente et les composants de la formation soumis au bombardement radioactif.

Envisageons tout d'abord ce qui se passe lorsque l'on bombarde la formation avec un faisceau de rayons gammas, c'est le **log gamma-gamma ou log densité**.

6.2. Le log gamma-gamma, log densité

6.2.1. Principe

On bombarde la formation par un faisceau de rayons gamma d'énergie constante (0.1 à 1 Mev).

Ces photons gammas entrent en collision avec les électrons de la matière (Fig. 6.1).

A chaque collision, l'énergie du faisceau incident est atténuée, cette atténuation peut se faire de trois façons : effet photoélectrique, effet Compton, effet de production de paire.

Dans les domaines d'énergie qui nous intéressent **l'effet Compton** est nettement prépondérant sur les deux autres modes d'atténuation.

Dans cette réaction, le photon incident perd une partie de son énergie pour éjecter un électron et continue sa trajectoire dans une autre direction sous forme d'un **photon diffusé**.

Cet effet est proportionnel au nombre d'électrons Z des éléments rencontrés.

A une certaine distance de la source, un détecteur permet de compter les rayons gammas.

Le nombre de photons diffusés retournant au détecteur dépendra du nombre d'électrons orbitaux présents et de l'énergie de la source.

La réponse de l'outil est donc déterminée essentiellement par la densité électronique (nombre d'électrons par cm^3) de la formation.

La densité électronique est pratiquement proportionnelle à la masse atomique.

En définitive il est donc justifié de considérer que la densité électronique que l'on mesure est proportionnelle à la densité de la formation, qui elle dépend de la densité de la matrice, de la porosité, de la densité des fluides remplissant les pores.

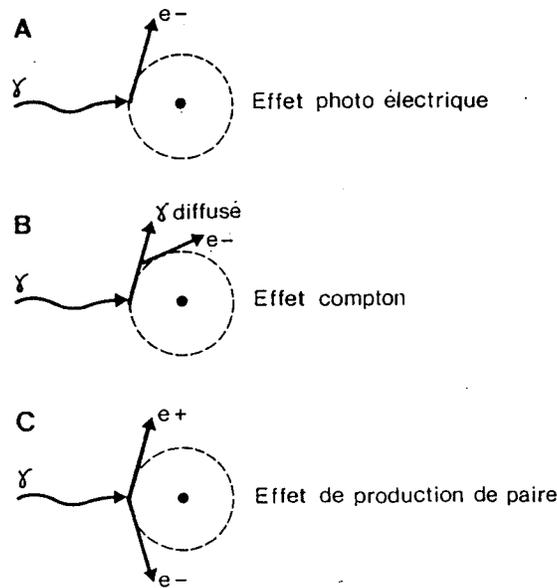


Figure 6.1 : Interaction corpusculaire.

6.2.2. La mesure

Le nombre de cps (coups par secondes) donné par l'outil dépend à la fois de la source, du récepteur et du spacing, et du diamètre du trou.

Les logs modernes sont directement enregistrés en gr/cm^3 .

A cette échelle en densité on peut faire correspondre une échelle de porosité.

Pour une porosité nulle, l'outil lira la densité de la matrice, plus la porosité augmente plus la densité diminue.

On admet comme densité de matrice ρ_{ma} :

- grès = 2.65 g/cm^3 ,
- calcaires = 2.71 g/cm^3 ,
- dolomie = 2.87 g/cm^3 ,
- argiles de 2.7 à 3 g/cm^3 .

La profondeur d'investigation est faible, l'outil **lit dans la zone lavée** avec un rayon d'investigation d'environ 15 cm. Les effets de trou vont donc être très importants c'est d'ailleurs pour pallier ces inconvénients que les outils densité sont le plus souvent excentrés et souvent fortement appuyés sur la paroi du trou.

6.2.3. La réponse de l'outil

Les facteurs qui peuvent provoquer des anomalies sur le gamma-gamma sont :

- le niveau de l'eau,

- un changement dans la densité du fluide,
- le mud cake,
- le tubage avec les raccords,
- le diamètre du trou (effet le plus important).

La profondeur d'investigation est faible, l'outil fait une mesure globale.

On peut écrire :

$$\rho_b = \phi \cdot \rho_f + (1 - \phi) \cdot \rho_{ma} \quad \text{et l'on obtient} \quad \phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f}$$

Cette relation est parfaitement physique et strictement vraie pour une matrice simple et un seul fluide, par exemple des grès saturés d'eau.

ρ_b = densité de la formation, ρ_f = densité des fluides, ρ_{ma} = densité de la matrice, ϕ = porosité.

6.2.4. Effet des argiles

Les argiles ont une grande porosité ϕ , et une densité de matrice qui varie entre 2.8 et 2.9 gr/cm³. La densité globale peut être très basse pour des argiles très peu compactées avec beaucoup d'eau, mais le minéral argileux étant relativement lourd, leur densité n'est pas significative, elle dépend beaucoup de la compaction.

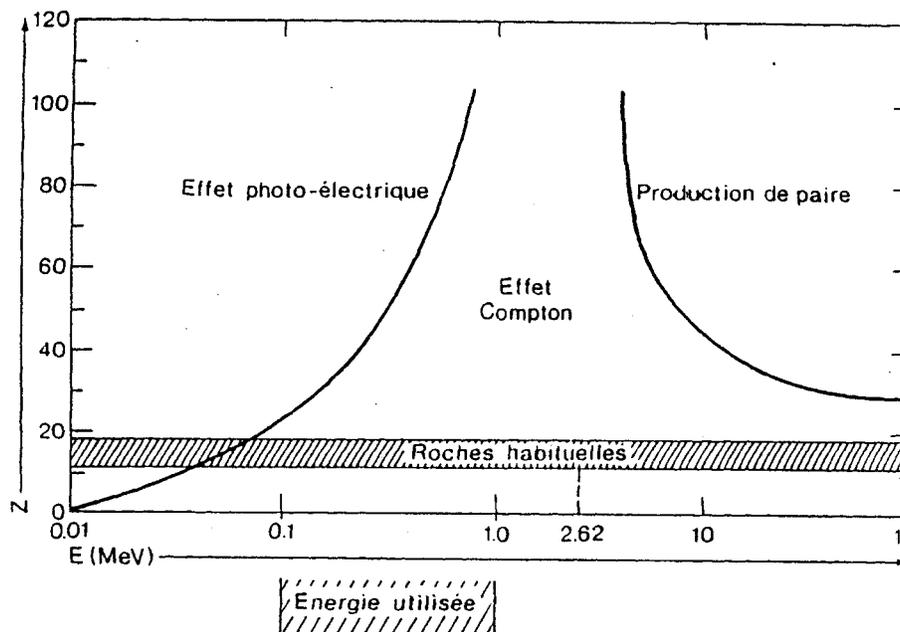


Figure 6.2 : Effet prédominant dans l'espace (Z, E).

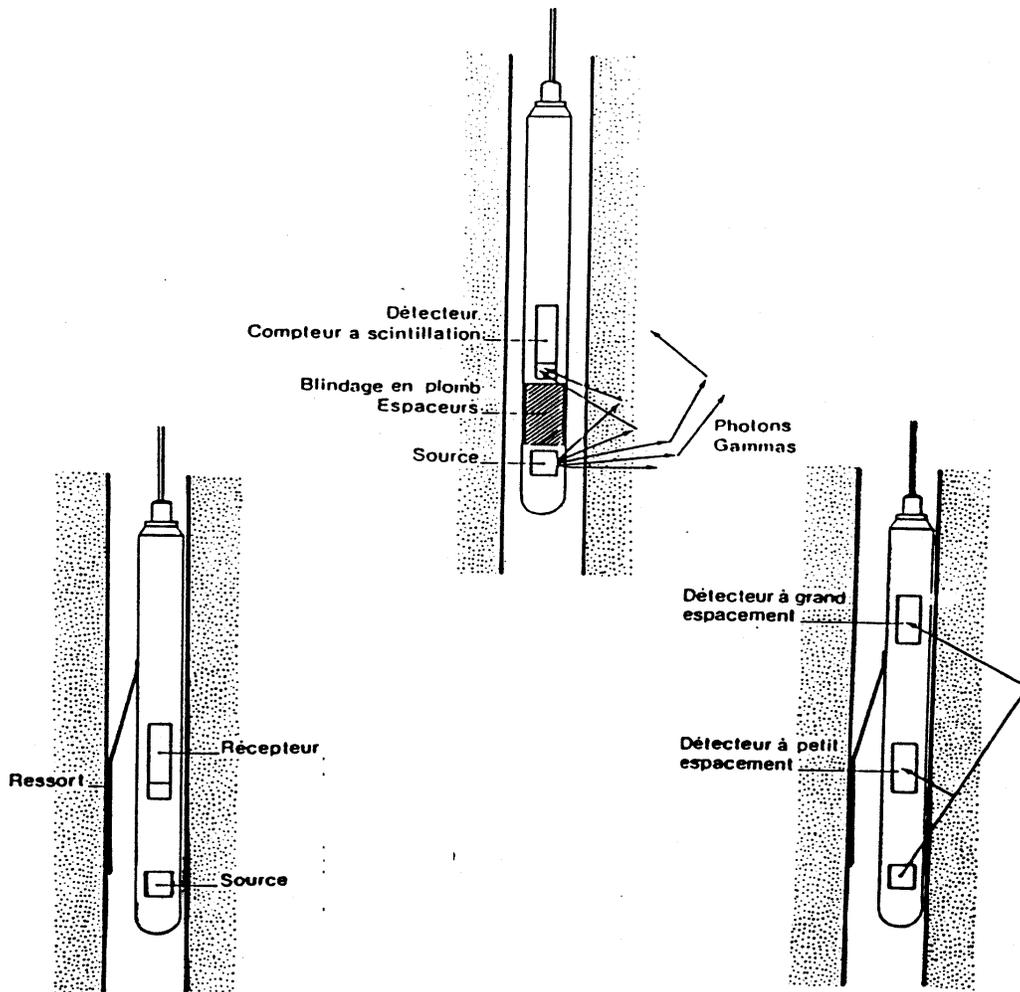


Figure 6.3 : Principe de fonctionnement des sondes nucléaires gamma-gamma.

