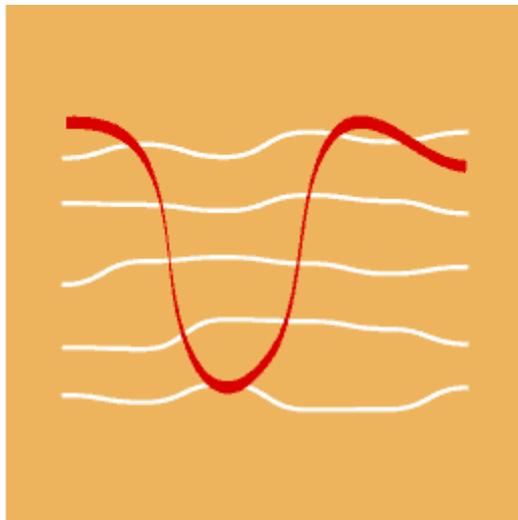


PROSPECTION ELECTRIQUE DE SURFACE



Cours online de géophysique

Université de Lausanne · Institut Français du Pétrole

Professeur
D. Chapellier

Table des matières

<i>Chapitre 1</i>	<i>1</i>
INTRODUCTION	1
1.1 Buts du cours	1
1.2 Objectifs	1
1.3 Qu'est-ce que la géophysique ?	1
1.4 Anomalie et choix des méthodes	2
1.5 Les propriétés physiques des divers matériaux	3
<i>Chapitre 2</i>	<i>8</i>
2.1 Introduction	8
2.2 La conductibilité électrique des roches	9
2.2.1	La conductibilité solide 9
2.2.2	La conductibilité liquide électrolytique: 10
2.2.2.1	La qualité de l'électrolyte 10
2.2.2.2	La salinité 10
2.2.2.3	La température 16
2.2.2.4	La quantité d'électrolyte 16
b) La porosité efficace ou effective \varnothing_e	17
2.3 La loi d'Archie	19
2.3.1	Cas d'une roche saturée 19
2.3.2	Influence de la température 20
2.3.3	La saturation 20
2.4 La perméabilité	21
<i>Chapitre 3</i>	<i>27</i>
LES METHODES ELECTRIQUES PAR COURANT CONTINU	27
3.1 Introduction	27
3.1.1	Les filets de courant et les équipotentielles 28
3.1.2	Potentiel et champ entre A et B 28
3.1.2.1	Terrain homogène 28
3.1.2.2	Répartition du potentiel - Principe de superposition 30
3.1.2.3	Répartition du courant 31
3.1.2.4	Principe de réciprocité 32
3.1.2.5	Terrain hétérogène 32
3.2 Les méthodes de prospection	43
3.2.1	Les cartes de potentiel 43
3.2.1.1	Hétérogénéité locales 43
3.2.1.2	Hétérogénéités étendues - faille : 43
3.2.1.3	Influence du relief : 44
3.2.2	La mise à la masse 44
<i>Chapitre 4</i>	<i>51</i>
LES PROFILS ET LES CARTES DE RESISTIVITE	51
4.1 Introduction	51
4.2 Principe de mesure - Mise en oeuvre	52
4.2.1	La source de courant: 52
4.2.2	Les électrodes d'émission: 52
4.2.3	Le circuit de courant 53
4.2.4	Les électrodes de mesure de potentiel M et N 53

4.3	Le calcul de la résistivité	55
4.4	Les dispositifs utilisés	56
4.4.1	Les dipôles ou pôle - pôle	56
4.4.2	Les tripôles ou pôle - dipôle	56
4.4.3	Les quadripôles	57
4.4.4	Les multipôles	58
4.4.5	Le traîné multiple	58
4.4.6	Le dispositif rectangle	60
4.4.7	Le dispositif carré	60
4.5	Espacement des mesures	61
4.6	La sensibilité des dispositifs.	61
4.7	La représentation des résultats	63
4.8	Effets des différentes structures	64
4.8.1	Effet d'une conduite enterrée (Figure 4-35)	64
4.8.2	Effet d'un contact vertical (Figure 4-36)	64
4.8.3	Effet de couches minces (Figures 4-37, 4-38)	64
4.8.4	Effet de couches minces (Figures 4-39, 4-40)	64
4.9	Interprétation des profils de résistivité	71
4.10	Les panneaux électriques	75
	<i>Chapitre 5</i>	76
	LES SONDAGES ELECTRIQUES	76
5.1	Introduction	76
5.2	Les dispositifs	80
5.3	La représentation des résultats	80
5.4	Interprétation des sondages électriques	82
5.4.1	Les paramètres géoélectriques	82
5.4.2	Les différents types de sondages électriques.	83
5.4.2.1	Milieu homogène et isotrope	83
5.4.2.2	Milieu à deux couches	84
	<i>Chapitre 6</i>	87
	LES SONDAGES A PLUSIEURS COUCHES	87
6.1	Les sondages à trois couches	87
6.2	Le principe d'équivalence	88
6.3	Le principe de suppression	91
6.4	Les sondages électriques isolés	91
6.5	Etalonnage des sondages électriques	91
	<i>Chapitre 7</i>	95
	LES DIFFERENTES ETAPES D'UNE PROSPECTION ELECTRIQUE	95
7.1	Première phase: Sondages électriques paramétriques	95
7.2	Deuxième phase: Les cartes de résistivités	95
7.3	Troisième phase: Sondages électriques et pseudo-sections	95
7.3.1	Les sondages électriques INTERPRETATIFS	95
7.3.2	Les pseudos sections	95
7.4	Quatrième phase: Interprétation, intégration des données, rapport et recommandations.	96
	<i>Bibliographie :</i>	97

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Buts du cours

Montrer les possibilités et l'utilité de la géophysique pour résoudre les problèmes qui se posent en génie civil et en environnement.

1.2 Objectifs

- Comprendre les relations entre les problèmes pratiques rencontrés et les phénomènes physiques mesurables associés.
- Connaître les techniques modernes de prospection et comprendre les principes qui animent ces techniques.
- Pouvoir analyser un problème et décider de la ou les meilleures techniques géophysiques à adopter
 - Développer le sens critique pour juger des travaux accomplis.
 - Pouvoir analyser et interpréter les résultats des levés effectués.

1.3 Qu'est-ce que la géophysique ?

L'Institut de géophysique fait partie de l'Université de Lausanne, section Sciences de la Terre. Sous cet épithète sont regroupées:

- La minéralogie : étude des roches et des minéraux qui les composent
- La géologie: étude de la structure et de l'évolution de l'écorce terrestre
- La géophysique : étude du sous-sol par le truchement de ses propriétés physiques.

Le géologue, par exemple, utilise l'observation directe et visuelle, il examine les roches qui affleurent, prélève des échantillons, les étudie et en déduit l'architecture du sous-sol. Le géophysicien lui aussi va essayer de déterminer l'architecture du sous-sol caché en mesurant certaines propriétés physiques à partir de la surface. Il existe de nombreuses méthodes géophysiques, chacune fournit des indications sur la nature du sous-sol par le biais de l'étude de la variation d'un paramètre physique. La géophysique est donc essentiellement la mesure de **contrastes** dans les propriétés physiques de matériaux constituant le sous-sol et la

tentative de déduire la nature et la distribution de ces matériaux responsables de ces observations.

1.4 Anomalie et choix des méthodes

Les variations des propriétés physiques doivent être suffisamment importantes pour que leurs effets puissent être mesurés par les instruments disponibles sur le marché. Ainsi quelque soit le type de structure recherchée et quelle que soit la méthode employée, il s'agit de mettre en évidence des structures **anormales**. C'est à dire des structures différant du milieu environnant par l'une ou l'autre de leurs caractéristiques physiques. Une **anomalie** ne peut être définie que par rapport à une **norme**. La première question que se pose le géophysicien est donc: La structure géologique peut elle provoquer une anomalie par rapport à la norme qui est son environnement. Le **contraste** est-il suffisamment important pour provoquer une anomalie mesurable. Cette notion conduit tout naturellement au problème du choix des méthodes. La meilleure méthode est celle qui fournit :

- **Une norme aussi stable que possible**
- **Une anomalie bien marquée**

Il est important d'avoir plusieurs méthodes à disposition pour pouvoir faire des essais comparatifs. D'autre part les différentes méthodes géophysiques sont souvent complémentaires et il est généralement très utile d'en employer plusieurs conjointement. La qualité du contraste entre l'anomalie et la norme varie aussi avec:

- **La nature des structures**
- **La nature du terrain environnant**
- **La méthode employée**

Le choix de la méthode la mieux adaptée dépend en définitive de:

- La nature des structures enfouies et leur possibilité de provoquer une anomalie sur la ou les grandeurs mesurées , donc l'existence d'un contraste entre la structure et son environnement.
- Le but des travaux de prospection et la superficie de l'aire à explorer. Il est évident que les méthodes employées ne seront pas les mêmes pour une campagne de reconnaissance générale ou pour une étude de détail portant sur un problème spécifique.
- La précision demandée. Chaque méthode et chaque technique mise en oeuvre se caractérise par un certain pouvoir de résolution. Parfois la limite de résolution peut être augmentée mais en accroissant le coût assez considérablement.

Il importe donc avant de faire intervenir une prospection géophysique dans l'étude de son projet que le maître d'œuvre essaie d'en évaluer les chances de réussites, il doit donc avoir

son objectif bien en tête et le définir aussi explicitement que possible. Il doit bien savoir ce qui peut être accompli et qui ne le peut pas, savoir ce qui est important et ce qui n'est pas essentiel. En définitive, le choix d'une méthode géophysique et du programme technique ne peut être établi qu'après examen du problème posé, des données géologiques et des conditions d'environnement. Ce choix conduit à retenir le ou les paramètres physiques susceptibles de présenter un contraste suffisant pour répondre à l'objectif.

1.5 Les propriétés physiques des divers matériaux

Pour un géophysicien une roche est constituée de:

LA MATRICE

partie solide constituée par les minéraux possédant chacun leurs propriétés physiques propres: densité, vitesse, résistivité, susceptibilité, etc...

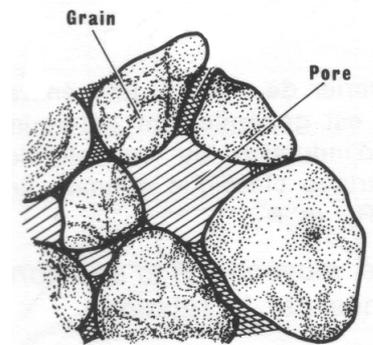
+

LA POROSITE

Volume des vides en %

+

LES FLUIDES



Ce qui remplit plus ou moins des vides: eau plus ou moins salée, hydrocarbures, gaz, air, des polluants, etc.. chacun de ces fluides a des paramètres physiques qui lui sont propres.

Les paramètres physiques des constituants vont conditionner:

LES PARAMETRES PHYSIQUES DE LA ROCHE

En définitive les paramètres physiques de la roche dépendront des pourcentages des divers constituants. Ainsi pour le paramètre densité par exemple nous pouvons écrire:

$$d_b = (1 - \phi)d_{ma} + d_f\phi$$

Avec : d_b = densité de la roche, d_{ma} = densité de la matrice, d_f = densité du fluide contenu dans les pores, ϕ = porosité en %.

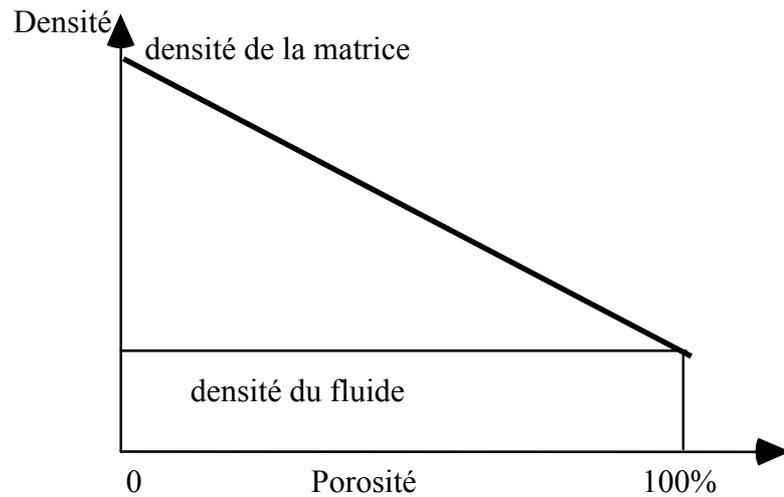


Figure 1-1 Densité versus porosité

Propriétés physiques	Magnétisme	Gravimétrie	Electromag.	Résistivités	Radar	Sismique
Succeptibilité k	P		S		S	
Densité d		P				S
Résistivité ohm.m			P	P	S	
Permittivité e			S		P	
Vitesse v						P

Figure 1-2 Propriétés physiques des roches et techniques géophysiques (P et S = effet prépondérant, respectivement secondaire sur la réponse géophysique)

Certains paramètres physiques peuvent être mis en relation, ainsi une roche à faible porosité aura une vitesse sismique élevée mais aussi une densité élevée, on peut donc relier vitesse sismique et densité (Figure 1-3), ces deux paramètres dépendant fortement de la porosité.

Les tableaux suivants (Figure 1-4) fournissent un guide sommaire d'emploi des différentes méthodes géophysiques. Pour chaque grand groupe se rapportant à un paramètre physique mesuré il existe de nombreuses techniques qui se caractérisent chacune par leurs possibilités et leurs limites, leur coût de mise en œuvre, leur pouvoir de résolution, etc..