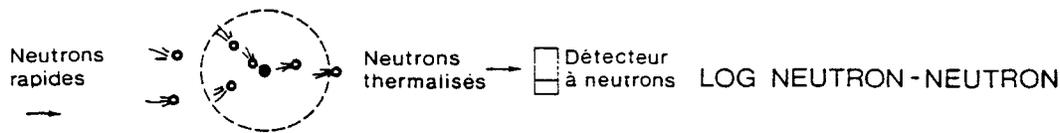
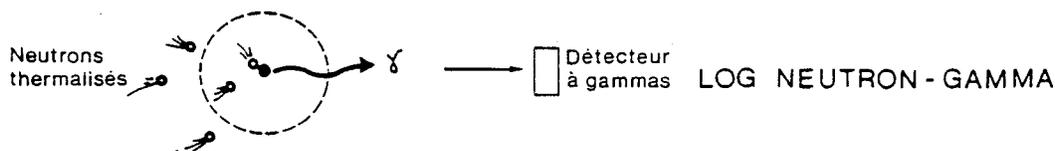
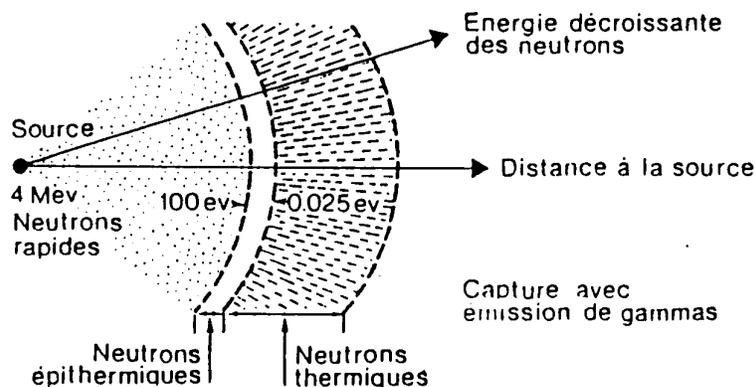
6.3. Le log neutron

6.3.1. Principe

On bombarde cette fois la formation par des neutrons rapides (Fig. 6.4).

Pendant leur migration dans la formation, ces neutrons sont soumis à deux effets consécutifs complémentaires :

- D'abord un ralentissement dû aux collisions avec les atomes constituant le milieu. Ralentissement qui sera d'autant plus marqué que l'atome rencontré aura une masse plus proche de celle du neutron, dans ce phénomène **les atomes d'hydrogène** se montrent les plus efficaces.
- Par ces collisions successives les neutrons vont perdre leur énergie, on dit qu'ils sont **thermalisés**, lorsque leur énergie sera plus faible que 0.025 eV ils pourront alors être capturés.

A Phase de ralentissement**B Phase de capture****Figure 6.4 : Interaction corpusculaire.****Figure 6.5 : Décroissance des neutrons.**

Cette **capture** s'accompagne d'une émission de **rayons gamma** qui est caractéristique de l'élément capteur. De ce point de vue **le chlore** est l'élément le plus actif (Fig 6.4 et 6.5).

6.3.2. La mesure

Il existe plusieurs types de logs neutrons selon que l'on compte le nombre de neutrons présents à différents niveaux d'énergie, ou les photons gamma émis par capture.

On parle de **neutron-neutron** ou de **neutron-gamma**.

Le plus souvent on utilise un **neutron-neutron**, c'est-à-dire un outil qui mesure les neutrons à leurs différents niveaux d'énergie. Cet outil va nous donner en première approximation une idée de la **concentration en atomes d'hydrogène**.

Le nombre de neutrons arrivant au détecteur augmente quand la concentration en hydrogène décroît et vice versa. Finalement on enregistre un **index d'hydrogène**.

L'huile ou l'eau contiennent pratiquement la même quantité d'hydrogène par unité de volume, la réponse du neutron donnera donc une idée de **la porosité** en face des formations propres et saturées.

Malheureusement, l'outil répond à tous les atomes d'hydrogène sans discrimination, il prendra donc aussi en compte l'hydrogène lié à la nature minéralogique de la formation.

En choisissant comme référence 100 % pour de l'eau douce et 0 % pour un calcaire compact ($\text{CaCO}_3 = 0$ hydrogène) on va obtenir une échelle variant de 0 à 100 qui dans un milieu poreux calcaire va représenter la porosité. On parlera d'un neutron calibré calcaire. Les outils utilisés pour l'eau sont rarement calibrés ainsi.

Le neutron lit dans **la zone lavée** et il donne une réponse globale.

Diverses corrections doivent être faites, pour le diamètre du trou, l'épaisseur du mud-cake, la densité de la boue, etc.

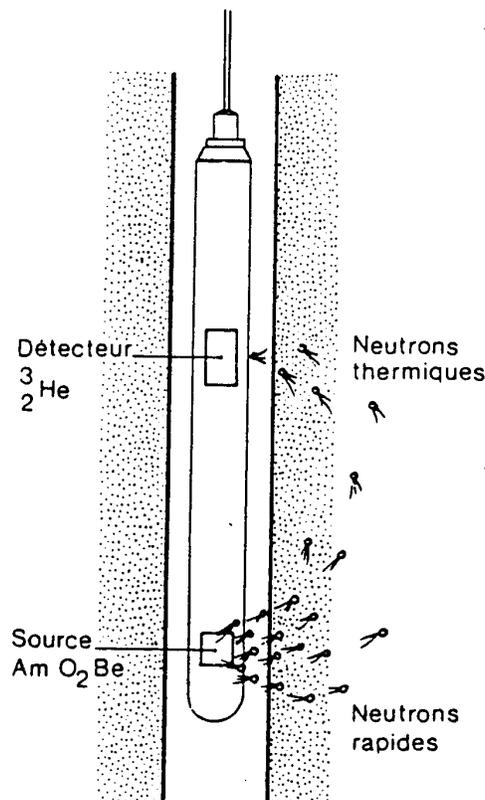


Figure 6.6 : Schéma de principe de la sonde neutron.

6.3.3. La réponse de l'outil

Le neutron lit chacun des éléments proportionnellement à leur quantité.

Si l'on veut obtenir des valeurs réelles de porosité, il faut pouvoir séparer les différents facteurs : lithologie, argiles, quantité et types d'hydrocarbures en présence.

D'autre part il est important de connaître les variations de diamètre du trou.

6.3.4. Effet des argiles

Les argiles contiennent en général beaucoup d'eau, on obtiendra par la même, une lecture élevée au neutron, ce qui sera l'indication d'une porosité beaucoup plus élevée que la porosité effective.

Le gaz ou l'air ont un index d'hydrogène très faible, le neutron va lire des valeurs très basses en face d'une zone poreuse à gaz ou air.

6.4. Calibrations

6.4.1. Saturation

$$\rho_b = (1 - \phi) \cdot \rho_{ma} + \phi \cdot \rho_f \cdot S_w$$

Lorsque le milieu n'est pas saturé, l'inconnue de saturation S_w apparaît, empêchant une détermination complète du milieu à l'aide des deux seules sondes neutron-neutron (porosité) et gamma-gamma (densité globale). Dans ce cas il faudra faire au moins une hypothèse sur l'une des trois variables (ρ , ϕ , ρ_m). L'hypothèse la plus couramment utilisée est celle sur la densité de matrice car elle dépend de la lithologie qui peut être déterminée grâce aux autres diagraphies.

6.4.2. Mesures sur carottes

L'outil gamma-gamma étant très sensible au diamètre du trou, la transformation des cps en g/cm³ devra tenir compte du diamètre du trou. Des essais sur carotte de densité et de porosité dans des forages tests permettent de calibrer les outils à l'aide de méthodes statistiques (Moindre carré) (Fig. 6.7) ou de réseaux de neurones (Fig. 6.8).

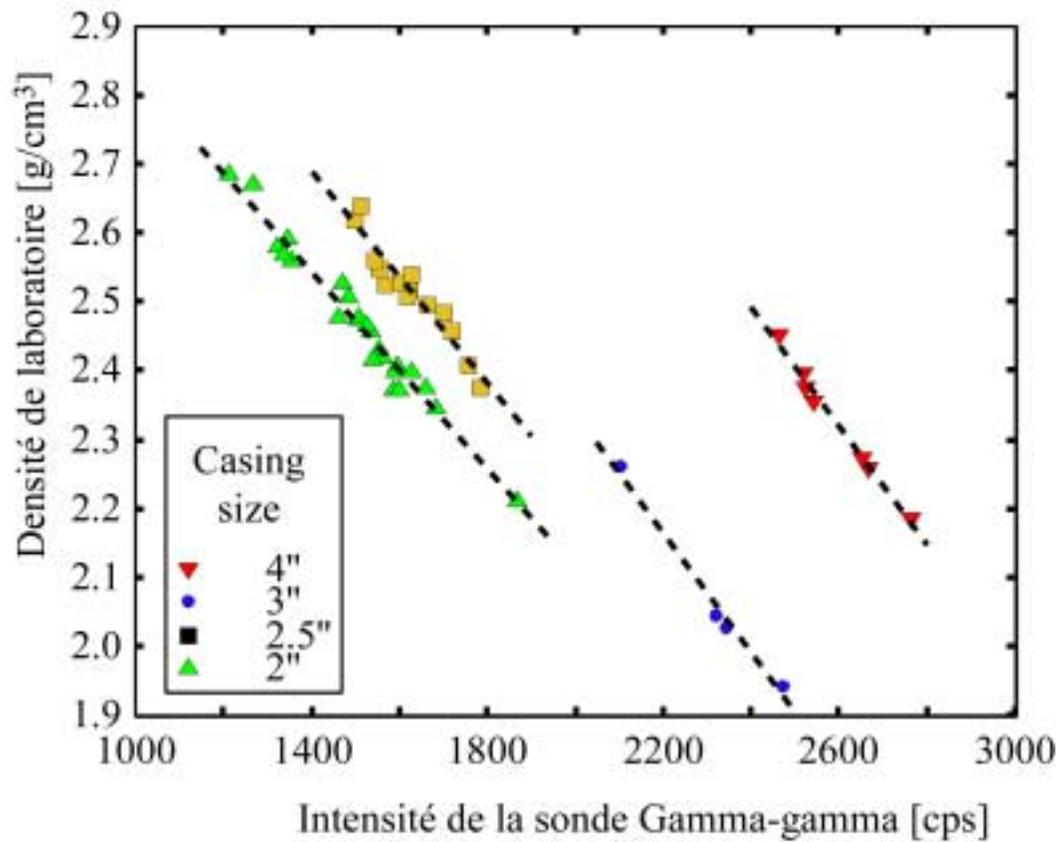


Figure 6.7 : Calibration de la sonde gamma-gamma à l'aide de mesures sur carottes.

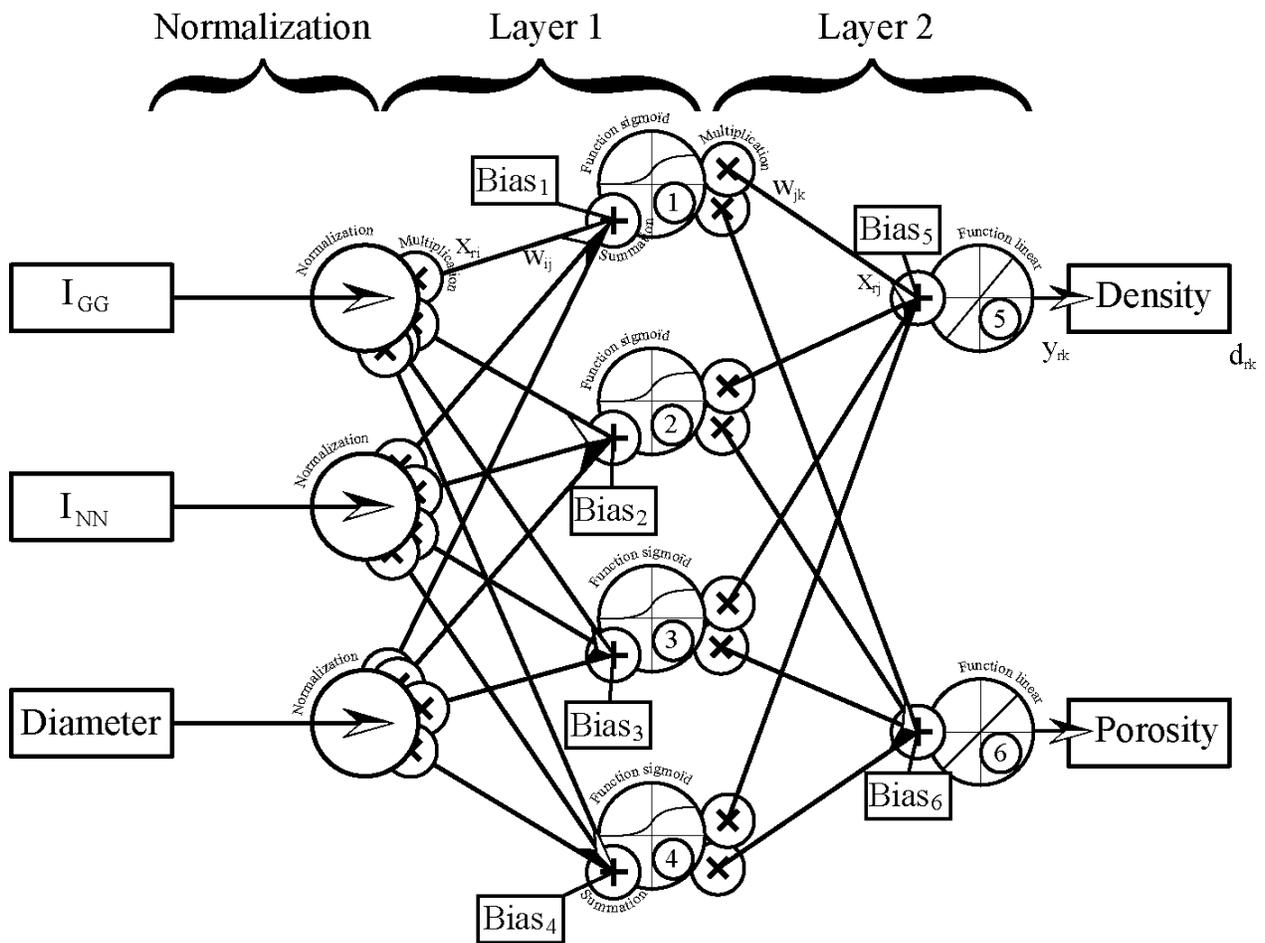


Figure 6.8 : Exemple de réseaux de neurones pour la détermination de la porosité et de la densité à l'aide des diagraphies nucléaires et du diamètre du trou.