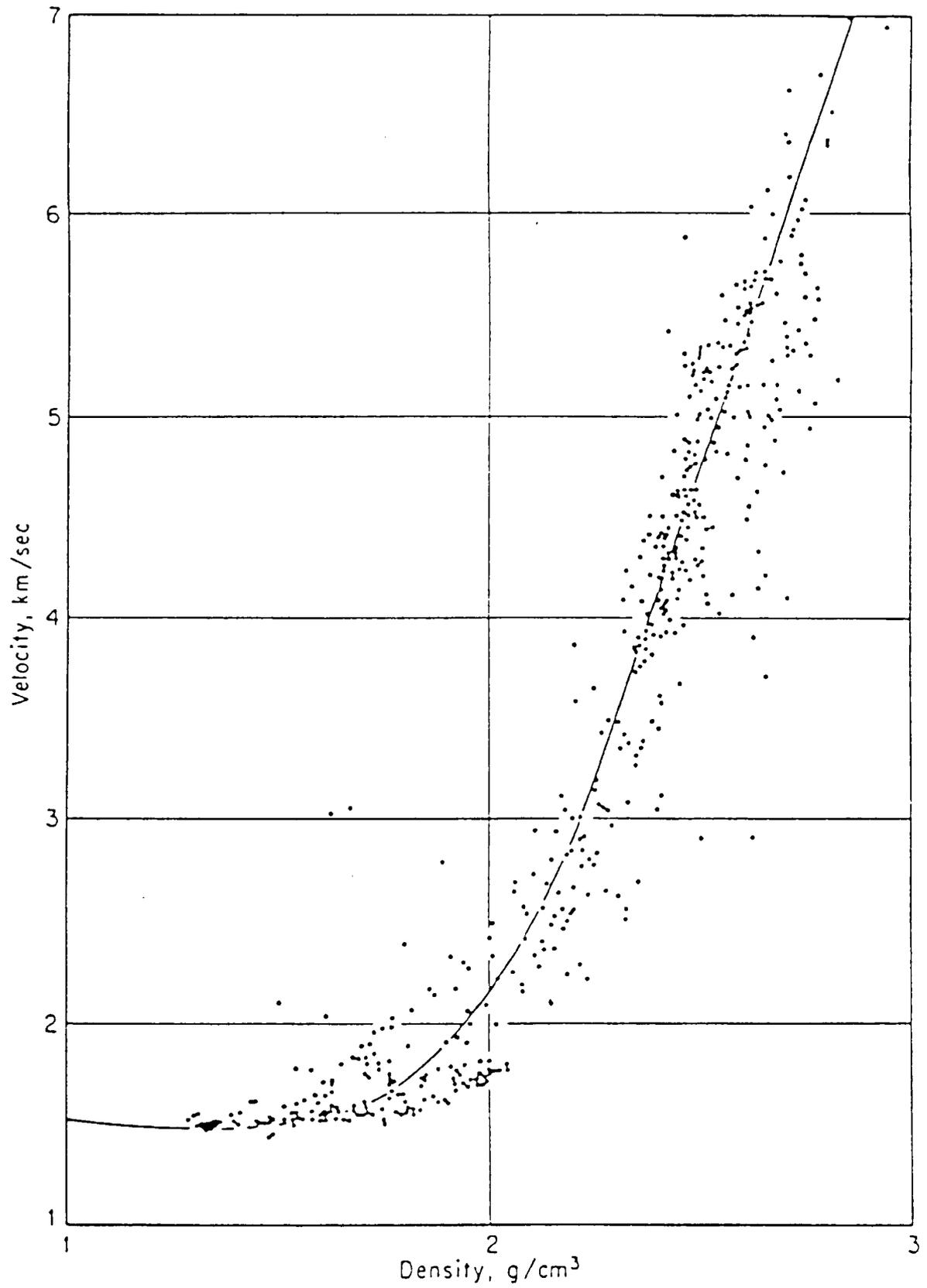


Figure 1-3 Vitesse sismique des ondes P versus densité

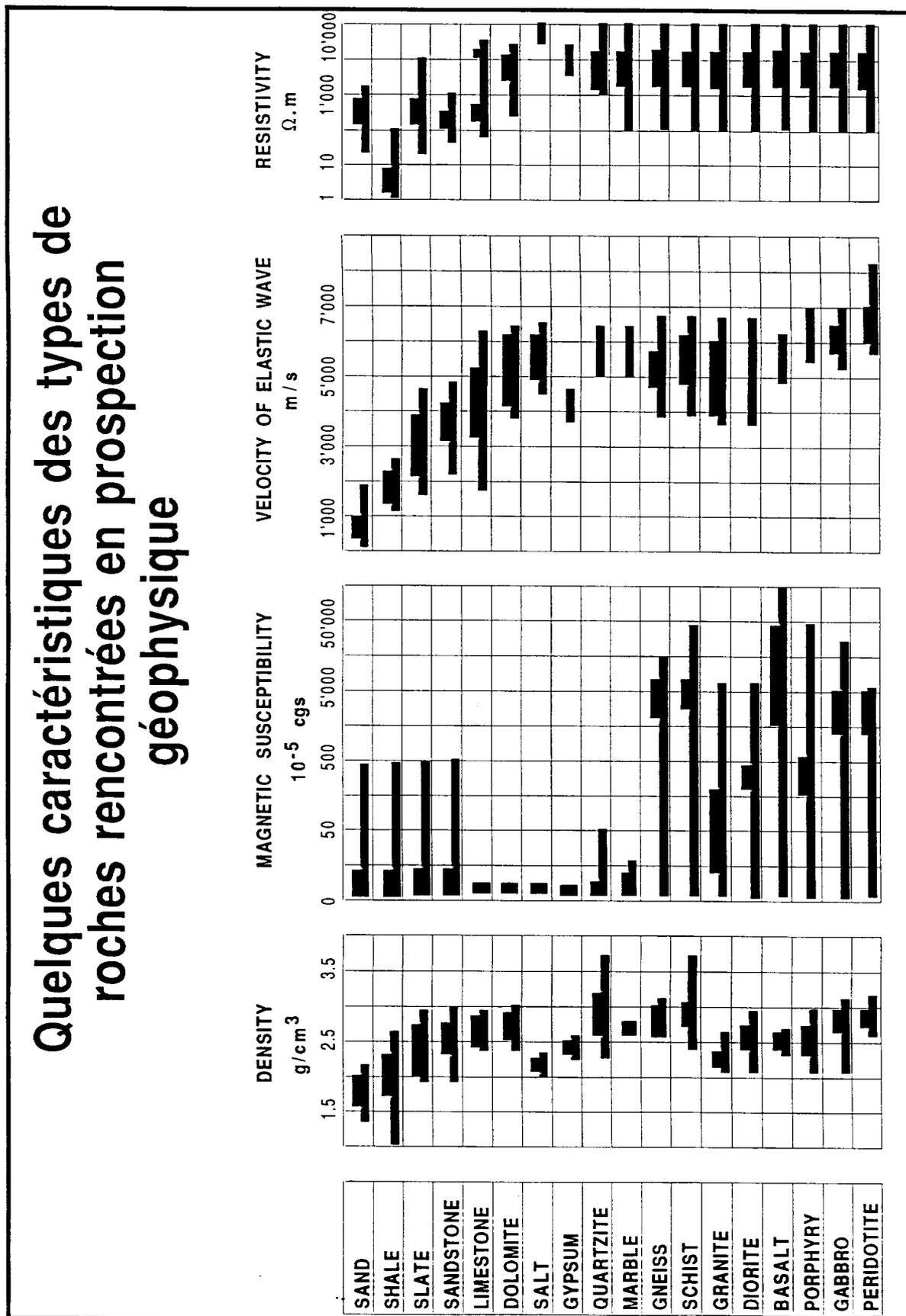


Figure 1-4 Caractéristiques des types de roches rencontrées en prospection géophysique

Ainsi sous le terme **résistivités** ou **prospection électrique en courant continu ou très basse fréquence**, nous pouvons utiliser:

- Les cartes de potentiel
- La mise à la masse
- Le traîné électrique
- Le sondage électrique
- Les panneaux électriques au sol (ou pseudo-sections)
- Les panneaux électriques entre forages en forage

Il faut donc non seulement choisir le type de méthode qui s'applique au problème posé mais aussi choisir la technique à utiliser en fonction des conditions d'application, de la taille et de la profondeur de la cible, etc..

Chapitre 2

LA RESISTIVITE ELECTRIQUE DES ROCHES

2.1 Introduction

La prospection électrique implique la détection d'effets produits lorsqu'un courant électrique traverse le sous-sol. Il existe une grande variété de techniques utilisant les méthodes électriques, on peut mesurer par exemple:

- Une chute de potentiel
- Un courant
- Un champ électromagnétique

Par ailleurs, dans un domaine envisagé, il existe de nombreuses techniques de mesure. Les méthodes fondées sur la mesure du paramètre " résistivité " sont actuellement les plus répandues, plus développées et les plus diversifiées (méthodes imaginées en 1912 par les frères Schlumberger).

Définition: La résistivité ρ d'un milieu est la propriété physique qui détermine la capacité de ce milieu à laisser passer le courant électrique .

La résistivité est la résistance ohmique d'un cylindre de section et de longueur unitaire.

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Avec : R = résistance (ohms) et ρ = résistivité (ohms*m)

Les unités usuelles sont l'ohm pour les résistances et le mètre pour les longueurs. L'unité de résistivité sera donc l'ohm*m. L'ohm*cm employé parfois vaut 0,01 ohm.m. **La conductibilité σ** est l'inverse de la résistivité et s'exprime en mho/m. En hydrogéologie on emploie le plus souvent le micromhos /cm ou microsiemens/cm.

$$\rho \text{ (ohms*m)} = 10'000 / \sigma \text{ (microsiemens/cm)} = 1000 / \sigma \text{ (millisiemens/m)}$$

A strictement parler la loi d'Ohm n'est valable que pour les conducteurs métalliques, pour les gaz et les électrolytes elle n'est qu'une approximation.

2.2 La conductibilité électrique des roches

Dans un conducteur, le courant électrique peut s'écouler selon deux modes distincts:

2.2.1 La conductibilité solide

Le passage du courant se fait par **déplacement d'électrons**. On parle de conductibilité électronique ou métallique car c'est une conductibilité analogue à celle des métaux. Cette conductibilité solide n'est réellement importante que pour certains gisements minéraux tels que :

- certains sulfures (pyrite, galène)
- certains oxydes (magnétite, hématite)
- le graphite, l'or, l'argent, le platine, etc..

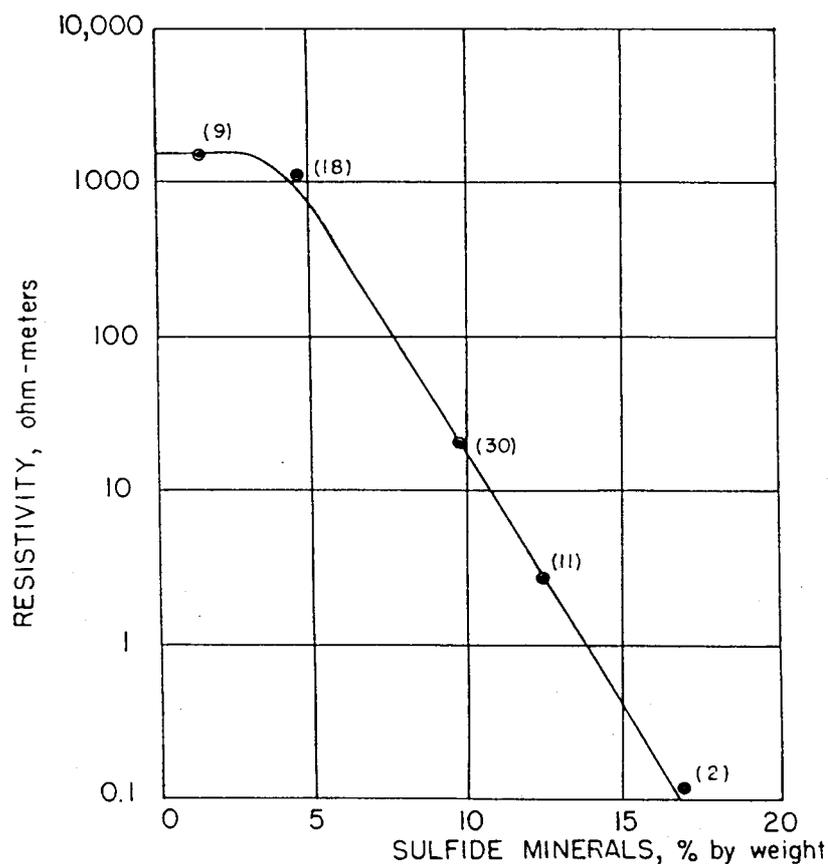


Figure 2-5 Relation entre la résistivité et la quantité de pyrite et de pentlandite présente dans un gabbro (les échantillons proviennent d'un minerai dans le Sud du Maine). Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de mesure qui ont été moyennée et représentée en un seul point.

La résistivité de ces minéraux conducteurs est de l'ordre de 0,01 ohm.m. Pour que ces minéraux puissent modifier la résistivité de la roche il faut (Figure 2-5):

- que la quantité soit suffisante (sable aurifère 0,6 g/t, insuffisant)
- que " l'habitus " soit dendritique, un habitus granulaire a beaucoup moins d'effet ceci à cause du contact imparfait entre les minéraux.
- que la roche soit sous le niveau hydrostatique surtout lorsque le minéral est dispersé en grains qui ne sont pas jointifs. Dans ces cas là la roche, si elle est sèche, n'est pas affectée par la présence de ces minéraux conducteurs, elle reste infiniment résistante.

2.2.2 La conductibilité liquide électrolytique:

En fait, pour la plupart des roches, la conductibilité est presque uniquement de type électrolytique. Cela signifie que ce sont **les ions** qui transportent des charges sous l'effet du champ électrique et que les roches conduisent le courant électrique **grâce à l'eau qu'elles contiennent**. La résistivité d'une roche va dépendre de:

- **La qualité de l'électrolyte**, c'est à dire de la résistivité de l'eau d'imbibition ρ_w et par conséquent de la quantité de sels dissous.
- de la **quantité d'électrolyte** contenu dans l'unité de volume de la roche.
- du **mode de distribution de l'électrolyte**.

2.2.2.1 La qualité de l'électrolyte

Quand un sel se dissout dans l'eau, il se dissocie en ions chargés positivement et ions chargés négativement. Lorsque l'on applique un champ électrique, les ions vont se déplacer. Ce déplacement est gêné par la **viscosité** de l'eau et pour un ion donné atteint une vitesse limite appelée **la mobilité des ions**.

2.2.2.2 La salinité

La conductibilité d'un électrolyte dépend en fait de la teneur en ions et de la mobilité des différents ions en solution et du degré de dissociation. On peut écrire:

$$\rho_w = f(c_1 v_1 + c_2 v_2 + c_3 v_3 + \dots + c_n v_n)$$

Avec : C_1 = concentration en ion 1 et V_1 = mobilité de l'ion 1

La mobilité des ions est différente pour chaque ion, par exemple:

H +	V = 36.2	10^{-8} m/sec
OH-	20.5	"
S04 --	8.3	"
Na +	5.2	"
CL-	7.9	"

Une eau avec la même concentration en poids de sels dissous aura une résistivité différente selon les ions en présence.

Du point de vue chimique, on définit le **résidu sec**, qui représente le total des matières dissoutes. On l'exprime en g/litre.

1 g/litre = 1000 ppm

1 mg/litre = 1ppm

On admet généralement que si ce résidu sec est plus élevé que 8g/litre, 8000 ppm, l'eau est **non potable**. Cette limite dépend des ressources en eau de la région (Figures 2-6, 2-7, 2-9). En France par exemple le décret de 1989 préconise 1500 ppm.

Types d'eau	Concentration ppm	Résistivité ohms*m	Conductibilité microsiemens/cm
eau potable	500	12	833
eau médiocre	1000	6	1666
eau mauvaise	2000	2,8	3571
eau non potable	8000	0.75	13333
eau de mer	35000	0,2	50000
eau de Vichy	5167	1,2	8000
eau d'Henniez	500	12	833
eau du robinet	311	18	550

Figure 2-6 Résistivité de différents types d'eau

Type d'eau ou de polluant	Résistivité (ohm*m)
Eaux des rivières du plateau Suisse	15 – 35
Rhône	80
Lac Léman	40 – 50
Lac de Neuchâtel	40 – 50
Eau de pluie	30 – plusieurs milliers
Fleuve Balé (Mali)	300
Fleuve Niger	100
Hydrocarbure	Résistivité infinie
P.C.E. (Perchloréthylène)	Résistivité infinie
Jus de décharge	5