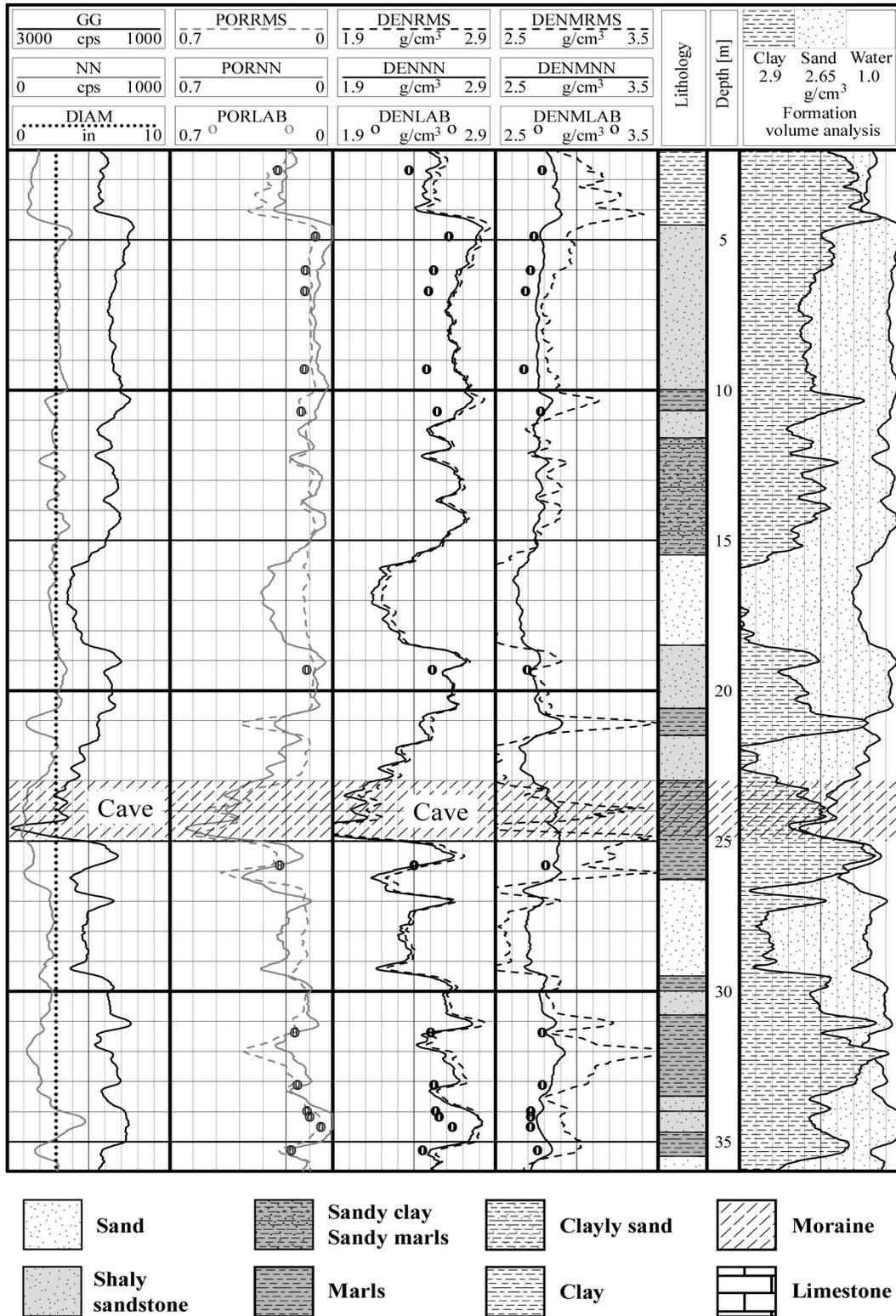
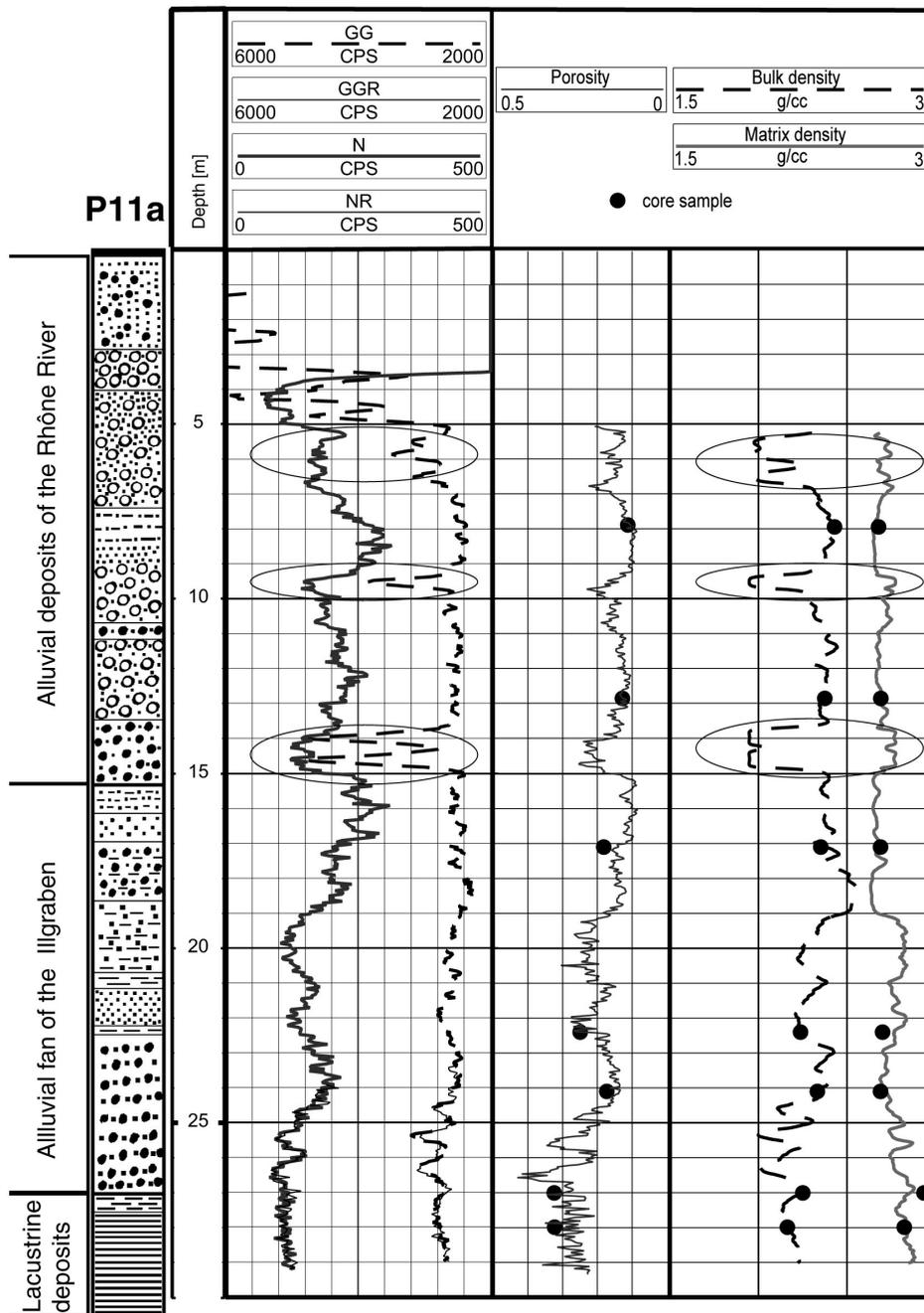


Figure 6.9 : Enregistrement de diagraphies nucléaires (GG=gamma-gamma, NN=neutron-neutron, DIAM=diametre du tubage, POR=porosité, DEN=densité, DENM=densité de matrice, RMS=moindre carré, NN=réseau de neurones, LAB=laboratoire).



GG : Gamma-Gamma (Mount Sopris - KLP - 2780)
 GGR : Gamma-Gamma Repeat section
 N : Neutron thermal-Neutron (Mount Sopris - LLP - 2676)
 NR : Neutron thermal-Neutron Repeat section

○ CAVE

Figure 6.10 : Exemple d'utilisation de diagraphies nucléaires.

Contenu en hydrogène des différentes substances (d'après O. Serra)

Substances	Nombre d'atomes d'hydrogène par cm ³ (*10 ²³)	Indice d'hydrogène
Eau pure		
60 °F, 14.7 psi	.669	1
200 °F, 7'000psi	.667	1
Eau salée		
60 °F, 14.7 psi	.614	.92
200 °F, 7'000psi	.602	.90
Charbon bitumineux		
.8424(C) .0555(H)	.442	.66
Carnallite	.442	.66
Limonite	.419	.63
Ciment	.334	.50
Kernite	.337	.50
Gypse	.325	.49
Kainite	.337	.46
Trona	.284	.42
Potasse	.282	.42
Anthracite	.268	.40
Kaolinite	.250	.37
Chlorite	.213	.32
Kieserite	.210	.31
Serpentinite	.192	.29
Nahcolite	.158	.24
Glaucanite	.127	.19
Montmorillonite	.115	.17
Polyhalite	.111	.17
Muscovite	.089	.13
Illite	.059	.09
Biotite	.041	.06

6.5. Travaux pratiques

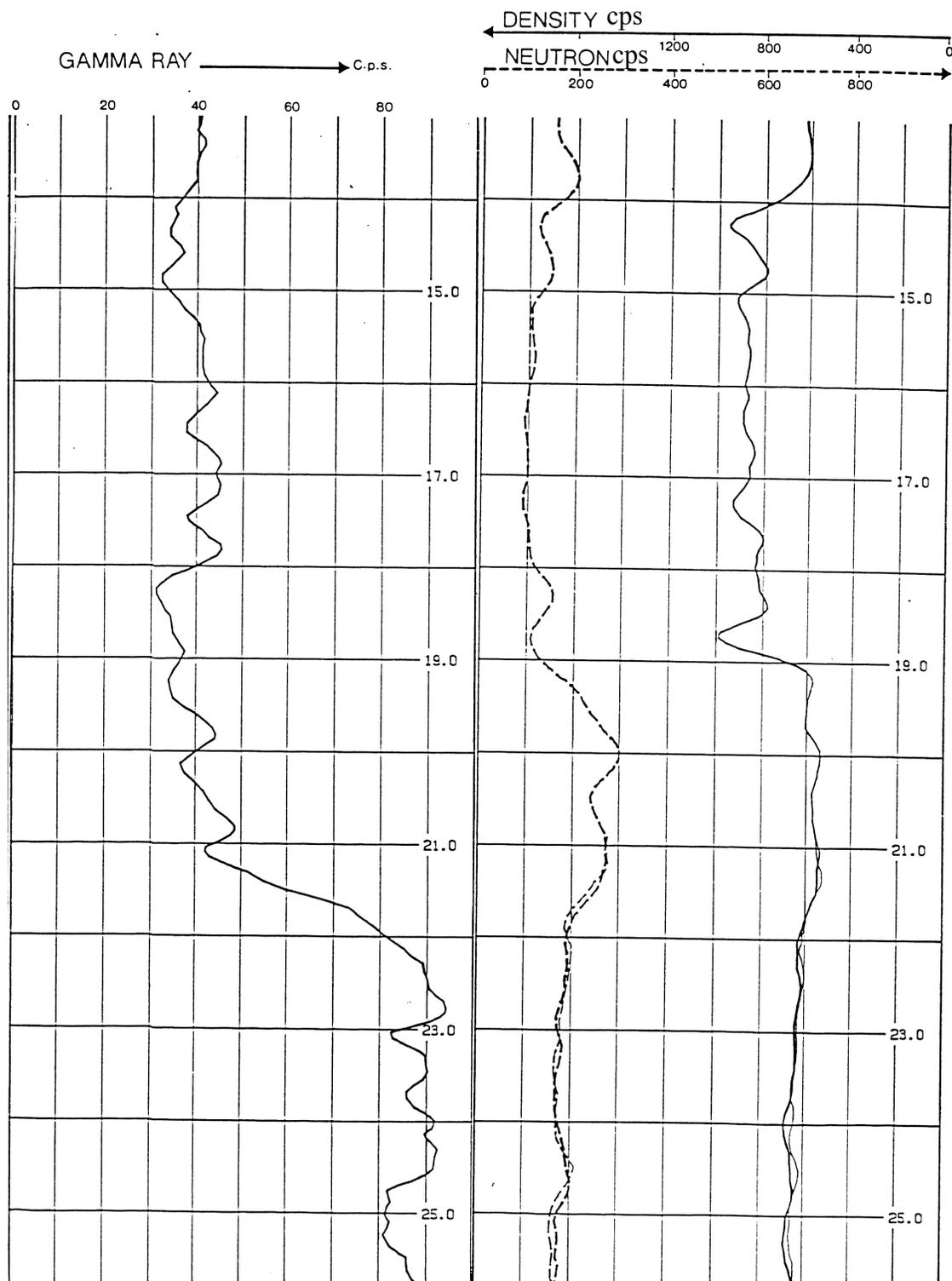


Figure 6.11 : Henniez, construire la coupe lithologique à l'aide de la Figure 6.12.

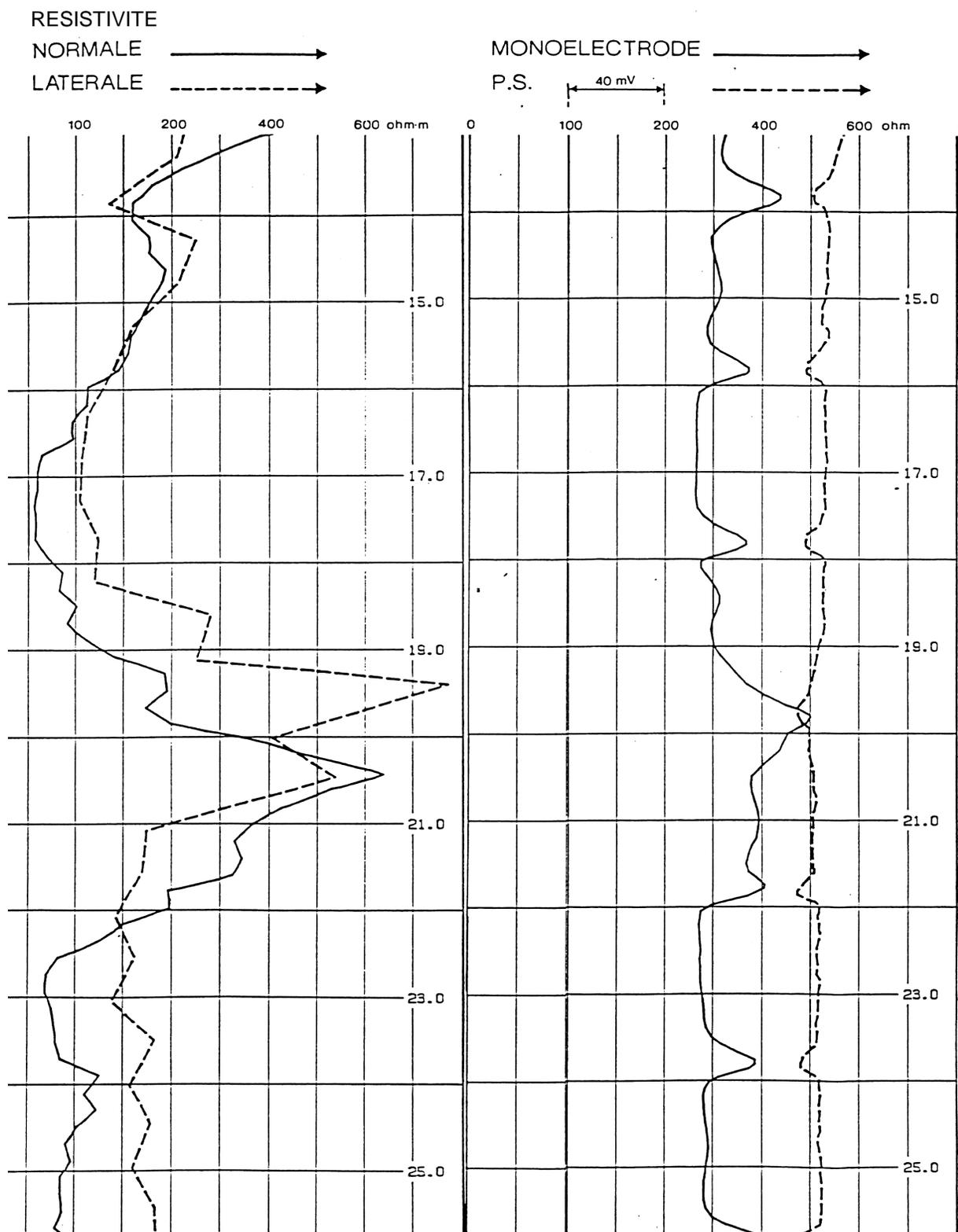


Figure 6.12 : Henniez, construire la coupe lithologique à l'aide de la Figure 6.11.

7. LE LOG SONIQUE

7.1. Introduction

Le log sonique est basé sur l'étude de la propagation dans les roches d'ondes acoustiques générées par l'outil de diagraphie.

La mesure de la vitesse de propagation de ces ondes et de leur atténuation apporte des renseignements sur les propriétés mécaniques des roches traversées. La propagation d'ondes acoustiques dépend en effet des propriétés élastiques des formations composant le sous-sol.

Le paramètre mesuré est **la vitesse de propagation des ondes P.**

7.2. Principe

Dans la pratique, le sonic log mesure le **temps de transit ΔT** entre deux récepteurs, d'ondes longitudinales envoyées dans la formation (Fig. 7.1).

Souvent le système utilisé comporte deux émetteurs et deux récepteurs couplés, ceci pour pouvoir corriger les décalages dans les temps de parcours, les effets de cave et le décentrement de l'outil.

Le temps de transit ΔT entre les deux récepteurs se mesure en μ secondes par pied, μ s/pied.

Le ΔT est enregistré en échelle linéaire.

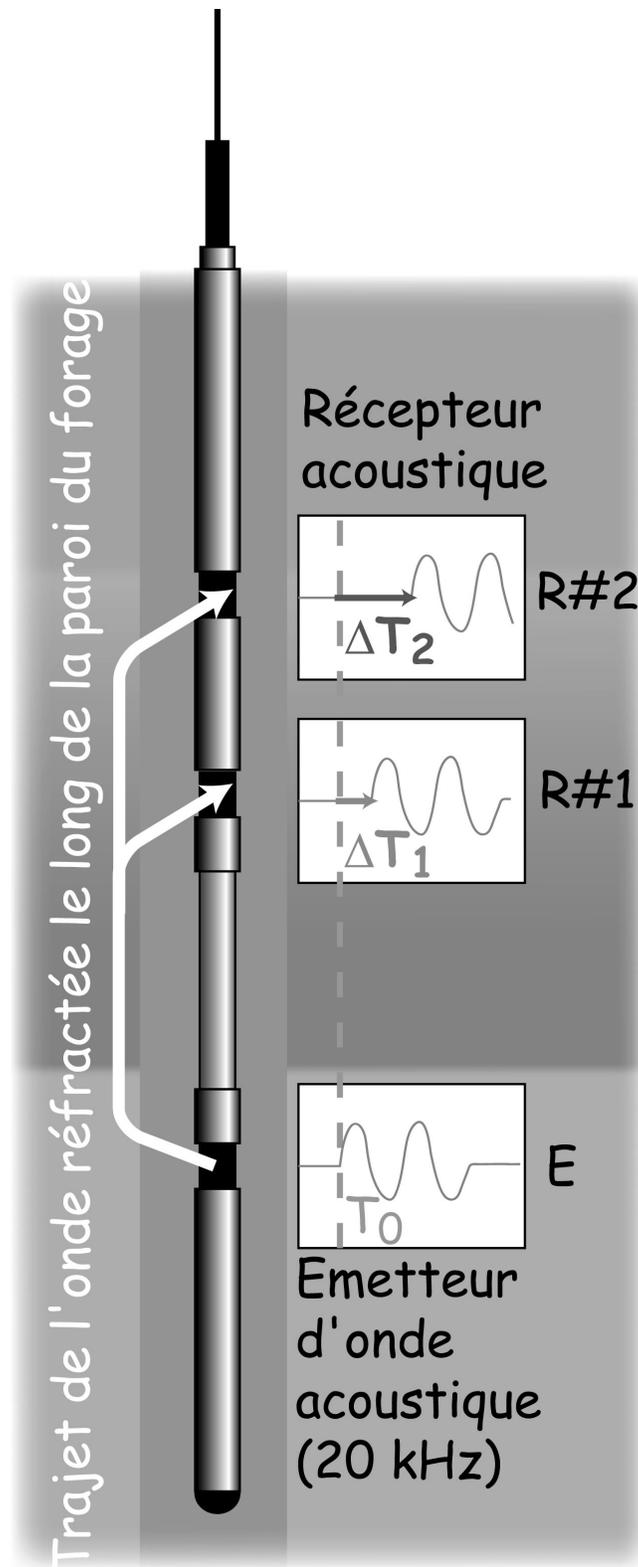


Figure 7.1 : Principe de fonctionnement de la sonde sonique.