Figure 2-7 Résistivité de différentes eaux et de polluants

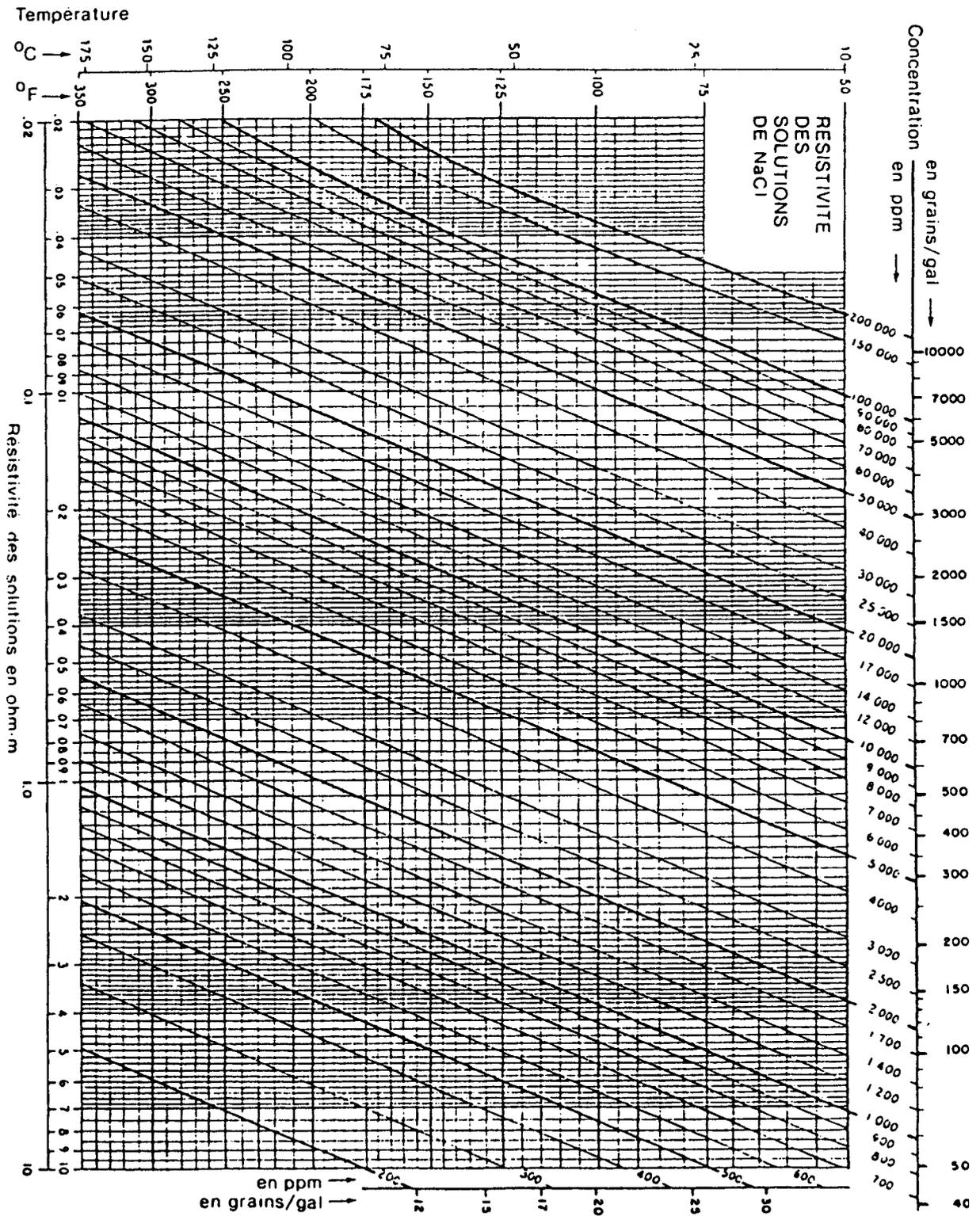


Figure 2-8 ABAQUE 1: Résistivité – Température – Salinité

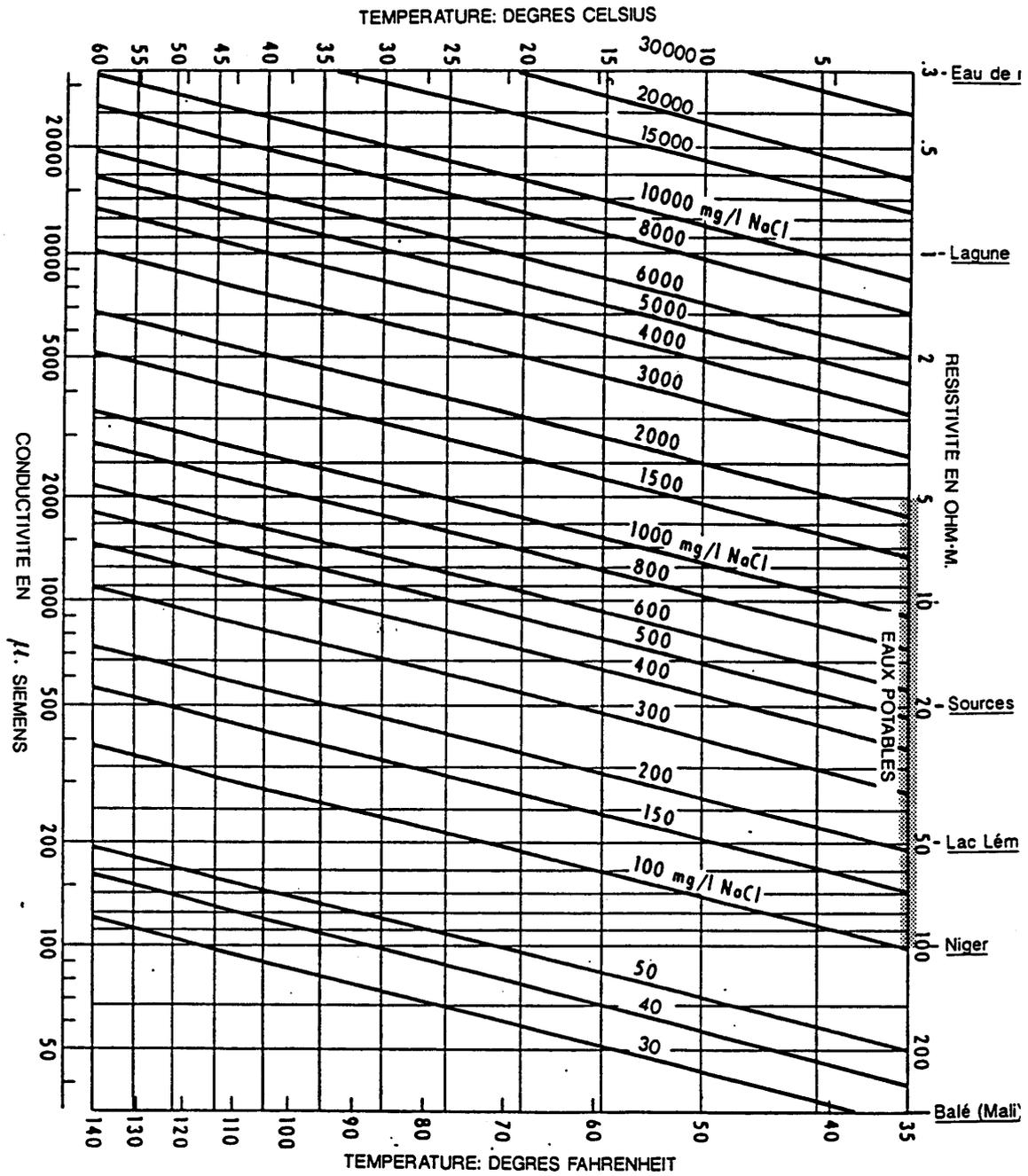
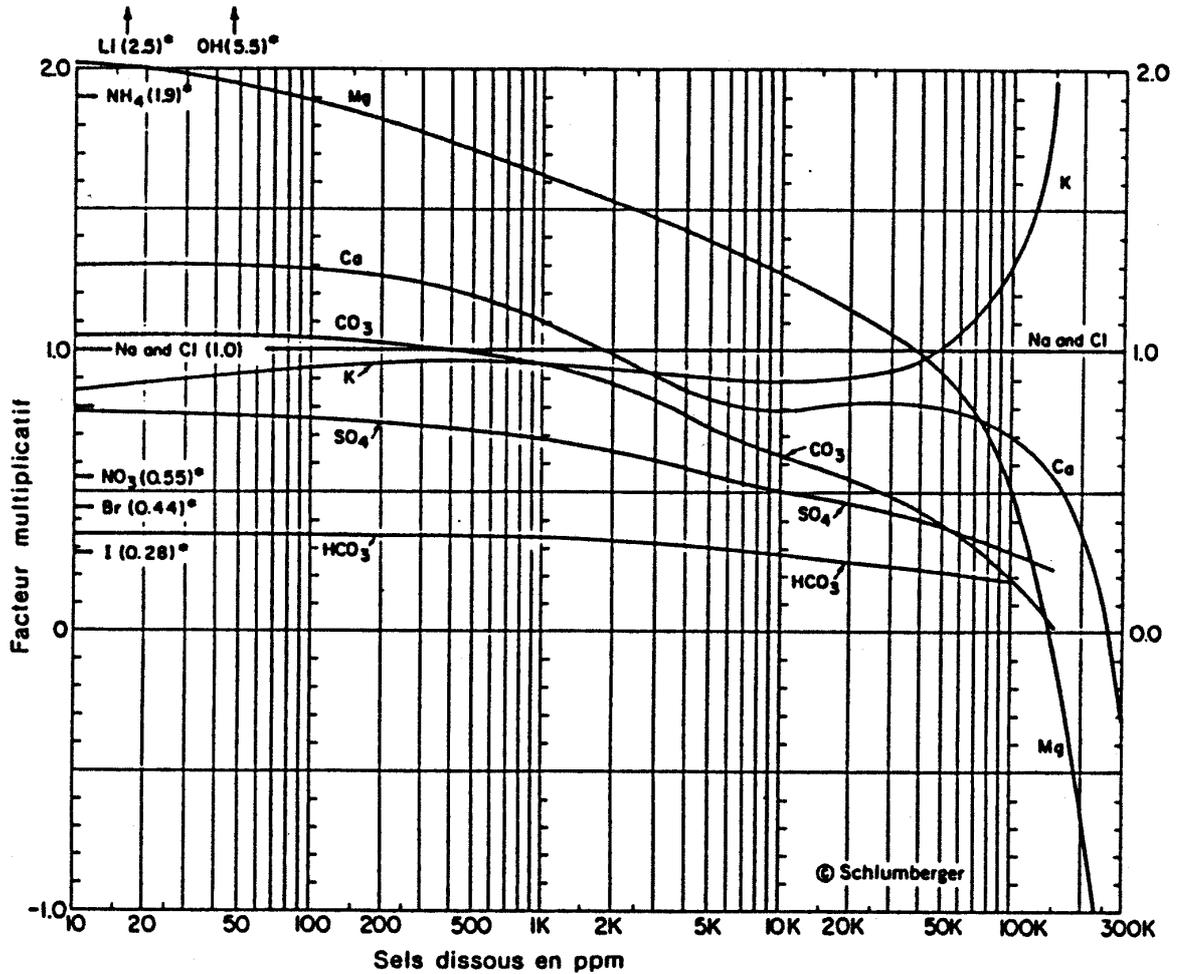


Figure 2-9 ABAQUE 1b : Résistivité – Température – Salinité



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

Figure 2-10 ABAQUE 2: Résistivité des filtrats et des eaux de formation

Il faut noter qu'une eau peut être non potable pour l'homme, mais utilisable pour le bétail. On parle de **salinité équivalente**, c'est la salinité en NaCl qui donnerait la même résistivité. Lorsque l'on connaît la composition d'une eau, on peut, grâce à des facteurs de correction pour les différents ions, (Figure 2-10, Abaque 2) calculer son **équivalent NaCl**. L'inverse n'est pas vrai, la connaissance de la résistivité d'une eau ne permet que d'obtenir son équivalent NaCl et non pas sa composition. La qualité d'une eau dans une roche va aussi dépendre:

- de la nature des eaux connées originelles
- de la solubilité des minéraux de la roche
- de l'âge de la roche

D'une manière générale, les roches à grains fins et à pores fins renferment des eaux plus salines, plus conductrices donc, que les roches plus perméables, en effet l'eau ne circule pas et se charge en ions. Ainsi, la moraine argileuse renferme une eau en général beaucoup plus conductrice que celle des graviers. Les roches les plus vieilles présentent des eaux plus chargées en sels.

2.2.2.3 La température

La résistivité d'un électrolyte dépend aussi de la température. Une augmentation de température diminue la viscosité, la mobilité des ions devient plus grande, par ailleurs, la dissociation augmente, ce qui a pour effet de diminuer la résistivité ou inversement d'augmenter la conductibilité, (Figure 2-8, Abaque 1).

En examinant le problème de la qualité de l'électrolyte on remarque tout de suite que la mesure des résistivités peut être une bonne méthode de prospection pour délimiter l'invasion par l'eau salée d'un aquifère d'eau douce, et de même pour surveiller la pollution de la nappe par les hydrocarbures.

2.2.2.4 La quantité d'électrolyte

La quantité d'eau contenue dans les roches dépend de la **porosité Ø**, on distingue:

a) La porosité totale Ø_t

La porosité totale ou absolue est le rapport entre le volume des vides et le volume total de la roche C'est un nombre sans unité exprimé en %.

$$Porosité \cdot totale \cdot n = \frac{Volume \cdot des \cdot vides}{Volume \cdot total \cdot de \cdot la \cdot roche}$$

On distingue la porosité primaire et la porosité secondaire. La porosité **primaire**, formée pendant le dépôt du sédiment, est de type intergranulaire. Son

importance dépend **du degré de classement** des grains et de leur forme. Elle ne **dépend pas de leur taille**. La porosité primaire que l'on rencontre surtout dans les roches détritiques diminue généralement avec le temps sous l'effet de la cimentation et de la compaction.

La porosité **secondaire** englobe la porosité vacuolaire acquise par dissolution dans les roches d'origine chimique ou biochimique, la porosité de fracture et la porosité due à l'altération.

b) La porosité efficace ou effective ϕ_e

Les pores, pour permettre le passage d'un fluide, doivent être connectés. On définit alors:

$$\text{La porosité effective } \phi_e = \frac{\text{Volume total des vides communicants}}{\text{Volume total de la roche}}$$

Cette porosité effective (ou efficace) peut être très inférieure à la porosité totale (Figure 2-11) lorsque les pores de la roche ne sont pas en communication (pierre ponce) ou que la taille des pores est telle que les fluides ne peuvent pas circuler (silt), ou encore qu'une partie de l'eau est absorbée par les minéraux de la roche (argile) (Figure 2-13).

Type de sédiments	Diamètre (mm)	porosité totale (%)	Porosité efficace (%)	Perméabilité (m/s)
Gravier moyen	2.5	45	40	$3 \cdot 10^{-1}$
Sable gros	0,250	38	34	$2 \cdot 10^{-3}$
Sable moyen	0,125	40	30	$6 \cdot 10^{-4}$
Sable fin	0,09	40	28	$7 \cdot 10^{-4}$
Sable très fin	0,045	40	24	$2 \cdot 10^{-5}$
Sable silteux	0,005	32	5	$1 \cdot 10^{-9}$
Silt	0,003	36	3	$3 \cdot 10^{-8}$
Silt argileux	0,001	38	-	$1 \cdot 10^{-9}$
Argile	0,0002	47	-	$5 \cdot 10^{-10}$

Figure 2-11 Quelques caractéristiques de sédiments meubles, d'après l'U.S. Geological Survey (N.B. Argile est prise au sens sédimentologique du terme).

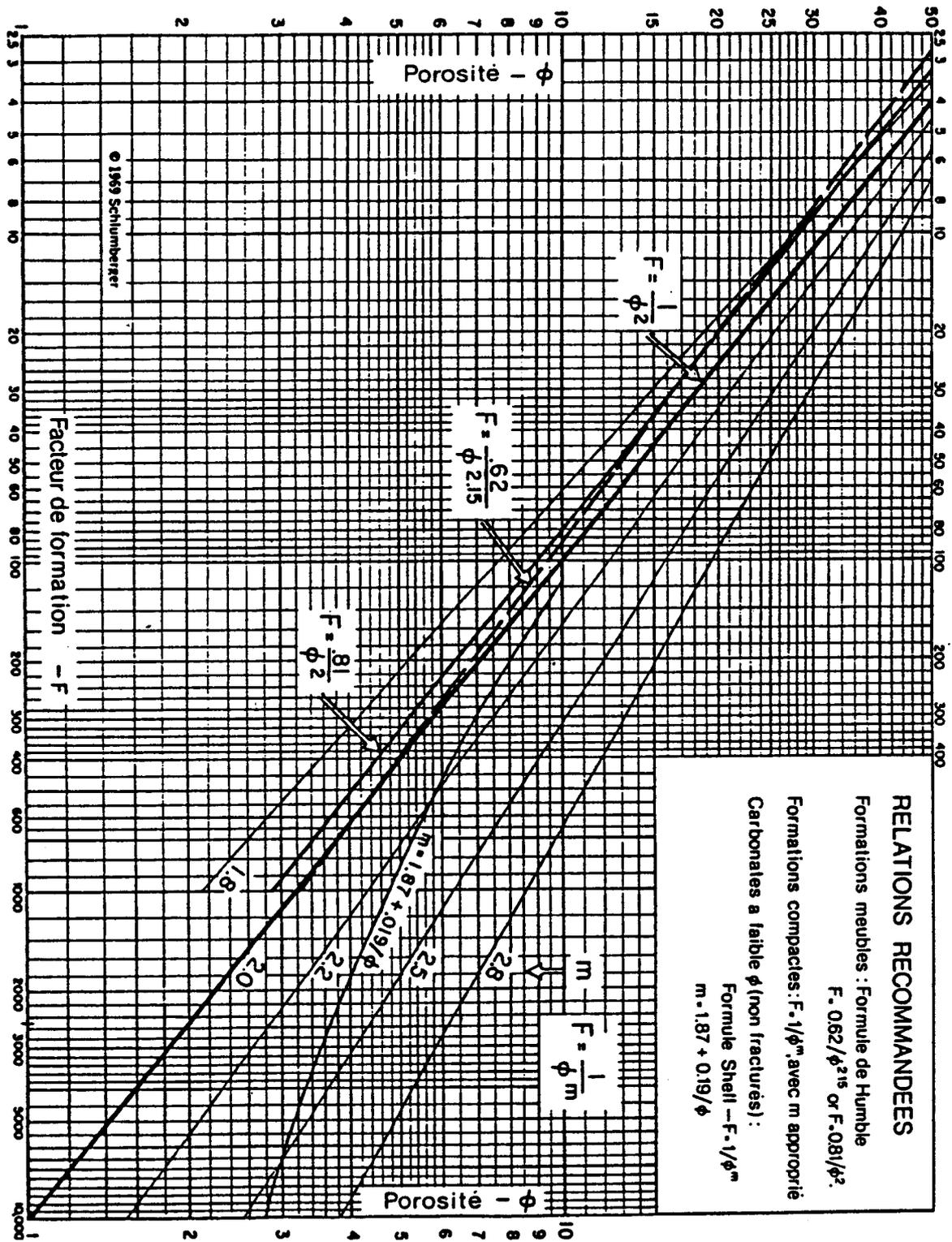


Figure 2-12 ABAQUE 3 : Porosité versus facteur de formation (Attention dans la formule de Shell : $m = 1.87 + 0.019/\phi$ et non pas $m = 1.87 + 0.19/\phi$)

Types de réservoirs	Porosité eff. (%)	Types de réservoirs	Porosité eff. (%)
Gravier gros	30	sable gros plus silt	5
Gravier moyen	25	silt	2
Gravier fin	20	vases	0.1
Gravier plus sable	15 à 20	calcaire fissuré	2 à 10
Alluvions	8 à 10	craie	2 à 5
Sable gros	20	Grès fissuré	2 à 15
Sable moyen	15	Granite fissuré	0.1 à 2
Sable fin	10	Basalte fissuré	8 à 10
Sable très fin	5	Schistes	0.1 à 2

Figure 2-13 Valeurs de la porosité efficace moyenne pour les principaux réservoirs

2.3 La loi d'Archie

2.3.1 Cas d'une roche saturée

Dans le cas d'une roche saturée, « ARCHIE » a établi une relation expérimentale liant la résistivité de la roche à la porosité et à la résistivité de l'eau d'imbibition.

$$\rho_r = \rho_w a \phi^{-m}$$

Avec : ρ_w = résistivité de l'eau d'imbibition ; ϕ = porosité ; a = facteur qui dépend de la lithologie et qui varie entre 0.6 et 2 ($a < 1$ pour les roches à porosité intergranulaires et $a > 1$ pour les roches à porosité de fracture) ; m = facteur de cimentation (Il dépend de la forme des pores, de la compaction et varie entre 1,3 pour les sables non consolidés à 2,2 pour les calcaires cimentés).

On a l'habitude de regrouper sous le terme de **facteur de formation** = $F = a \phi^{-m}$. Dans la pratique on admet pour les formations meubles , sables et grès , la formule de

« HUMBLE » : $F = 0,62 \cdot \varnothing^{-2,15}$ et pour les roches bien cimentées: $F = 1 \cdot \varnothing^{-2}$ (Figure 2-12, Abaque 3)

En définitive nous obtenons pour la loi d'Archie :

$$\rho_r = F \rho_w$$

2.3.2 Influence de la température

La résistivité dépend aussi de la température (Figure 2-8, Abaque 1) à laquelle la roche est soumise, on a la relation suivante:

$$\rho_t = \frac{\rho_{18}}{1 + 0.025(t - 18)}$$

Le gel augmente beaucoup la résistivité des roches, cependant l'effet est relativement progressif car les sels en solution abaissent le point de congélation de l'électrolyte qui remplit les pores de la roche. Une roche totalement gelée est infiniment résistante. Dans les pays de permafrost il est difficile de mettre en œuvre les méthodes de résistivités le sol étant infiniment résistant c'est pourquoi c'est dans ces pays qu'on a développé les méthodes électromagnétiques. **La loi d'Archie ne s'applique par rigoureusement pour les roches argileuses**, à cause de deux phénomènes secondaires qui sont:

- L'ionisation de certains minéraux argileux
- la conductibilité superficielle

2.3.3 La saturation

La loi d'Archie a été établie pour des roches saturées en eau, il faut maintenant tenir compte d'un nouveau paramètre: **la saturation**.

$$la \cdot saturation \cdot S_w = \frac{Volume \cdot des \cdot pores \cdot remplis \cdot d'eau}{\dots}$$

La loi d'Archie devient alors

$$\rho_r = F \rho_w S_w^{-n}$$

On peut aussi écrire:

$$S_w = n \sqrt{\frac{F \rho_w}{\rho_r}}$$

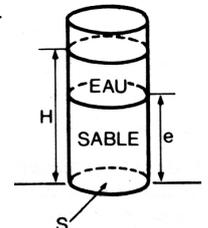
Avec : $F \cdot \rho_w$ = résistivité de la roche saturée en eau ; ρ_r = résistivité de la roche désaturée en eau ; $n \approx 2$.