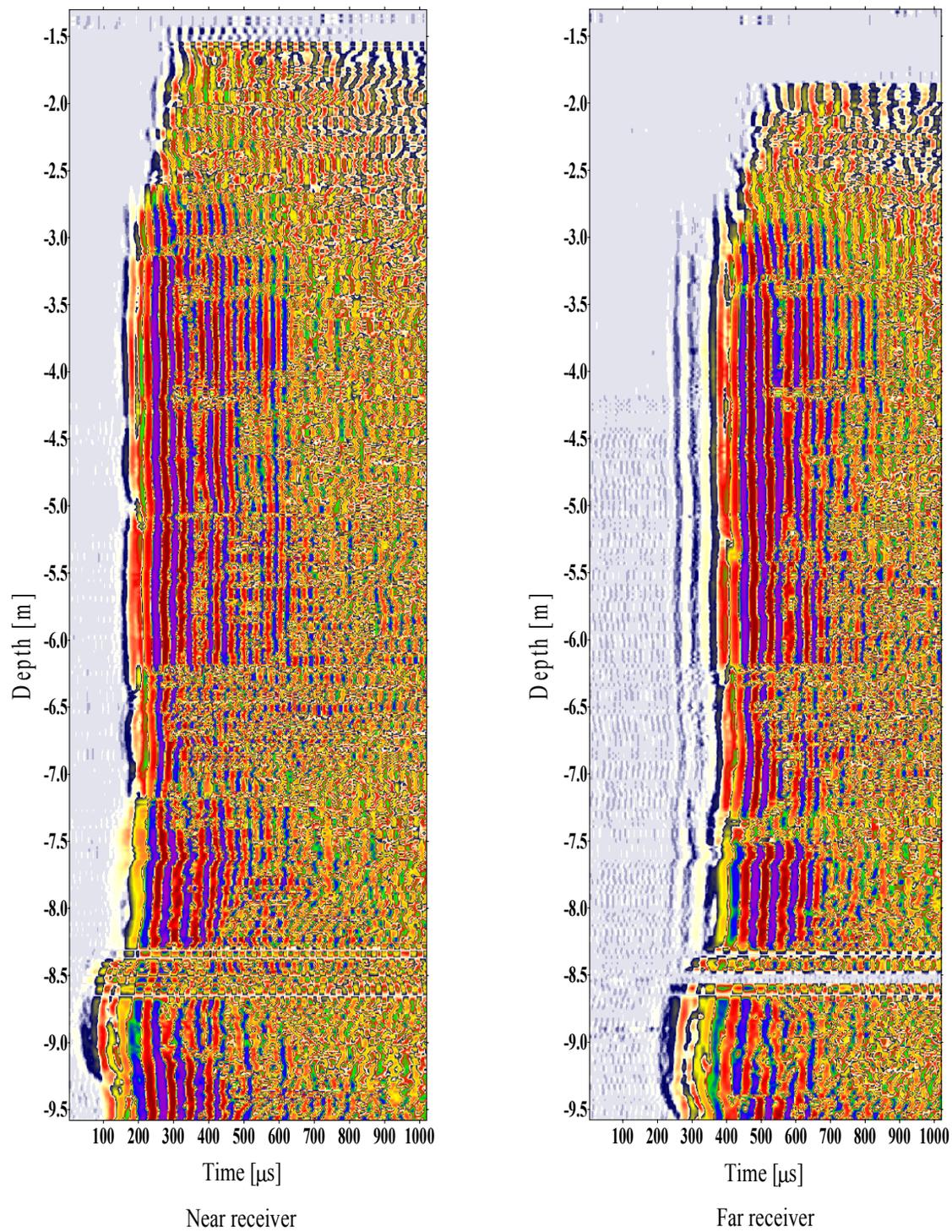


Figure 7.2 : Enregistrement de diagraphies soniques.

Near Receiver : Récepteur proche, sonde Mount Sopris (Halle Fosse, non tubé, Aout 1998).

Far Receiver : Récepteur lointain, sonde Mount Sopris (Halle Fosse, non tubé, Aout 1998).

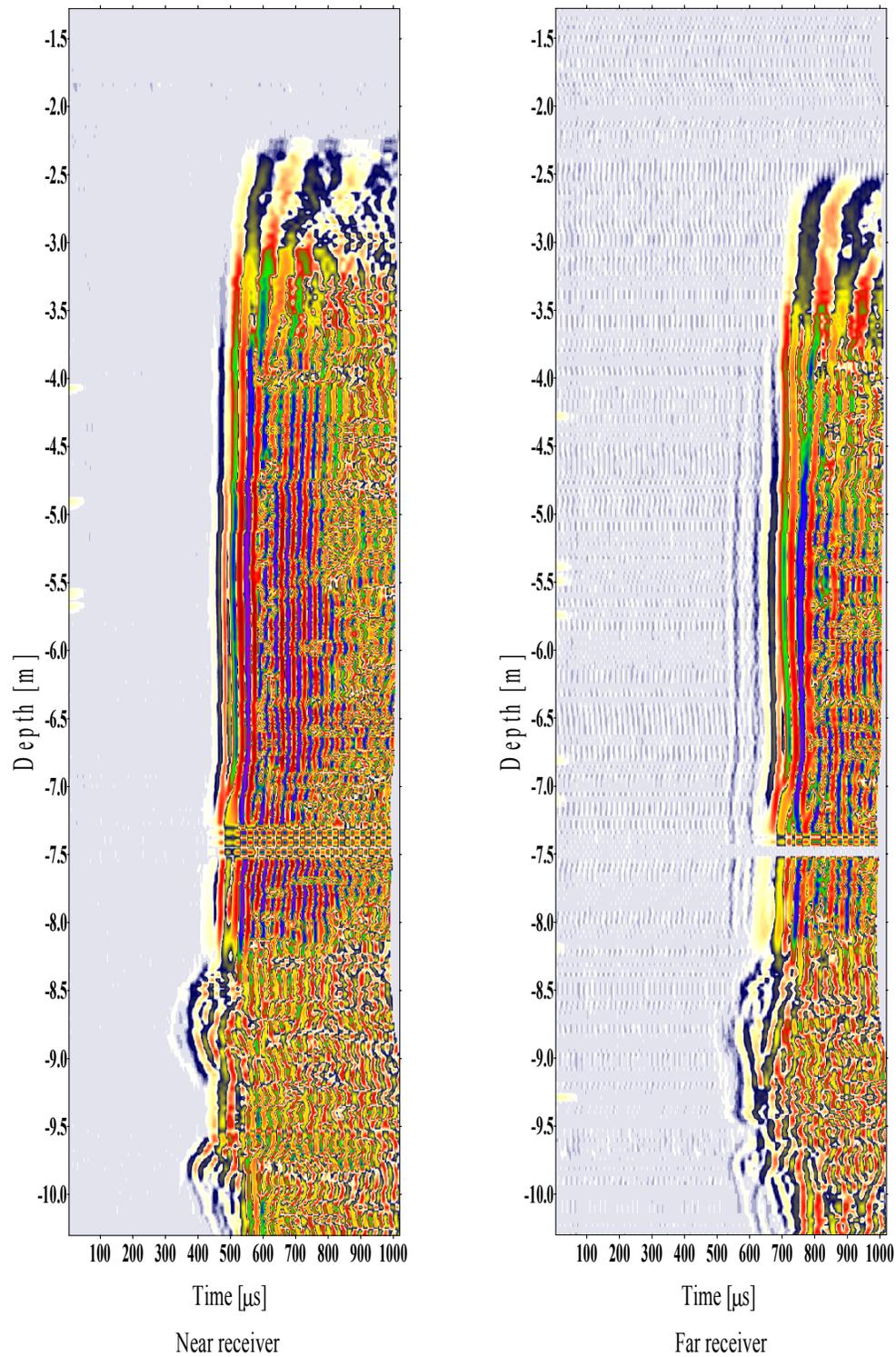


Figure 7.3 : Enregistrement de diagraphies soniques.

Near Receiver : Récepteur proche, sonde Mount Sopris (Halle Fosse, tubé, Aout 1998).

Far Receiver : Récepteur lointain, sonde Mount Sopris (Halle Fosse, tubé, Aout 1998).

7.3. La mesure

La profondeur d'investigation du sonic n'est pas très élevée, c'est un outil qui mesure **dans la zone lavée**.

Le temps de parcours mesuré sera la moyenne globale des temps de parcours dans la roche et dans le fluide.

$$\Delta t = \phi \cdot \Delta t_f + (1 - \phi) \Delta t_{ma} \quad \text{et} \quad \phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}$$

Formule de Wyllie

Δt = lecture du sonic, Δt_{ma} = temps de transit dans la matrice, Δt_f = temps de transit dans le fluide.