L'exposant n varie très peu avec les formations, sa valeur est environ de 2 pour la plupart des formations de porosité normale dont la teneur en eau est comprise en 20 et 100 %. Parfois l'air peut être remplacé par de l'huile ou du gaz, ce qui a le même effet sur les résistivités ces trois fluides étant infiniment résistants. Le paramètre saturation est très important en pétrole, c'est de lui que dépend la mise en production. D'une manière générale, la désaturation augmente la résistivité. Dans certains cas très particuliers l'effet de la désaturation peut être inverse. En effet, l'évaporation charge en sels la zone déshydratée, qui devient plus conductrice que la zone saturée de par sa grande concentration en sels, c'est le cas par exemple de certaines régions d'Egypte.

2.4 La perméabilité

La perméabilité est la faculté que possède un corps de se laisser traverser par un fluide. Cette propriété est généralement exprimée numériquement par le **coefficient de perméabilité K** de « **DARCY** ». Il n'y a aucun rapport direct entre la porosité et la perméabilité, mais pour être perméable la roche doit obligatoirement être poreuse.

$$Q = KS \frac{H}{e}$$



Avec : Q = débit (m^3/sec) ; S = section de la colonne de sable (m^2) ; H = hauteur de la charge d'eau (m) ; e = hauteur de la colonne de sable (m) ; K = facteur de proportionnalité appelé coefficient de perméabilité de « **DARCY** » (m/sec ou cm/sec). 1 **DARCY** = perméabilité d'un matériau qui fournit un débit de fluide de $1 cm^3/sec$ à travers une section de $1 cm^2$ sous un gradient hydraulique de 1 atmosphère par cm, le fluide ayant une viscosité de 1 centipoise.

En hydrologie, les argiles se comportent comme des roches imperméables (Figure 2-14, Figure 2-16). Elles sont très poreuses et possèdent, quand elles sont sèches, une perméabilité appréciable. Mais quand l'argile est humide, les pellicules d'eau absorbées sur les plaquettes d'argile la rendent imperméable.

En résumé dans nos régions (Figures 2-15, 2-17, 2-18, 2-19)

- Les roches très conductrices (porosité grande, perméabilité faible) sont inexploitable du point de vue hydrogéologie. Exemples: les argiles.

- Les roches très résistantes (porosité faible) contiennent insuffisamment d'eau libre pour être intéressantes.

En résumé les roches favorables lorsque l'on cherche de l'eau doivent avoir une porosité élevée et une perméabilité grande, ces roches auront des résistivités moyennes qui oscillent entre 150 et 400 ohms.m en général dans la région Lémanique.

Pour l'exploitation du pétrole, le problème est un peu différent, le pétrole ou le gaz étant deux fluides infiniment résistants.

Roches	Porosité totale (%)	Perméabilité (cm/s)	Résistivité (ohms*m)
Argilite	35	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁹	70 à 200
Craie	35	10 ⁻⁵	30 à 300
Tuf volcanique	32	10 ⁻⁵	20 à 300
Marnes	27	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁹	20 à 100
Grès	3 à 35	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶	30 à 800
Dolomite	1 à 12	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁷	200 à 10'000
Calcaires	3	10 ⁻¹⁰ - 10 ⁻¹²	200 à 10'000
Métaschistes	2.5	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁹	300 à 800
Gneiss	1.5	10 ⁻⁸	1'000 à 20'000
Quartzite	<1	10 ⁻¹⁰	1'000 à 10'000
Granite	1	10 ⁻⁹ - 10 ⁻¹⁰	1'000 à 15'000
Gabbro	1 à 3	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁹	6'000 à 10'000
Basalte	1.5	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁸	800 à 15'000

Figure 2-14 Porosité, perméabilité et résistivité de différentes roches

Lithologie	Chattien (%)	Aquitaniens (%)	Burdigalien (%)
Grès	25	57.5	81
Grès marneux	38	22	15
Marne	31.5	18	4
Argile	3	2.5	
Calcaire lacustre	2.5		
Gamme des résistivités	15 - 40	40 - 90	60 - 150
Résistivité moyenne	30	65	110

Figure 2-15 Composition et résistivité des molasses du Plateau Suisse

<u>PERMEABILITE</u> K	en m/s	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰
	en darcy cm/s	10 ³	10 ²	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
<u>GRANULOMETRIE</u> diamètre des grains en mm	homogène	graviers		sable pur		sable très fin		silt		argiles			
	variée	graviers gros et moyens	graviers et sable	2		0.25	0.06		0.002		argiles		
<u>TYPES DE FORMATIONS</u>	roches perméables		roches perméables		semi-perméables		impermeables						
	roches perméables		roches perméables		semi-perméables		impermeables						

Figure 2-16 Granulométrie et perméabilité (1 darcy = 1 cm³/s à travers 1 cm² sous un gradient hydraulique de 1 atm/cm)

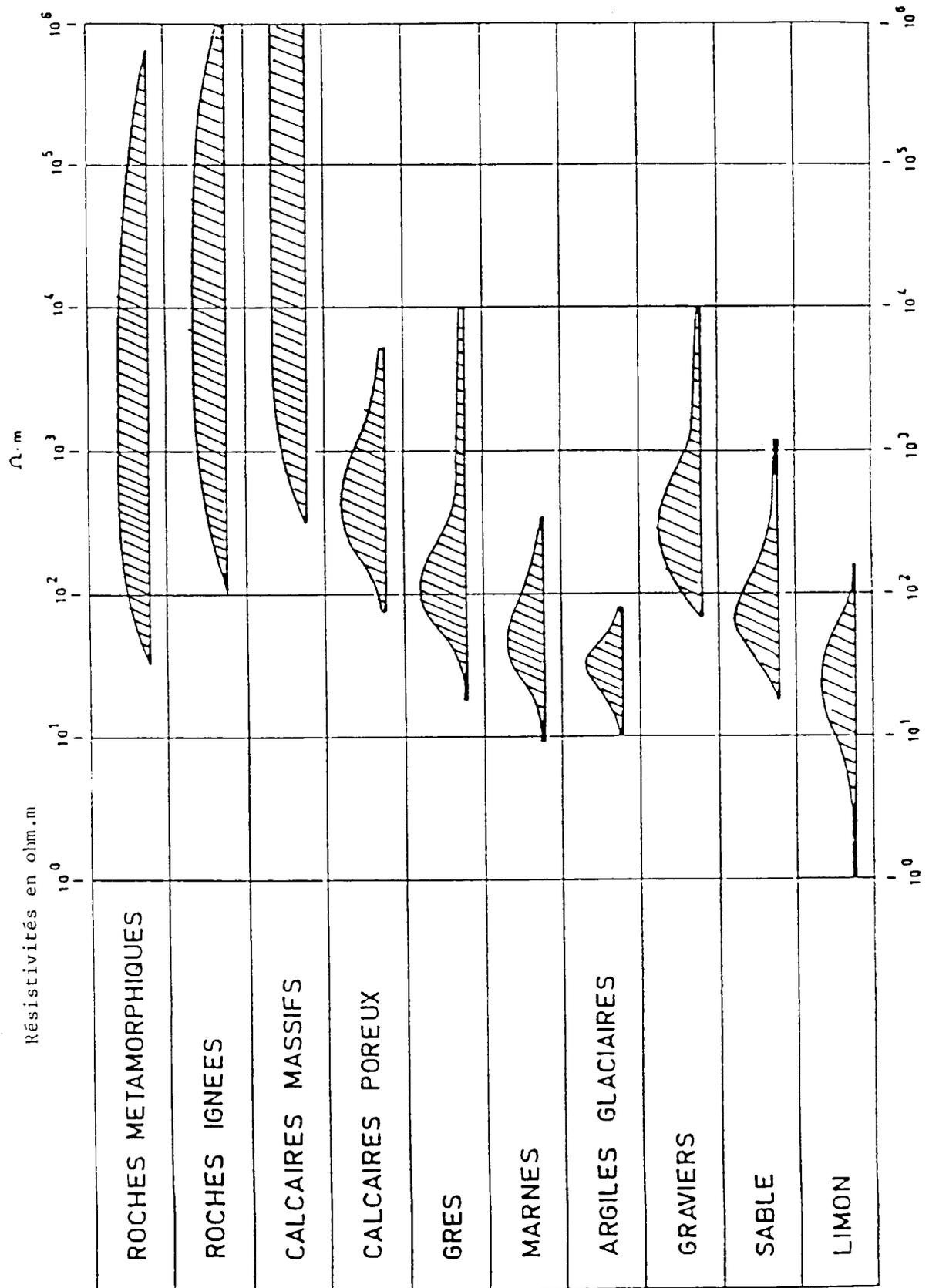


Figure 2-17 Plage des résistivités de différentes formations du Plateau Suisse.

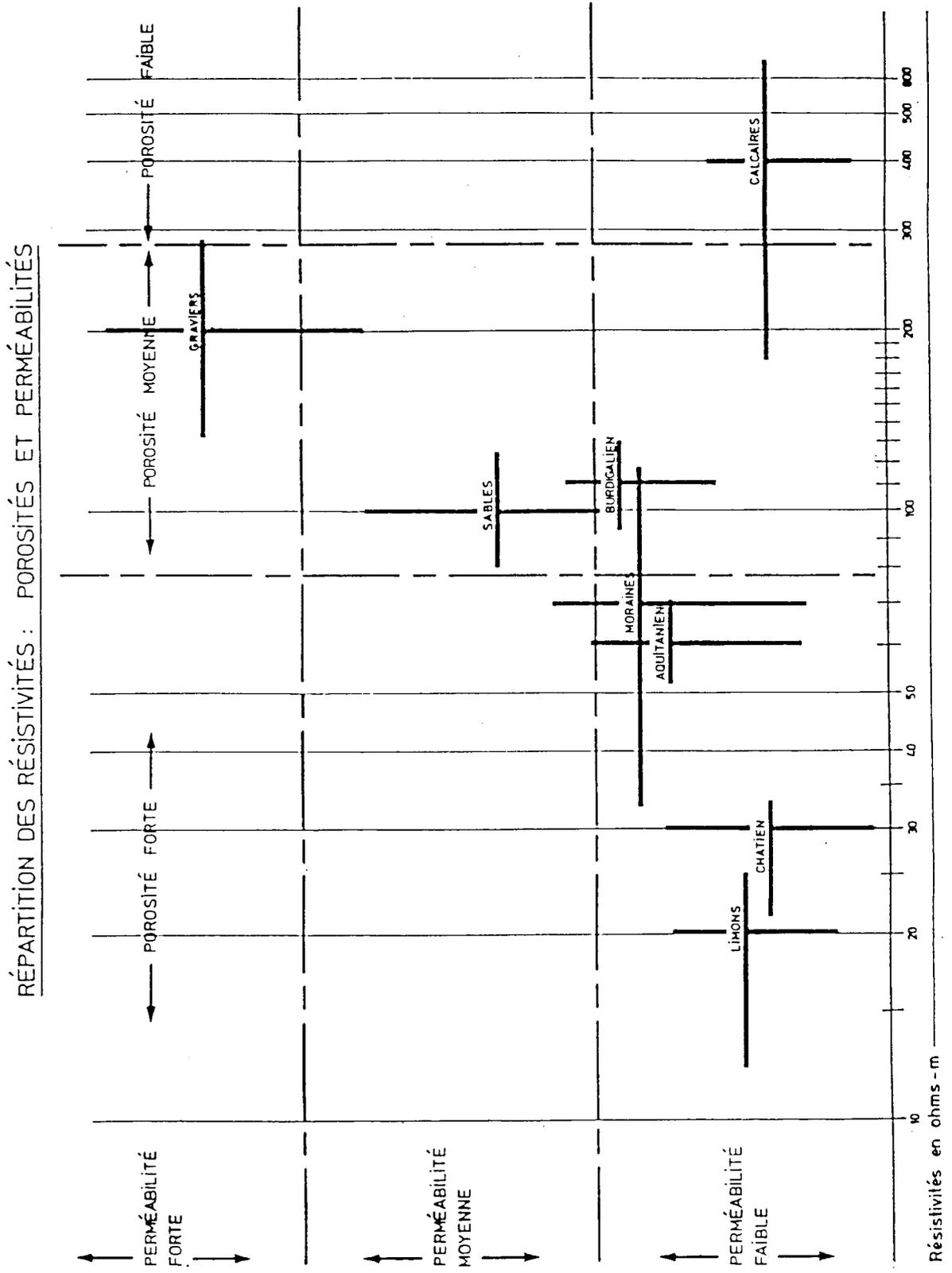


Figure 2-18 Répartition des résistivités : porosités et perméabilités

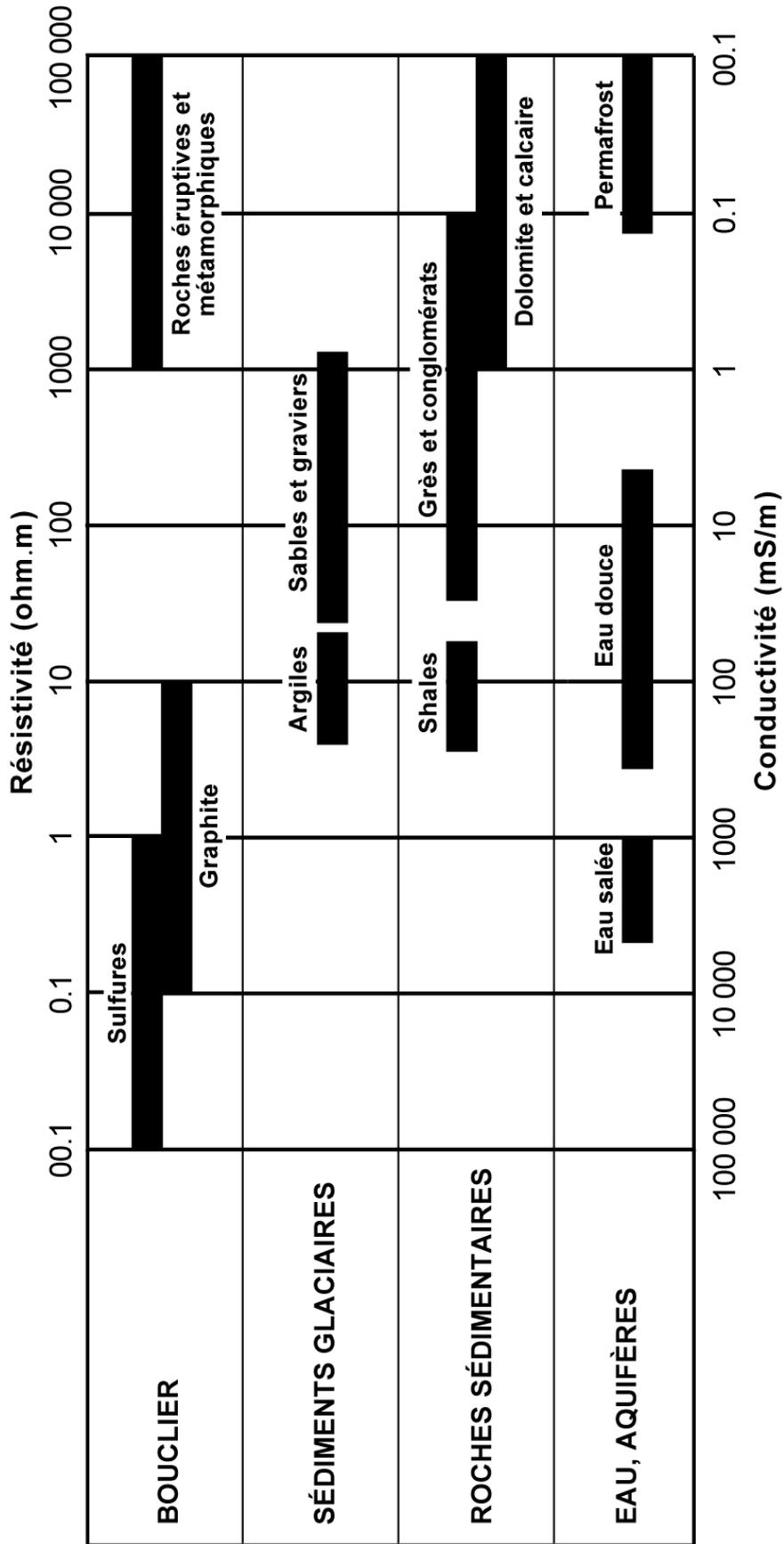


Figure 2-19 Résistivité et conductivité

Chapitre 3

LES METHODES ELECTRIQUES PAR COURANT CONTINU

3.1 Introduction

Nous avons vu que l'on pouvait caractériser le sous-sol par la mesure de la résistivité, qui peut varier:

- de 1 à quelques dizaines d'ohms.m pour les argiles et les marnes
- d'une dizaine à quelques centaines d'ohms.m pour les sables et les grès marneux
- d'une centaine à plusieurs milliers d'ohms.m pour les calcaires et les roches éruptives.

La correspondance entre la résistivité et le faciès géologique est une notion d'une grande importance pratique. Parfois, certains faciès, des argiles par exemple, gardent pratiquement la même résistivité sur des centaines de kilomètres; en général, la résistivité d'une formation est moins constante et peut évoluer progressivement le long d'une même formation spécialement dans les dépôts quaternaires.

Il faut noter que les résistivités que l'on mesure en prospection sont déjà des moyennes relatives à de grands volumes de terrain en place, moyenne d'ailleurs d'autant plus large que les terrains sont plus profonds.

Il résulte de ce qui précède que les mesures de résistivité faites sur échantillons ne sont comparables à celles des terrains en place que si l'on considère la valeur moyenne d'un grand nombre d'échantillons.

Souvent, les résistivités des roches dépendent de plus de **la direction** du courant qui les traverse, on dit qu'elles sont **anisotropes**.

Cette anisotropie peut être due à la structure intime de la roche, les terrains sédimentaires sont généralement plus résistants dans la direction perpendiculaire au plan de stratification par exemple. Il s'agit alors de **micro anisotropie**. Mais pour de grands volumes, il peut également s'agir d'une anisotropie apparente, une succession de couches alternativement résistantes et conductrices donnera une valeur de résistivité plus élevée normalement aux strates, il s'agit dans ce cas de **macro-anisotropie**.

3.1.1 Les filets de courant et les équipotentiels

Examinons maintenant comment mesurer la résistivité des roches. La loi d'OHM nous permet de prévoir le cheminement des filets de courant dans un milieu HOMOGENE ISOTROPE.

Soit un terrain homogène et isotrope de résistivité ρ limité par une surface plane du côté de l'air. Envoyons un courant continu I à l'aide d'une électrode ponctuelle A . L'écoulement du courant se fera par filets rectilignes rayonnant autour de A et produira des variations de potentiel dans le sol à cause de la résistance ohmique de celui-ci. La répartition du potentiel peut être représenté par des demi sphères centrées sur A (Figure 3-20).

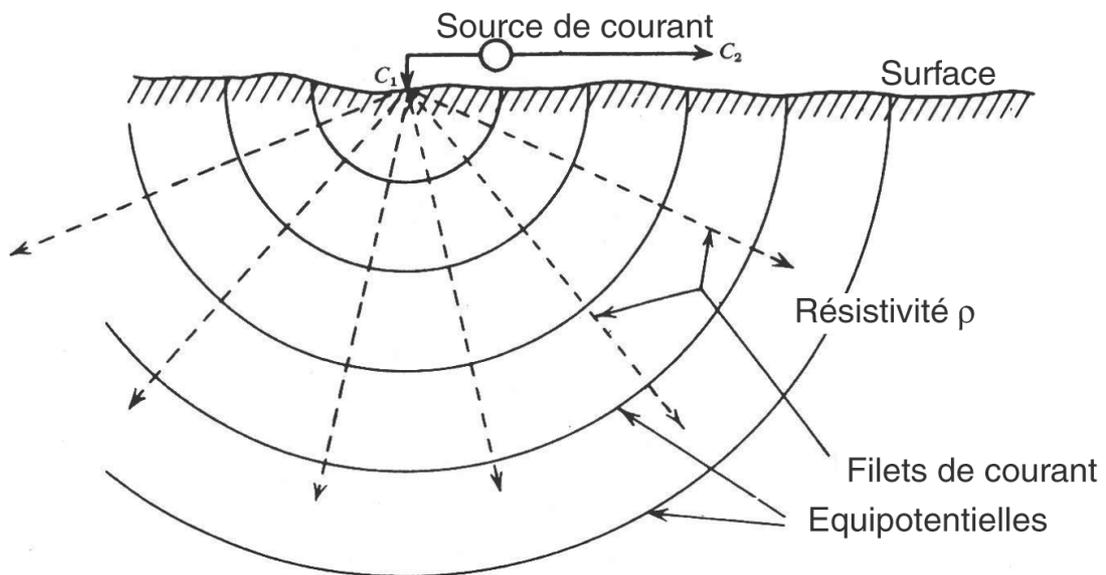


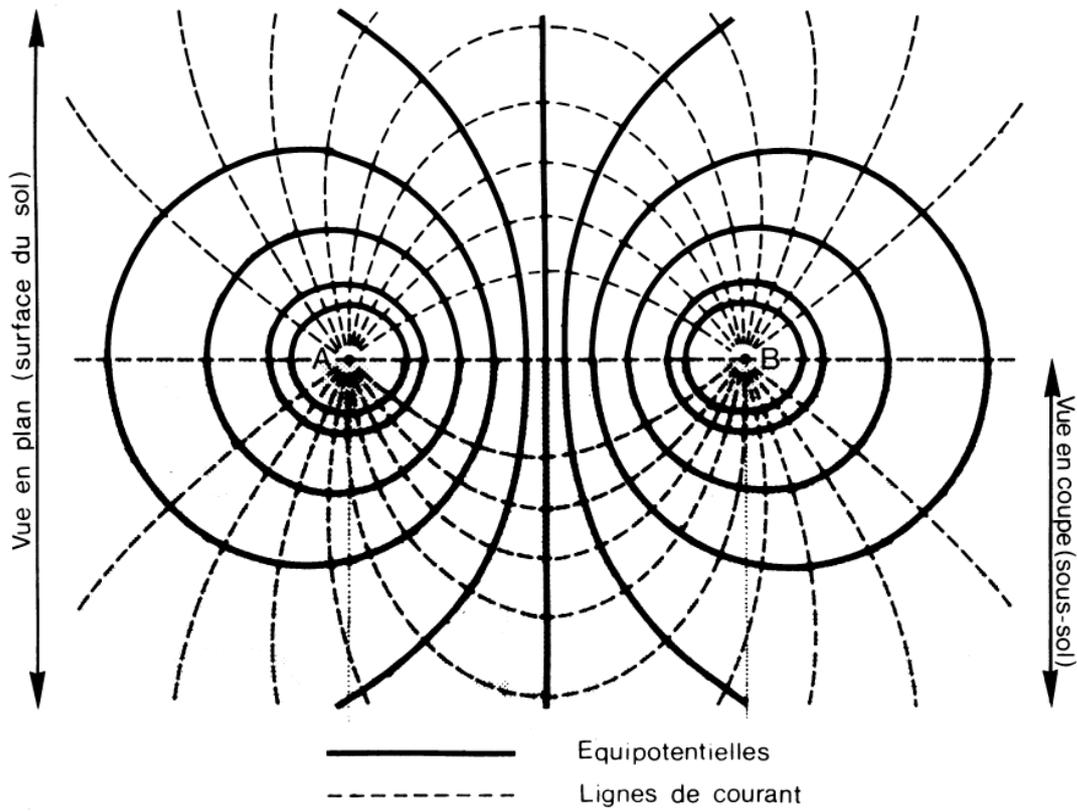
Figure 3-20 Représentation des équipotentiels et des filets de courant pour une source unique

3.1.2 Potentiel et champ entre A et B

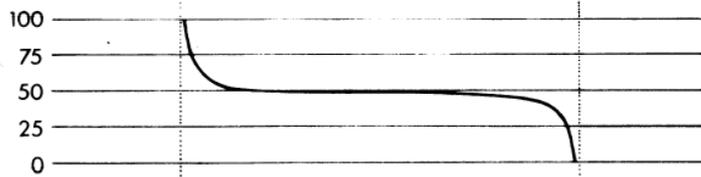
3.1.2.1 Terrain homogène

Dans un milieu homogène isotrope le potentiel V dû à une source ponctuelle (Figure 3-20) décroît proportionnellement à la distance r , il est, d'autre part proportionnel à l'intensité I du courant envoyé et à la résistivité ρ du milieu.

Si l'on assimile le terrain à un demi espace homogène infini, le coefficient de proportionnalité sera égal à $1/2 \pi$; et en appliquant la loi d'ohm à l'espace séparant deux équipotentiels entre lesquelles existe une tension V on obtient:



Champ V (V)



Champ E (V/m)

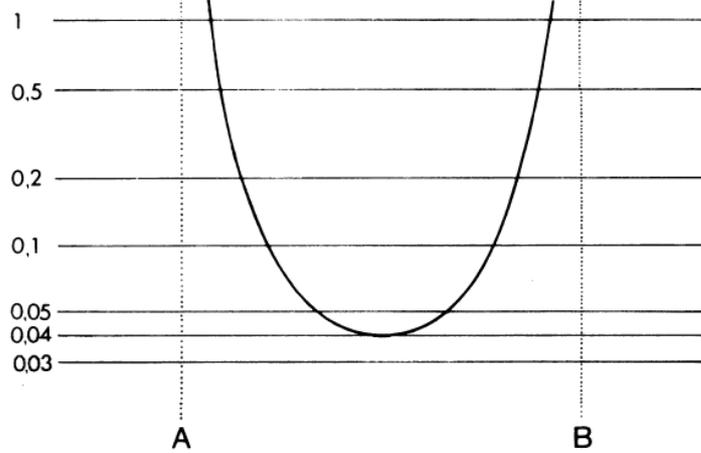


Figure 3-21 Equipotentielles lignes de courant dans un sol homogène

$$dV = \frac{\rho I}{2\pi r^2}$$

soit en intégrant :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

ou encore, si l'on tient compte du champ électrique moyen $E = -\frac{dV}{dr}$

alors

$$E = \frac{\rho I}{2\pi r^2}$$

3.1.2.2 Répartition du potentiel - Principe de superposition

En fait dans la pratique, il existe deux électrodes d'émission. Le courant envoyé par A+ sera recueilli par B-, mais d'après le **principe de superposition**, le potentiel en un point M sera le même si l'on envoie indépendamment un courant +I par A ou un courant -I par B.

Par ailleurs, les lois qui régissent la propagation des phénomènes électriques sont linéaires, ce qui signifie que l'on peut additionner algébriquement les potentiels créés par différentes sources. Le potentiel total en un point sera $V_{\text{tot}} = V_1 + V_2$ pour deux pôles d'envoi de courant :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2} \right)$$

le signe \pm étant déterminé par le signe des électrodes

D'autre part :

$$E = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} \right)$$

L'expression du potentiel montre que dans un sol homogène et isotrope, les surfaces équipotentielles seront pour un seul pôle d'envoi de courant des demi sphères centrées sur ce pôle. Pour deux pôles leur forme sera plus compliquée mais elles resteront sensiblement sphériques au voisinage des prises A et B. De même, les lignes de courant qui seraient des droites issues du pôle d'envoi si celui-ci est unique s'incurvent progressivement pour rejoindre la seconde prise.

Si l'on considère sur la ligne AB l'évolution du potentiel et de son gradient, le champ E, on obtient les courbes représentées sur la Figure 3-21. Cette figure montre que les champs V et E sont sensiblement uniformes dans le tiers central de AB tandis que la majeure partie de la chute de potentiel est localisée au voisinage immédiat des électrodes A + et B -, cela signifie que la presque totalité de la résistance qu'offre le sol au passage du courant provient du voisinage immédiat des prises A et B.

Par exemple **pour une électrode de diamètre a, 90% de la résistance du circuit se situe dans une sphère de rayon 10a**, le reste du terrain ayant une contribution très faible, il sera donc impossible de connaître la nature du sous-sol par l'étude de la résistance entre deux prises. Les couches profondes du sous-sol ne se manifestent que par leur influence sur la répartition du potentiel au tiers central du dispositif, d'où **la nécessité de mesurer ΔV à cet endroit**. D'autre part, lorsque la résistance de contact est très importante, il passe peu de courant dans le sous-sol. Par conséquent il est recommandé d'essayer de diminuer cette résistance (on peut pour faire passer plus de courant dans le sous-sol, augmenter le nombre de piles, diminuer la résistance de contact en arrosant les électrodes, augmenter le nombre d'électrodes, etc ...)

3.1.2.3 Répartition du courant

Au milieu des électrodes A et B, séparée d'une distance L et à une profondeur h, la densité de courant devient, pour un terrain homogène :

$$i_x = \frac{I}{2\pi} \frac{L}{\left(h^2 + \frac{L^2}{4} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

La décroissance de la densité de courant avec la profondeur, au-dessous du milieu de L, est illustrée par la Figure 3-22.

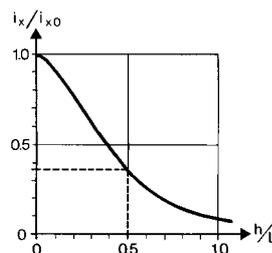


Figure 3-22 Décroissance de la densité de courant sous le centre de $AB = L$

On admet que pour un terrain homogène 30% du courant se trouve entre la surface et une profondeur $z=AB/4$, 50% du courant entre la surface et $z=AB/2$ et 70% du courant entre la surface et $z=AB$.

Ces chiffres permettent d'apprécier dans quelle mesure le courant émis en surface par deux électrodes ponctuelles pénètre dans le sous-sol et peut être affecté par les roches situées en profondeur. D'autres part, la symétrie de la Figure 3-21 nous autorise à remplacer h par y dans l'équation pour évaluer l'extension latérale de l'investigation liée à un dispositif d'émission AB.

CAS PARTICULIER : Lorsque les deux électrodes sont de même signe, les lignes de courant se repoussent et en pratique on utilise ce genre d'arrangement pour forcer le courant à passer dans le sous-sol (Figure 3-23).

3.1.2.4 Principe de réciprocité

Dans un milieu quelconque, homogène ou hétérogène, isotrope ou anisotrope, le potentiel créé en un point M par un courant envoyé en A est égal à celui qu'on mesurerait en A si M devenait source d'émission.

En pratique, le courant est envoyé entre deux pôles A et B et l'on mesure la différence de potentiel Δv entre les deux points M et N, les principes de superposition et de réciprocité apprennent alors que cette différence de potentiel est la même que celle que l'on observerait entre A et B si le courant était envoyé entre M et N.

3.1.2.5 Terrain hétérogène

L'existence d'une masse relativement conductrice ou résistante dans le sous-sol va perturber la répartition des filets de courant et des lignes équipotentielles.

Voyons tout d'abord la répartition du courant.

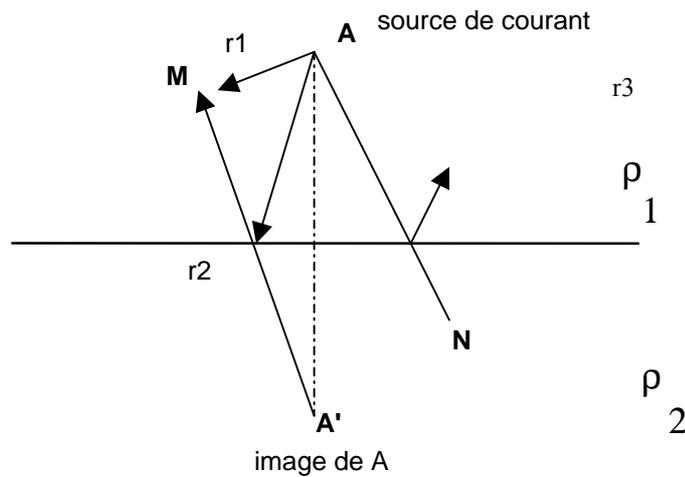
- Au passage d'une surface de séparation, les lignes de courant seront réfractées suivant **une loi des tangentes**.

$$\rho_1 \operatorname{tg}(\alpha_1) = \rho_2 \operatorname{tg}(\alpha_2)$$

- Les tangentes des angles formés par les lignes de courant avec la normale au contact seront dans le rapport inverse des résistivités.

$$\rho_2 / \rho_1 = \operatorname{tg}(\alpha_1) / \operatorname{tg}(\alpha_2)$$

En pénétrant dans un milieu plus résistant, le courant sera dévié vers la normale au contact. Quant aux équipotentielles, on utilise pour traiter ce problème la théorie des images de THOMSON. (analogue à la théorie des images en optique). Envisageons deux milieux de résistivité ρ_1 et ρ_2 , séparés par une faille P. On considère le plan P comme un miroir semi-transparent caractérisé par son **pouvoir réflecteur R**.



$$R = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Soit une source placée en A. Au point M, nous aurons le potentiel dû à A augmenté du potentiel dû à son image A', de sorte que:

$$V_M = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} \right) + \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_2} \right)$$

Au point N le potentiel dû à A est diminué d'une certaine partie réfléchi.

$$V_N = \frac{\rho_2 I}{4\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{R}{r_3} \right)$$

On constate en dessinant les équipotentiels que le plan P se manifeste par un **changement de direction** et on observe un resserrement des équipotentiels dans le terrain plus résistant (Figures 3-24, 3-25).

Les modèles présentés dans les pages suivantes sont une simulation informatique du champ E dans le sous-sol. Ils nous permettent d'observer la répartition du champ électrique (et donc des filets de courant) dans différentes situations (terrains homogènes et hétérogènes).

Modèle à un terrain homogène

Exemple géologique:

Molasse burdigalienne (OMM), banc de grès homogène ($\rho = 120 \Omega \cdot m$).

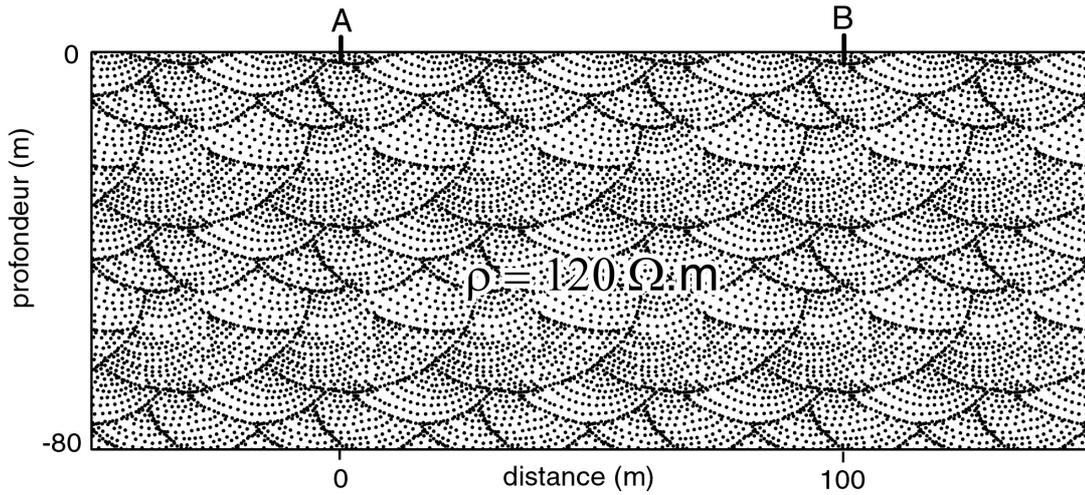


Figure A: modèle

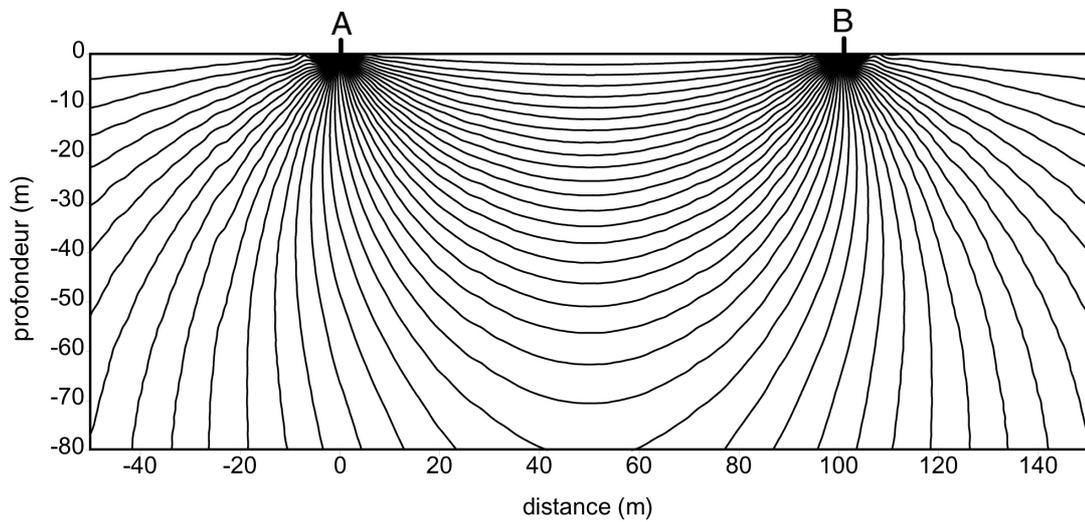


Figure B: champ électrique

La répartition du courant électrique se fait de manière homogène dans le sous-sol entre les électrodes A et B.