Cette formule est expérimentale et n'est valable que pour des formations propres et consolidées.

Dans les formations non consolidées ou les sables non compactés, la formule de Wyllie donne des porosités trop élevées.

Le skipping

Parfois, la première arrivée, bien qu'assez forte pour arriver au premier récepteur, peut devenir trop faible quand elle arrive au deuxième récepteur, celui-ci peut alors être excité par une arrivée trop tardive. Le temps de transit sera alors trop grand, c'est le phénomène de skipping. Le log montre un décrochement abrupt vers les hautes valeurs (Fig. 7.4).

Le skipping peut être très important quand le signal est très atténué par des formations non consolidées, comme par exemple : des zones fracturées, la présence de gaz, etc.

7.4. Perturbations

Les effets de trou sont négligeables avec les outils modernes bien calibrés.

En présence d'air, l'atténuation est maximum car la transmission se fait mal, le skipping est fréquent.

Les fractures sont des discontinuités avec passage dans des fluides, l'atténuation est forte et il se produit fréquemment du skipping.

En présence d'argiles laminées dans des sables, les valeurs de porosité lues par le sonic seront trop élevées, $\Delta t_{\text{argile}} > \Delta t_{\text{sable}}$.

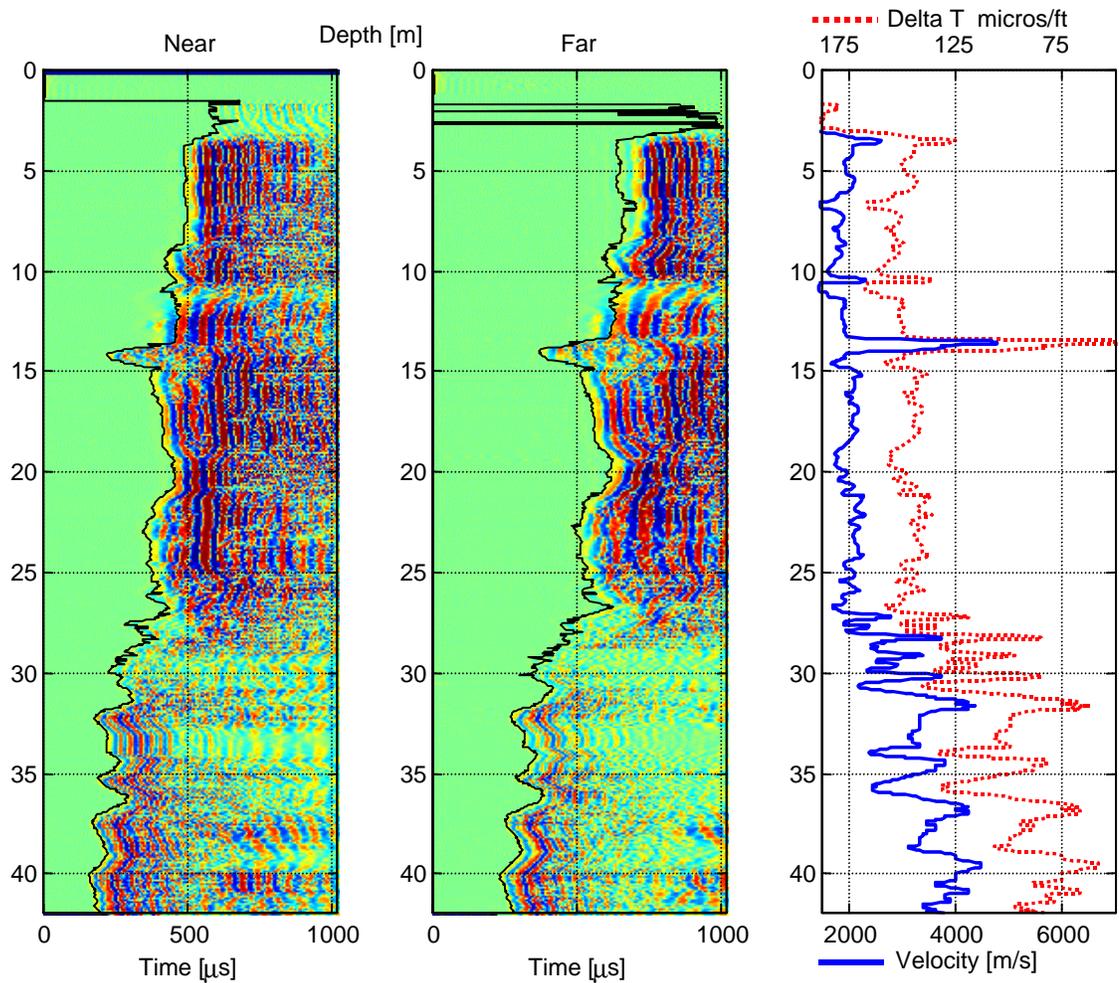


Figure 7.4 : Diagraphies acoustiques sur le forage Halle Fosse 2 et détermination de la vitesse des ondes P. Skipping de 28 à 30 m.

En présence de porosité secondaire (porosité vacuolaire et porosité de fracture) la vitesse du son dépendant principalement de la porosité primaire, la porosité obtenue par le sonic sera trop faible.

Dans ce cas l'utilisation du neutron ou du densité log nous donnera un ordre de grandeur de la porosité totale, et par soustraction avec la porosité sonique on aura une idée de la porosité secondaire.

7.5. Modules d'élasticité

Il est possible d'évaluer les modules d'élasticité des roches à l'aide des formules suivantes :

$G = \rho \cdot V_s^2$ pour le module de cisaillement, V_s étant la vitesse des ondes de cisaillement.

$$K = \rho \cdot \left(V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right) \text{ pour le module de d'élasticité.}$$

Ces paramètres sont essentiellement utilisés par la géotechnique et la sismique (Fig. 7.5).

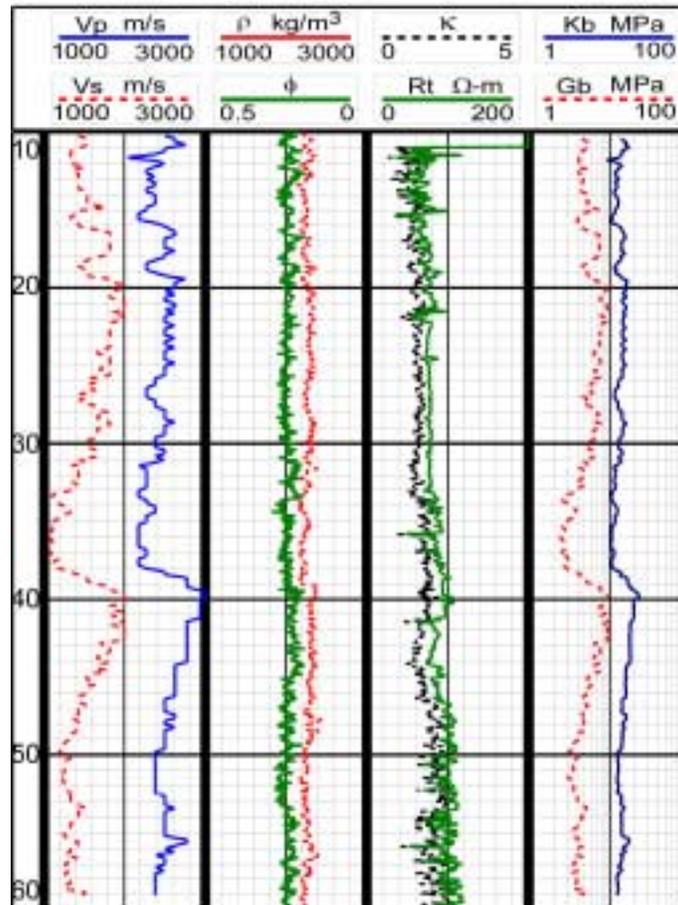


Figure 7.5 : Calcul des modules d'élasticité en roches à l'aide des vitesses acoustiques.

7.6. Cimentation

Les zones de mauvaises cimentation entre le casing et la formation peuvent être déterminées à l'aide de l'outil sonique. Trois effets majeurs seront visible :

- Augmentation de l'amplitude de première arrivé de l'onde acoustique aux récepteurs,
- Diminution du temps d'arrivé sur chacun des récepteurs,
- Vitesse calculées à l'aide du ΔT proche de la vitesse de l'acier dans le cas d'un tubage en acier.