Modèle à deux terrains, $\rho_2 > \rho_1$

Exemple géologique:

Molasse d'eau douce (USM): passage d'un banc grés-marneux ($\rho_1 = 30 \Omega.m$) à un banc gréseux désaturé ($\rho_2 = 200 \Omega.m$).

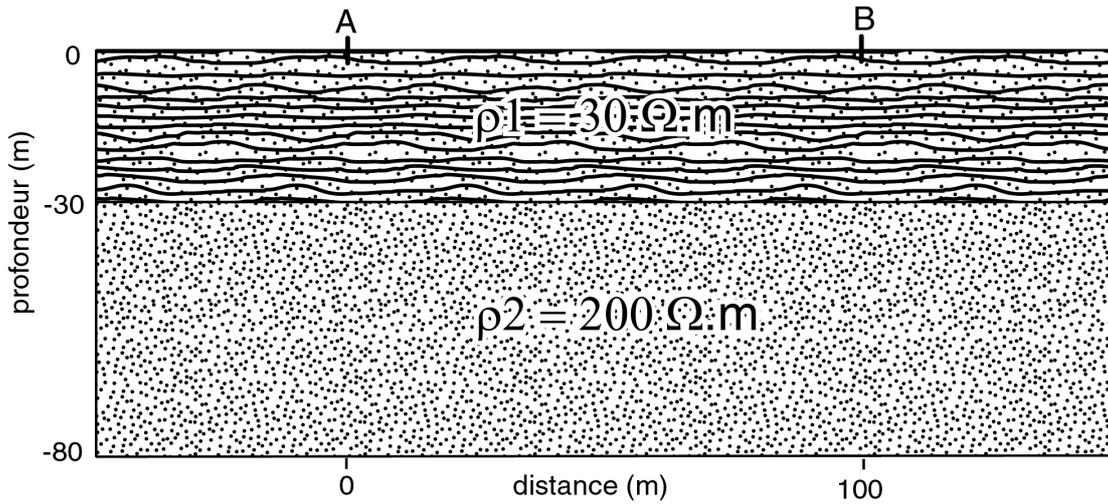


Figure A: modèle

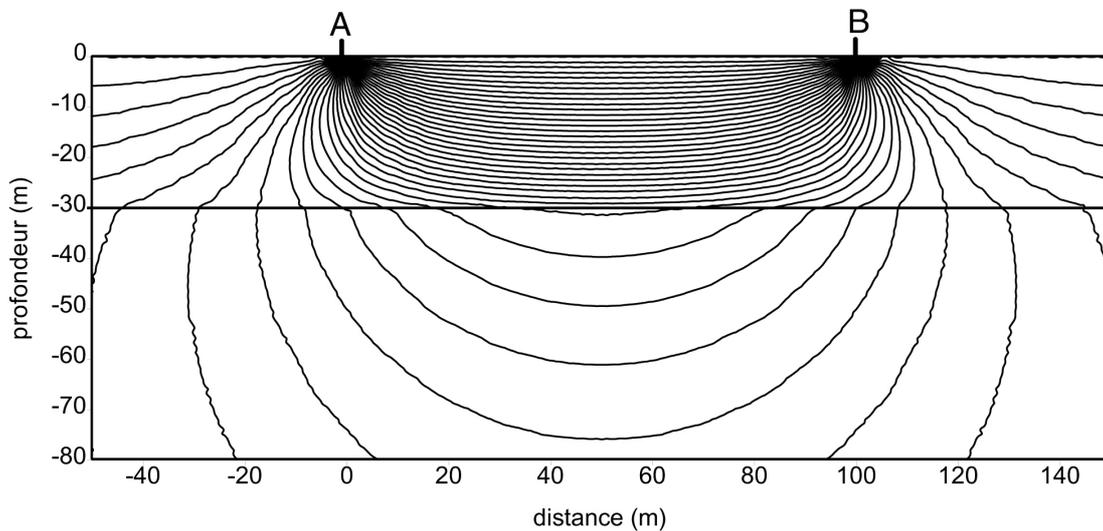


Figure B: champ électrique

Le courant se concentre dans le premier terrain de faible résistivité $\rho_1 = 30 \text{ohm.m.}$

Modèle à deux terrains, $\rho_1 > \rho_2$

Exemple géologique:

Terrain 1: graviers homogènes partiellement saturés ($\rho_1 = 200 \Omega.m$)

Terrain 2: molasse chattienne ($\rho_2 = 30 \Omega.m$)

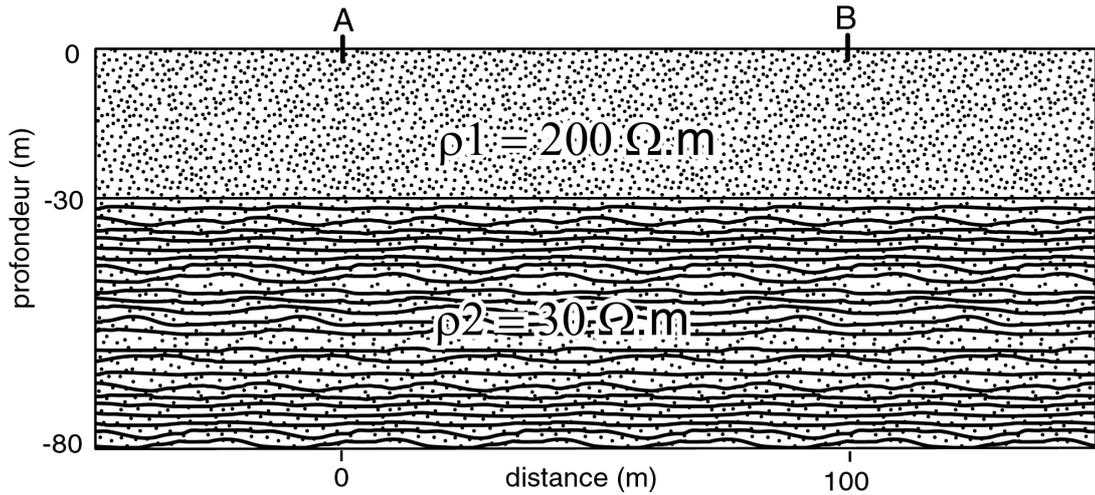


Figure A: modèle

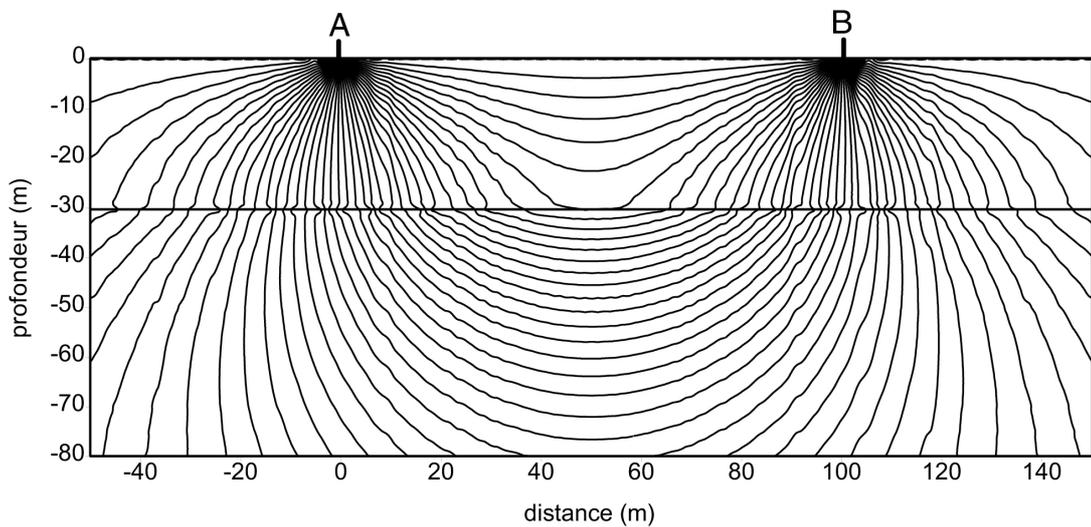


Figure B: champ électrique

Le courant se concentre dans le second terrain de faible résistivité $\rho_2 = 30 \text{ ohm.m}$

Modèle de sillon résistant

Exemple géologique:

Terrain 1: moraine ($\rho_1 = 60 \Omega.m$)

Terrain 2: molasse chattienne ($\rho_2 = 30 \Omega.m$)

Terrain 3: graviers désaturés ($\rho_3 = 400 \Omega.m$)

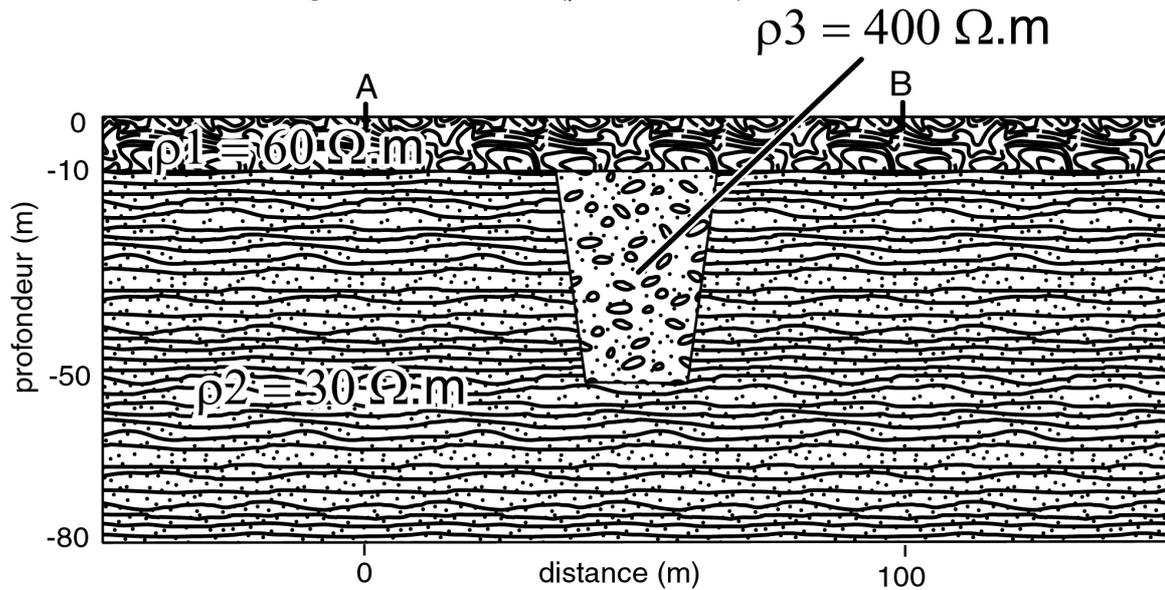


Figure A: modèle

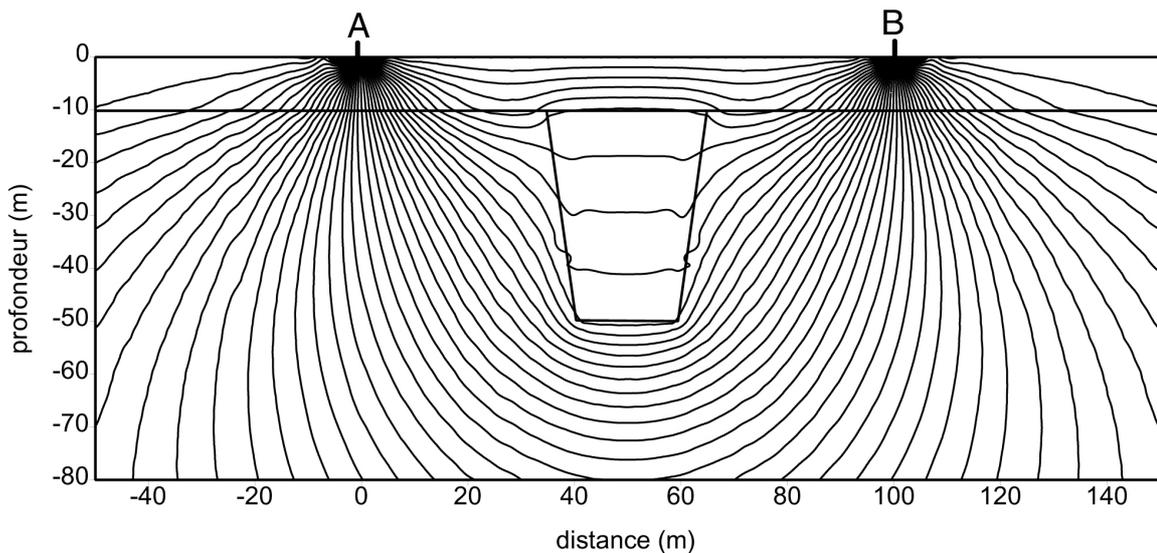


Figure B: champ électrique

Le courant se concentre autour du sillon résistant $\rho_3 = 400 \text{ ohm.m}$

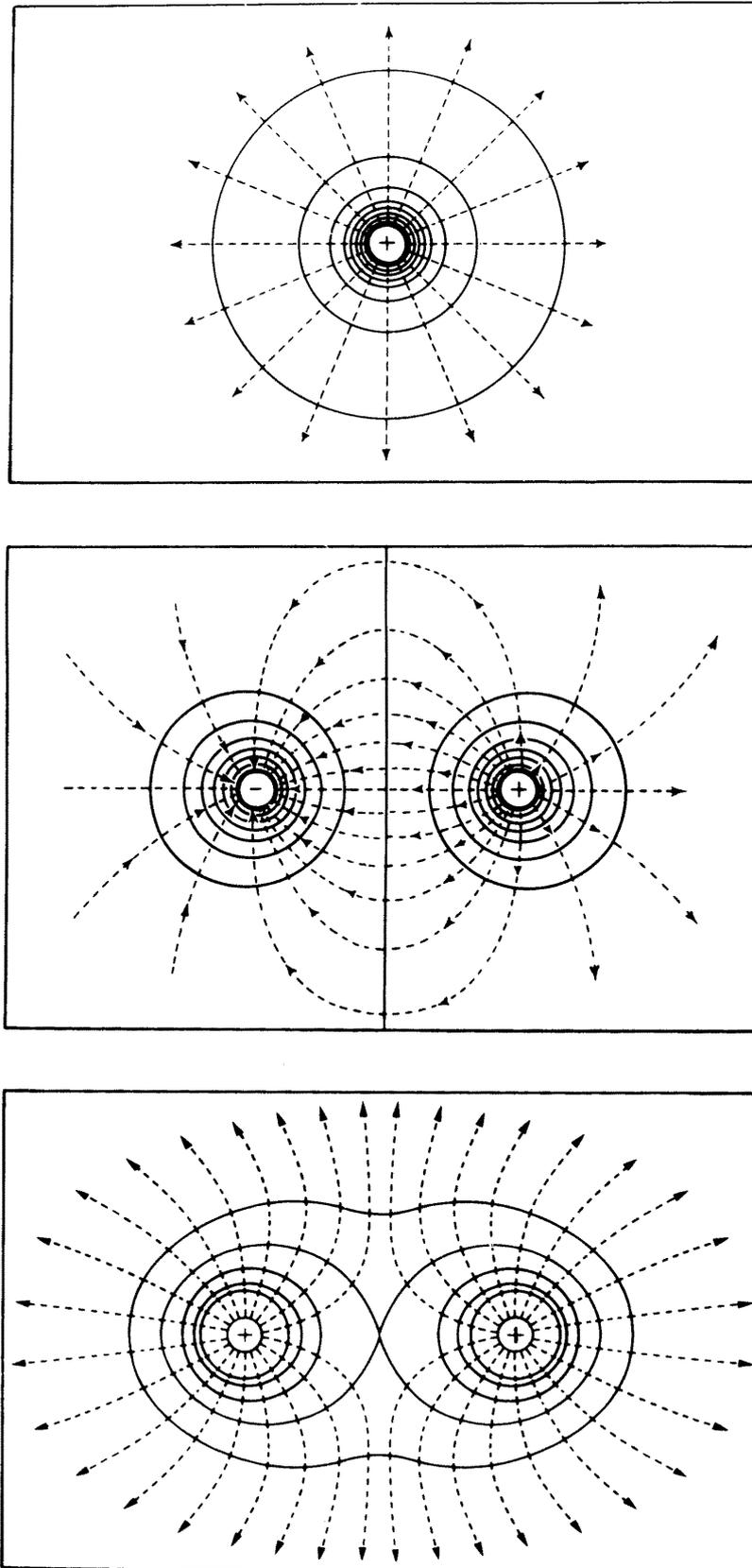
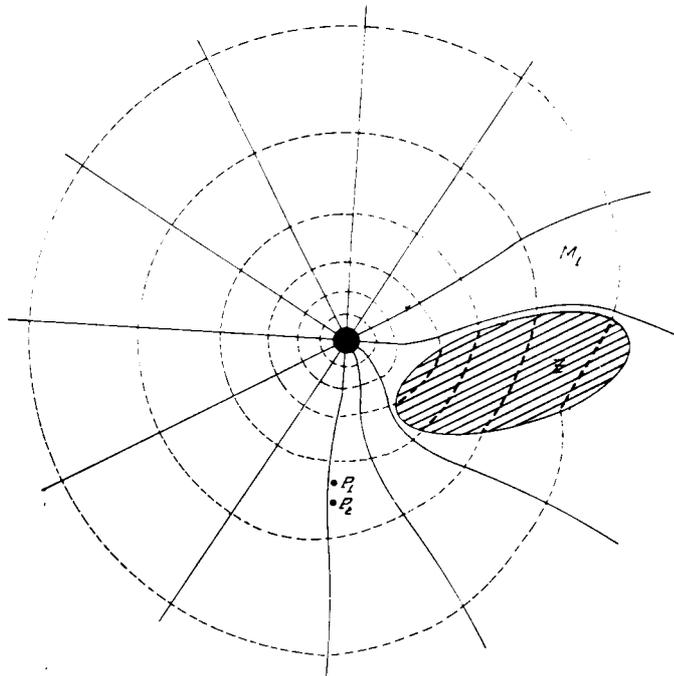
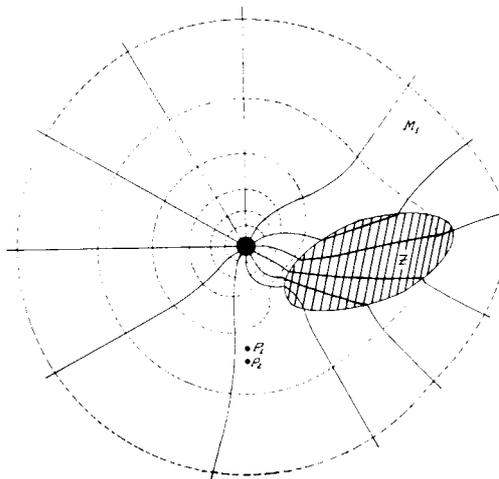


Figure 3-23 Equipotentiels et filets de courant pour différentes configuration d'électrode (en haut : une électrode positive, au milieu : une électrode positive et une négative ; en bas : deux électrodes positives)



Current and potential distribution in the vicinity of an electrode placed in a non-homogeneous ground (resistant body in a conducting medium).



Current and potential distribution in the vicinity of an electrode placed in a non-homogeneous ground (conducting body in a resistant medium).

Figure 3-24 Equipotentiellles et filets de courant à proximité d'un corps résistant (en haut) et d'un corps conducteur (en bas)

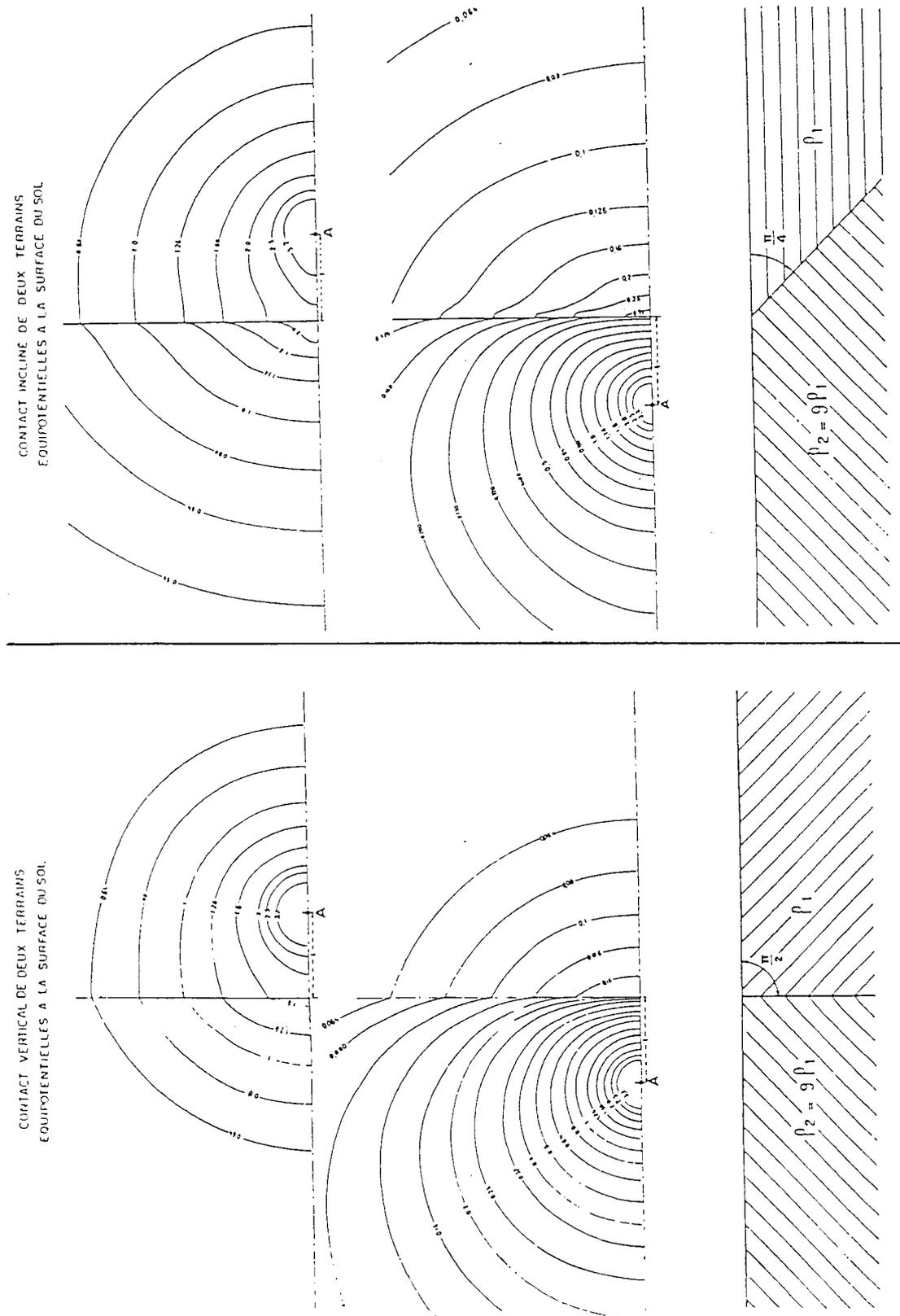


Figure 3-25 Comportement des équipotentiels au contact de deux terrains

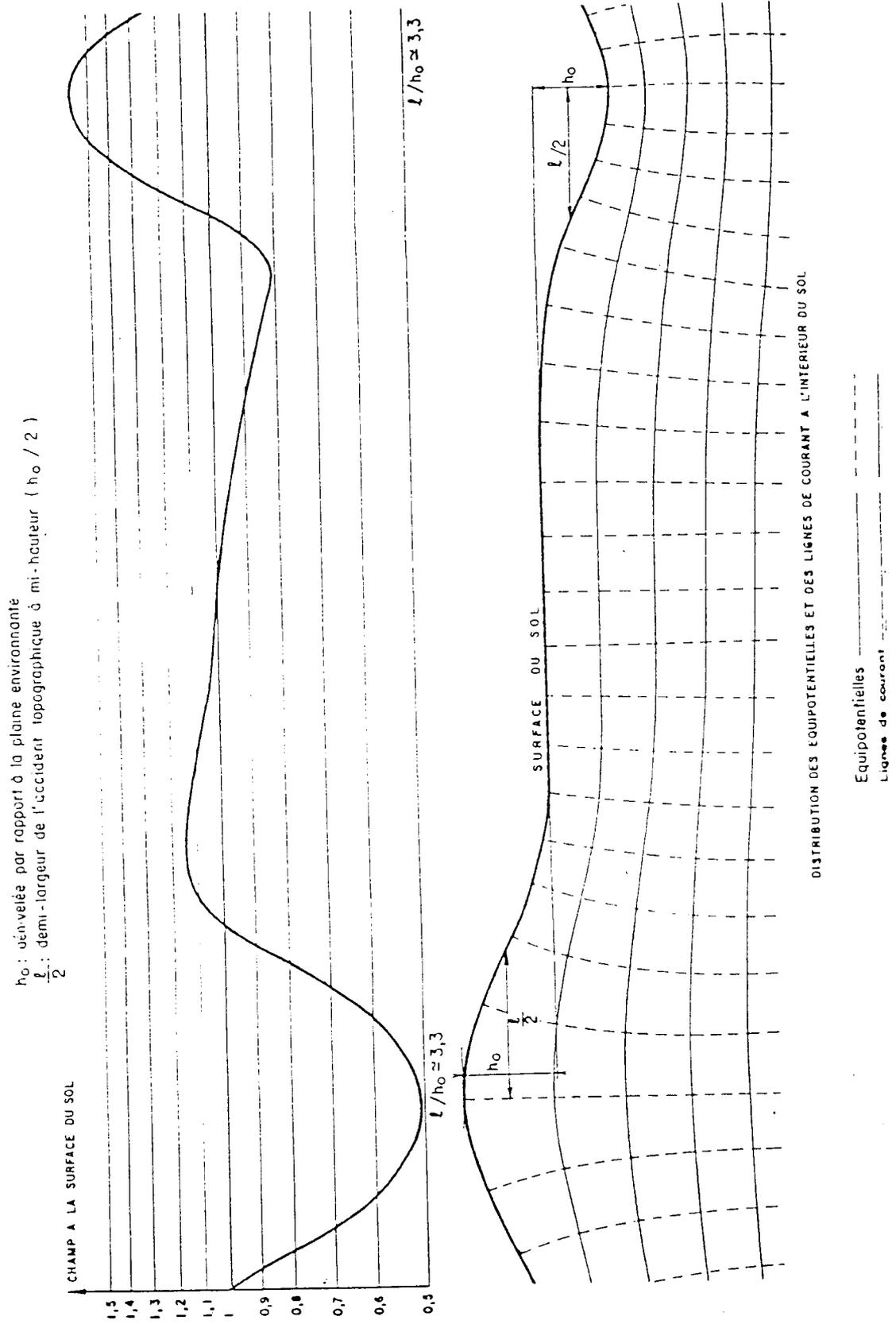


Figure 3-26 Effet de la topographie en terrain non homogène

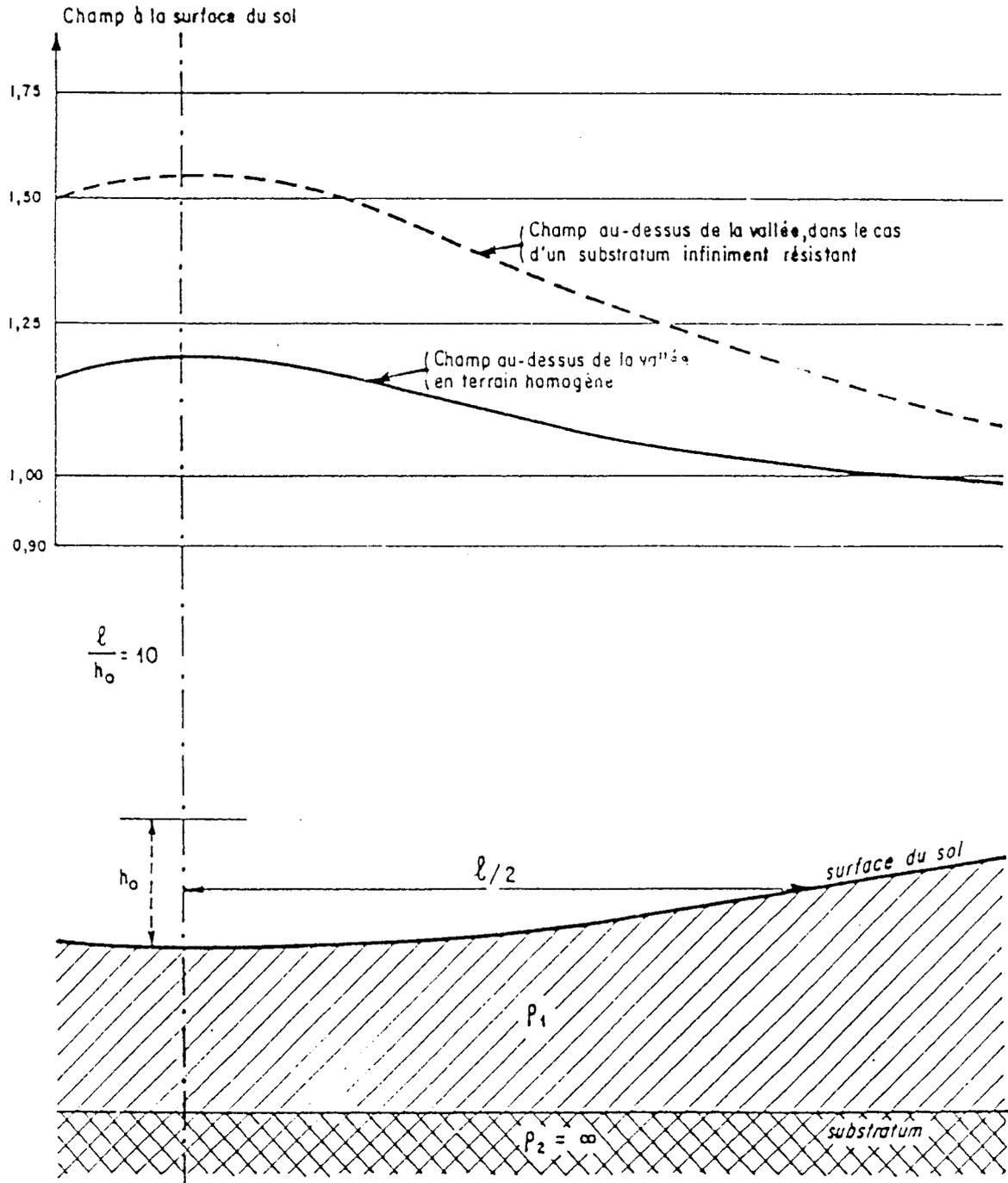


Figure 3-27 Effet de la topographie en terrain homogène

3.2 Les méthodes de prospection

Le but immédiat de la prospection électrique est la détermination de la répartition des résistivités dans le sous-sol.

Nous avons vu que la mesure de la résistance entre deux prises conduit à une impasse de par l'existence d'une forte résistivité de contact. Toutes les méthodes utilisées sont fondées sur la comparaison de la distribution du potentiel créé par l'envoi d'un certain courant avec ce que serait cette distribution dans un milieu homogène.

3.2.1 Les cartes de potentiel

Principe: Les valeurs du potentiel sont mesurées à la surface du sol pour un certain arrangement de pôles d'envoi de courant. Ces valeurs sont reportées sur une carte. On trace alors les courbes équipotentielles et l'on compare avec ce que l'on obtiendrait pour la même disposition d'électrodes en terrain homogène.

Pratiquement, on envoie le courant dans le sol par deux électrodes de signe contraire A^+ et B^- assez éloignées et l'on mesure les différences de potentiel ΔV entre un point de référence M et un point mobile N .

On peut aussi filer les équipotentielles, c'est-à-dire par rapport au point de référence M bouger l'électrode N jusqu'à ce que la différence de potentiel entre MN soit nulle. Les deux électrodes seront alors sur la même équipotentielle .

3.2.1.1 Hétérogénéité locales

Lorsque l'on est en présence de variations plus ou moins locales de la résistivité, un corps **conducteur** par exemple va attirer et concentrer les lignes de courant, les équipotentielles, elles, seront repoussées par le conducteur (Figure 3-24).

A l'inverse pour un corps **résistant**, les filets de courant auront tendance à contourner les obstacles résistants et les équipotentielles se resserreront au voisinage et à l'intérieur de ce corps (Figure 3-24).

Malheureusement, les effets de ces hétérogénéité locales s'atténuent très rapidement avec la distance et deviennent difficiles à mettre en évidence dès que la distance est de l'ordre de grandeur des dimensions du corps perturbateur.

3.2.1.2 Hétérogénéités étendues - faille :

Voici deux exemples (Figure 3-25) montrant l'influence d'une faille sur le tracé des équipotentielles. On constate l'attraction exercée par le terrain résistant sur les courbes équipotentielles du terrain conducteur. On constate aussi que l'on obtient **différentes cartes** selon la position **de l'électrode A**.

3.2.1.3 Influence du relief :

Les accidents du relief perturbent la distribution des potentiels. L'exemple suivant montre que les équipotentielles seront plus **resserrées** au fond des vallées et plus **écartées** au sommet des montagnes (Figure 3-26). Cet effet, en général pas très marqué, peut devenir gênant dans les régions montagneuses. Il dépend aussi du contraste des résistivités, lorsque le terrain superficiel conducteur repose sur un bedrock très résistant, la presque totalité des filets de courant se trouve concentrée dans le conducteur et les moindres dénivellations auront alors un effet important (Figures 3-27).

En résumé:

L'interprétation des cartes de potentiel est difficile

Les terrains qui avoisinent l'électrode jouent un rôle perturbateur parfois prédominant.

La profondeur d'investigation n'est pas constante.

La position du pôle d'envoi de courant joue un rôle important de sorte qu'il faut souvent faire plusieurs cartes pour la même région.

L'influence de la topographie n'est pas négligeable, ...etc.....