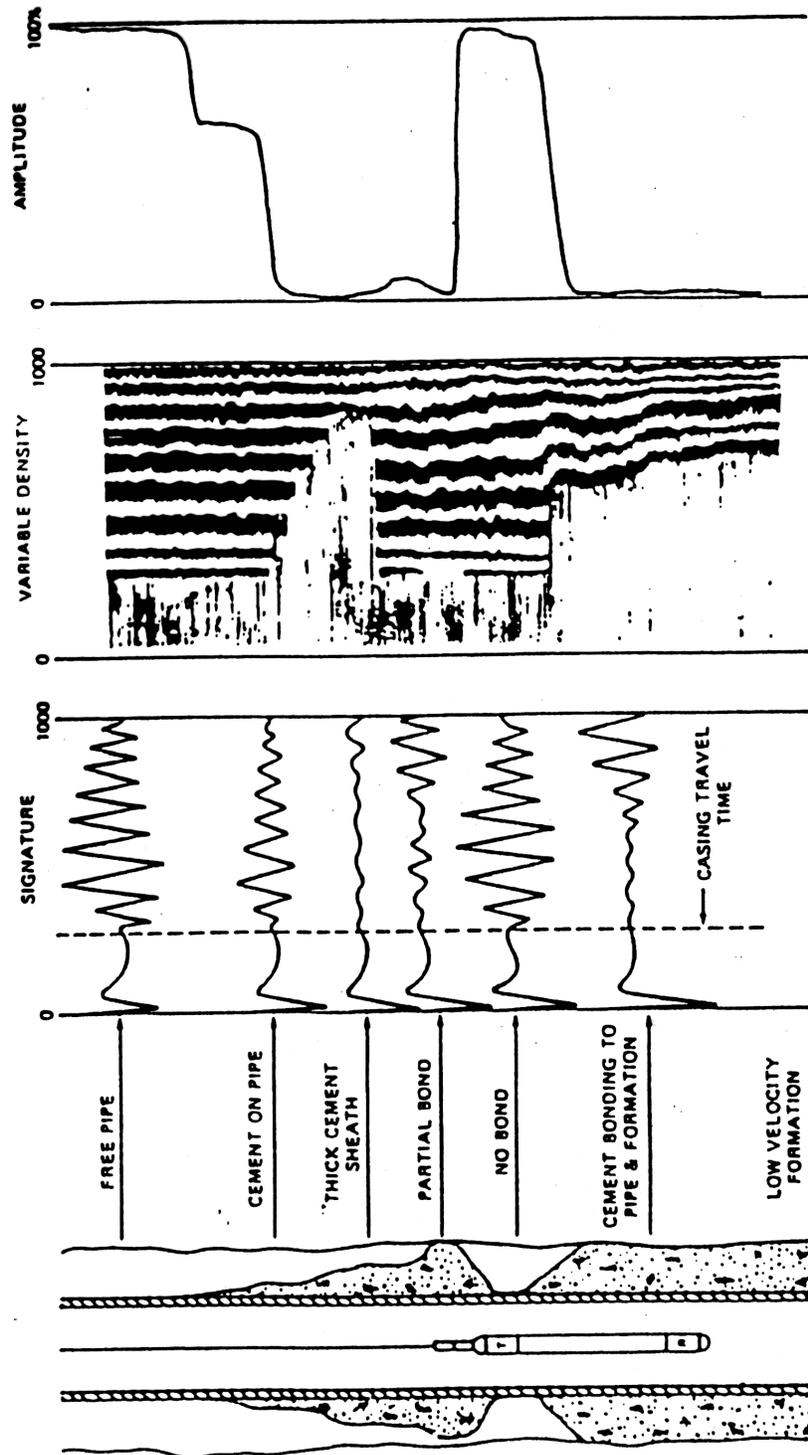


Figure 7.6 : Comparaison entre les amplitudes de premières arrivées, le full wave sonic, et la cimentation.

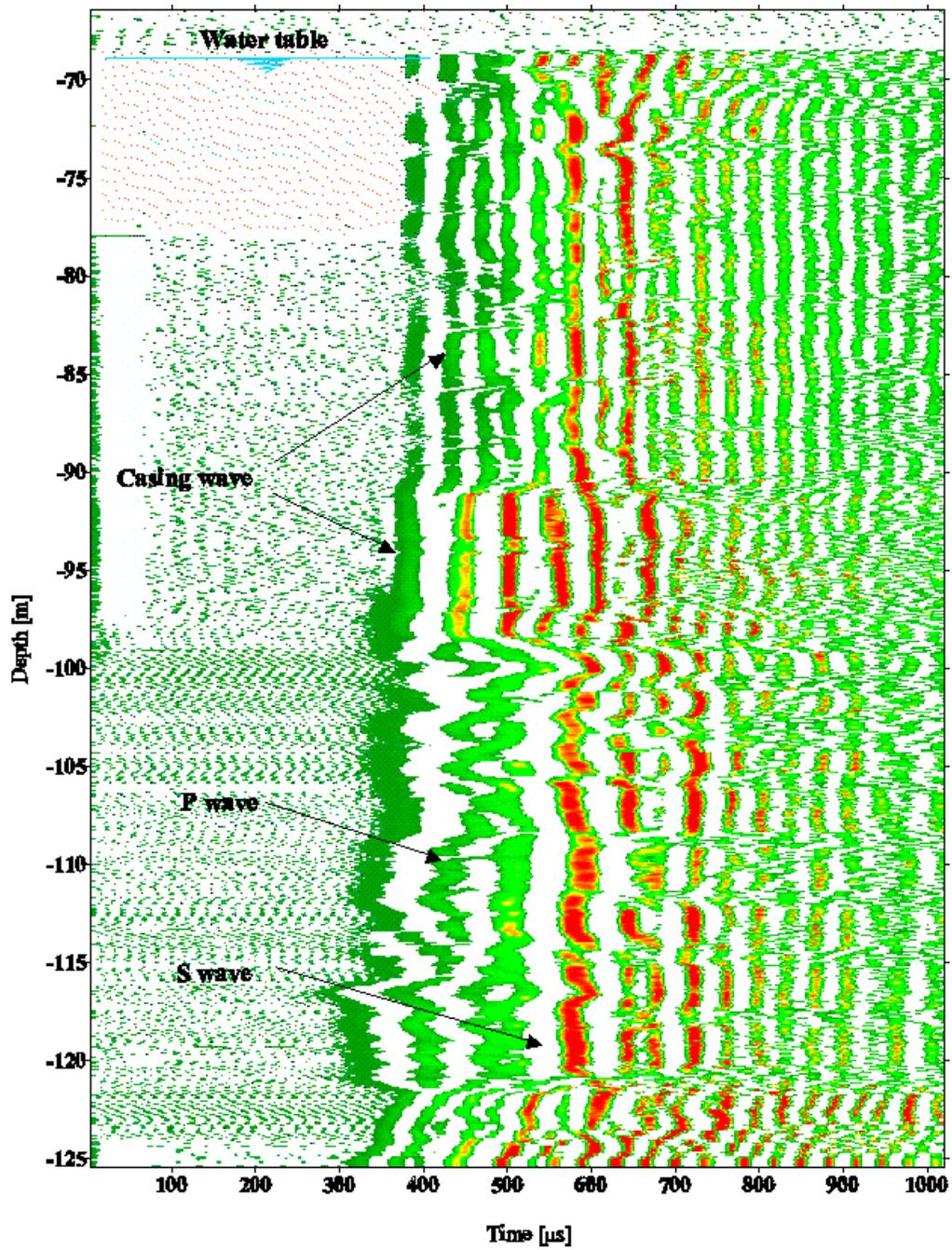


Figure 7.7 : Log de cimentation. Une mauvaise cimentation est visible de 91 à 97 m.

8. AUTRES DIAGRAPHIES

8.1. Résistivité du fluide

Enfin la qualité du fluide utilisé pour le forage joue un rôle primordial, que ce soit de la boue ou de l'eau, les qualités de ce fluide doivent être contrôlées soigneusement. **C'est le log de résistivité du fluide.** Cette diagraphie permet de mettre en évidence des venues ou des pertes d'eau ce qui apporte des renseignements sur les circulations dans les aquifères (Fig. 8.1, 8.2, 8.3 et 8.5).

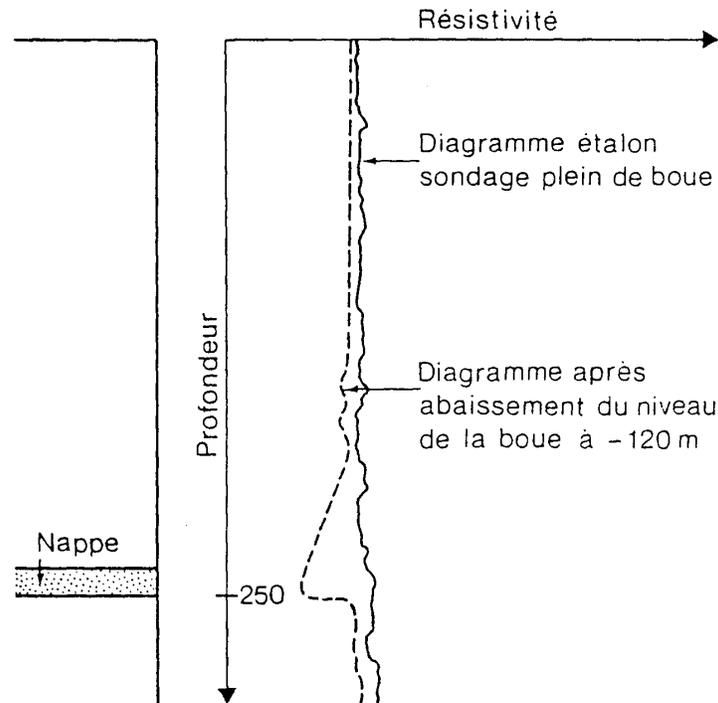


Figure 8.1 : Exemple d'utilisation de la diagraphie résistivité du fluide.