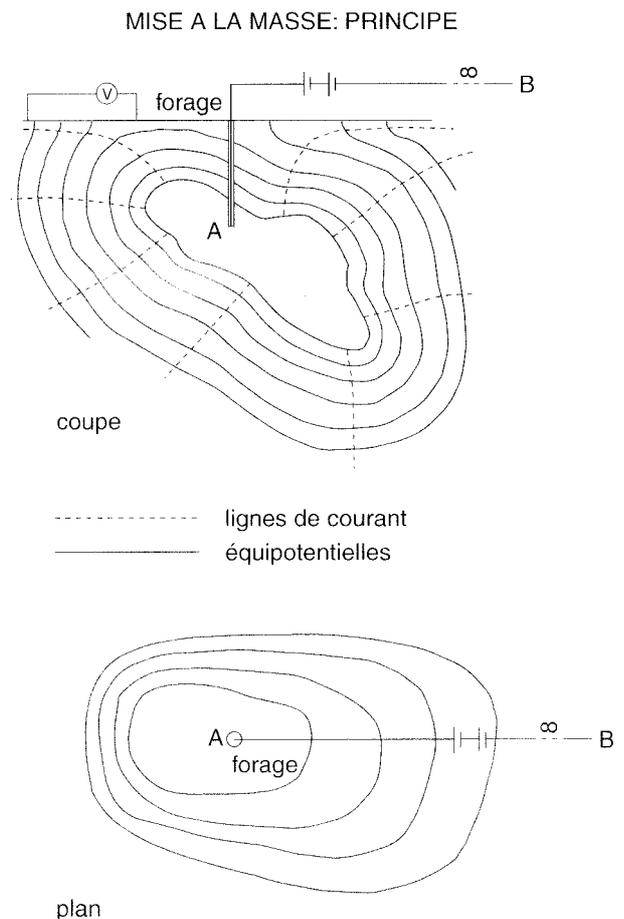
3.2.2 La mise à la masse.

La mise-à-la-masse est une méthode que l'on peut considérer comme un cas particulier des mesures de potentiel. Dans ce cas l'électrode d'émission est remplacée par un gisement **conducteur** dans lequel on injecte le courant. L'ensemble du gisement joue alors plus ou moins le rôle d'électrode, toute sa surface se mettant sensiblement au même potentiel. Cette méthode est utilisée surtout en recherche minière. Il faut pour pouvoir faire de la mise à la masse :

- Que la résistivité du conducteur soit **très faible** et très inférieure à celle de l'environnement.
- Que le conducteur soit **continu**.
- Que le conducteur soit **atteignable** par forage ou **affleurement**.

Les corps conducteurs que l'on peut ainsi cartographier sont généralement les sulfures de cuivre, nickel et plomb.

Le courant tend à s'écouler uniformément depuis le corps conducteur



dans les roches environnantes. Dans des conditions idéales il devrait y avoir un potentiel uniformément réparti à la surface du corps conducteur. En réalité cette répartition est modifiée par la forme du corps, son pendage et son contraste de résistivité avec l'encaissant. Plus le contraste est élevé plus la répartition du potentiel se fait uniformément à la surface du corps minéralisé. Lorsque le contraste diminue la cartographie "potentielle" de la forme du corps est moins précise et à la limite si il n'existe aucun contraste on retrouve une répartition de potentiel hémisphérique.

Lorsque deux corps minéralisés sont proches il peut y avoir un effet de " fuite ". Le courant passe du corps ou se trouve la source de courant dans le corps adjacent. Les voltages mesurés au-dessus du corps adjacent sont moins élevés.

Le pendage peut aussi être déterminé. Les forts voltages sont proches de la partie supérieure et les équipotentielles s'écartent vers le pendage.

Il existe plusieurs façons de placer les électrodes de courant et potentiel, la plus couramment utilisée consiste à placer une électrode de courant A dans le minerais conducteur l'autre étant à l'infini. Le point de mesure est une électrode de potentiel l'autre étant aussi considérée à l'infini.

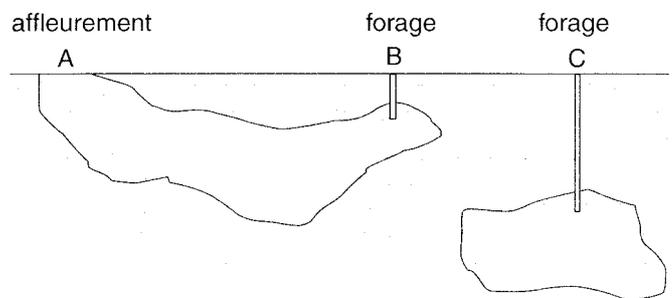
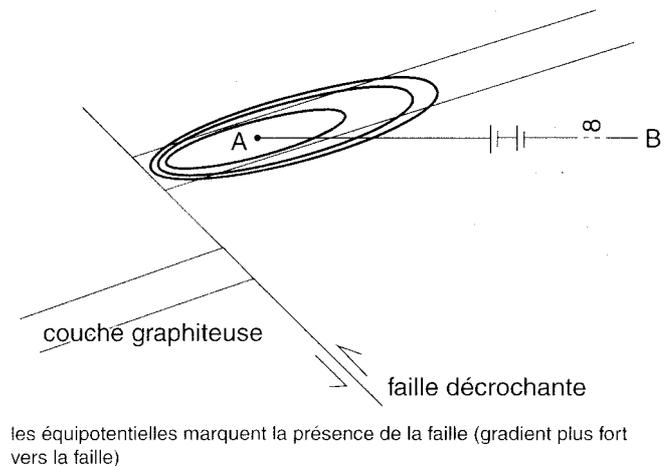
Exemple : prospection de surface (Figure 3-28).

Nous sommes dans ce cas en présence de lentilles de pyrite et de chalcopirite dans un environnement résistant de roches volcaniques. Il s'agit des mines de Selbaie au Canada.

Les lentilles ont été repérées par forage. La première prospection de cette région a montré un élongation vers le nord des équipotentielles permettant de cartographier la lentille principale de cette zone. Le résultat de la deuxième prospection fut une surprise car les équipotentielles sont cette fois à angle droit ce qui suggère des veines minéralisées Est- Ouest. Des forages ont alors été exécutés et un ensemble de lentilles Est Ouest ont été découvertes. Le résultat final est représenté sur la Figure 3-28.

Exemple : prospection en forage (Figure 3-29).

MISE A LA MASSE
APPLICATIONS MINIERES ET STRUCTURALES

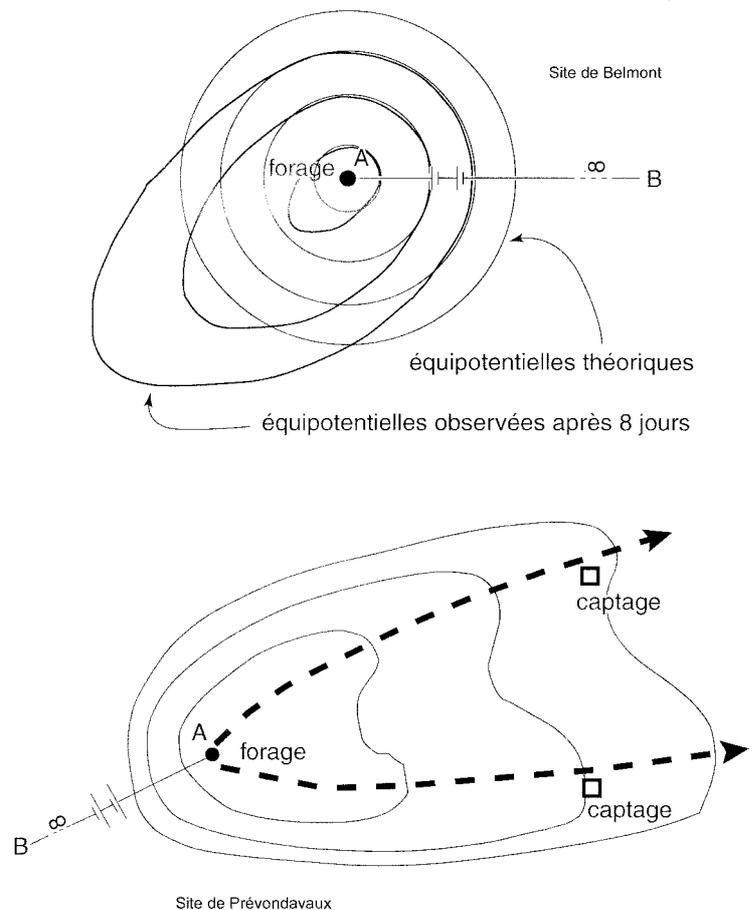


carte obtenue par injection en A \cong carte obtenue par injection en B => même filon massif, bon conducteur
carte obtenue par injection en C différente => pas de connexion avec le corps affleurant

Il est important pour pouvoir calculer les tonnages de savoir si les minéralisations reconnues dans les carottes de forage sont en continuité. Cela ne peut être fait géologiquement car généralement les minéralisations rencontrées dans les forages sont orientées au hasard, parfois elles peuvent être discordantes et elles peuvent être recoupées plusieurs fois par un même forage. La mise à la masse peut être alors utilisée pour rétablir la continuité entre les minéralisation recoupées en plaçant successivement l'électrode de courant à chaque intersection de veines minéralisée et en mesurant les voltages dans des forages adjacents.

Sur cet exemple on remarque que les valeurs élevées des voltages apparaissent en face des sulfures en continuité alors que les filons qui ne sont pas connectés présentent des voltages très inférieurs.

MISE A LA MASSE APPLICATIONS HYDROGEOLOGIQUES



Exemple: prospection hydrogéologique (Figure 3-30)

La méthode de la mise à la masse peut également être utilisée pour déterminer les directions préférentielles de circulation dans l'aquifère. Dans l'exemple de la Figure 3-30, la mise à la masse s'effectue dans le forage MCL1. L'aquifère est mis à la masse et est délimité par les équipotentiels ainsi créés.

Exemple: étude environnementale (Figure 3-30 b)

On notera que cette méthode s'applique également dans le cas d'études environnementales (détection de pollution). Sur cette figure, du sel est injecté au bord de la rivière et les zones de circulation sont mises en évidence à l'aide d'un système d'électrodes de potentiel. Il est même possible d'effectuer un monitoring (étude dans le temps) de la progression du nuage de saumure. On peut donc déterminer avec précision les zones de protection pour le forage.

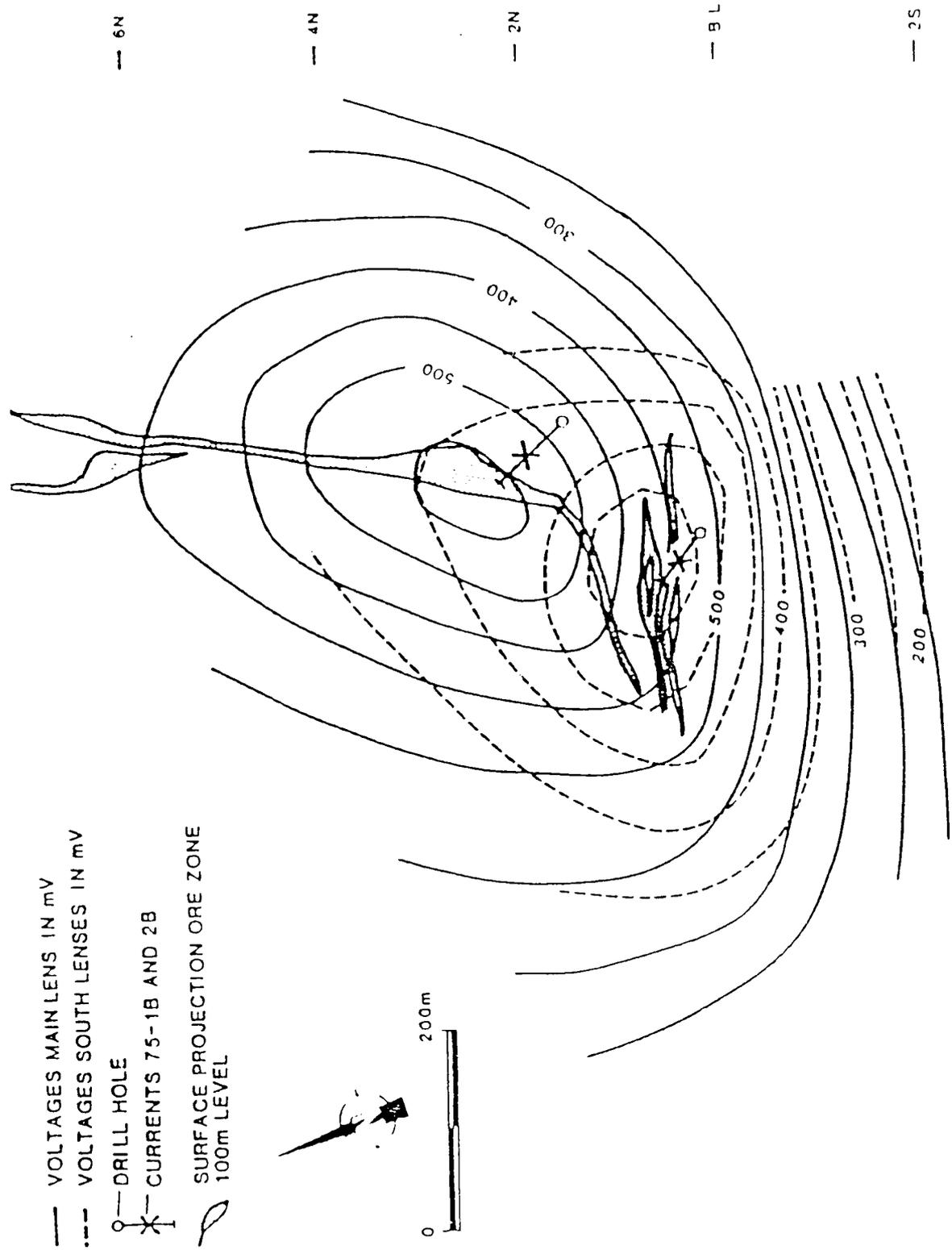


Figure 3-28 Mise à la masse en prospection de surface

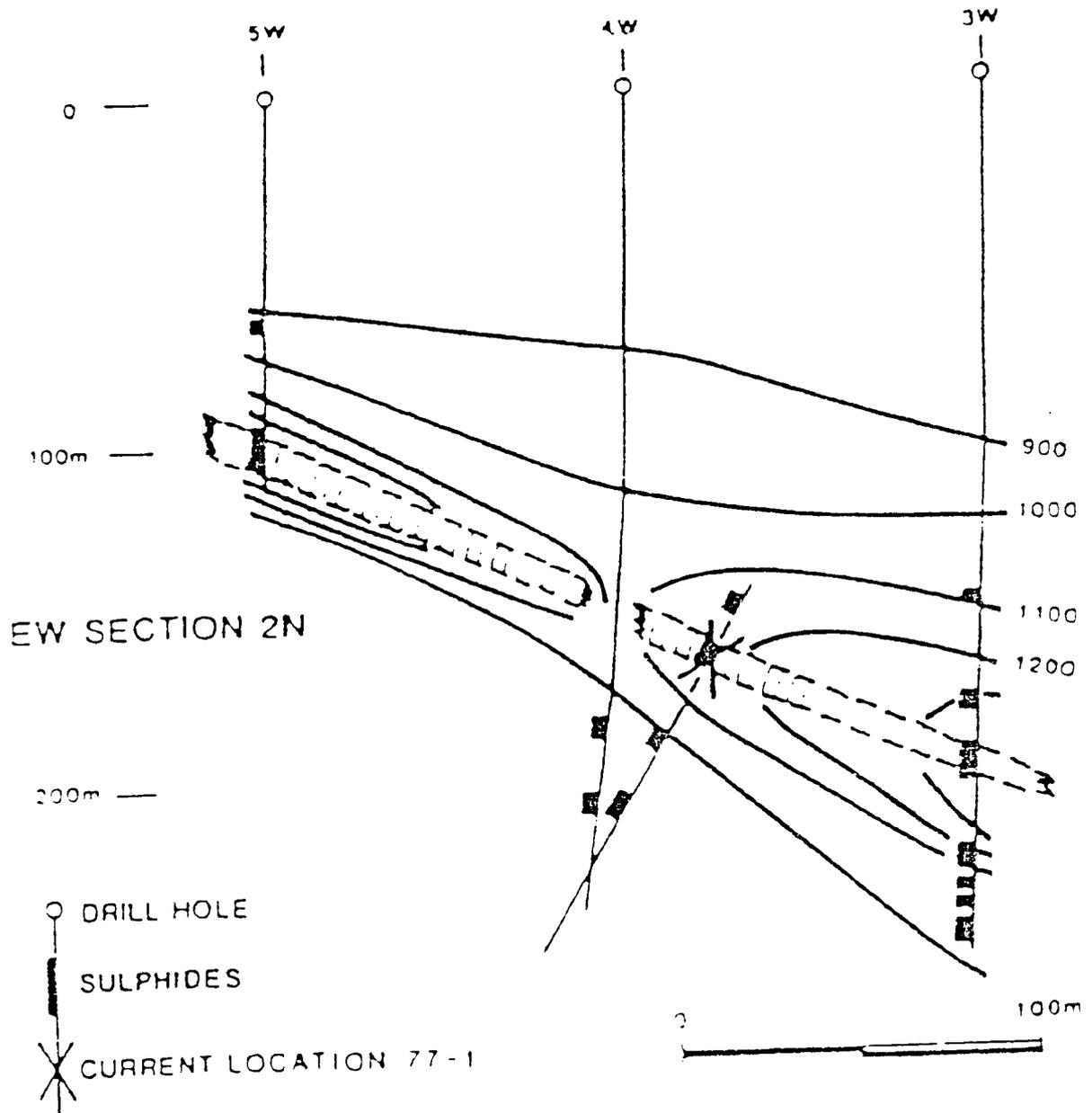


Figure 3-29 Mise à la masse en prospection de forage

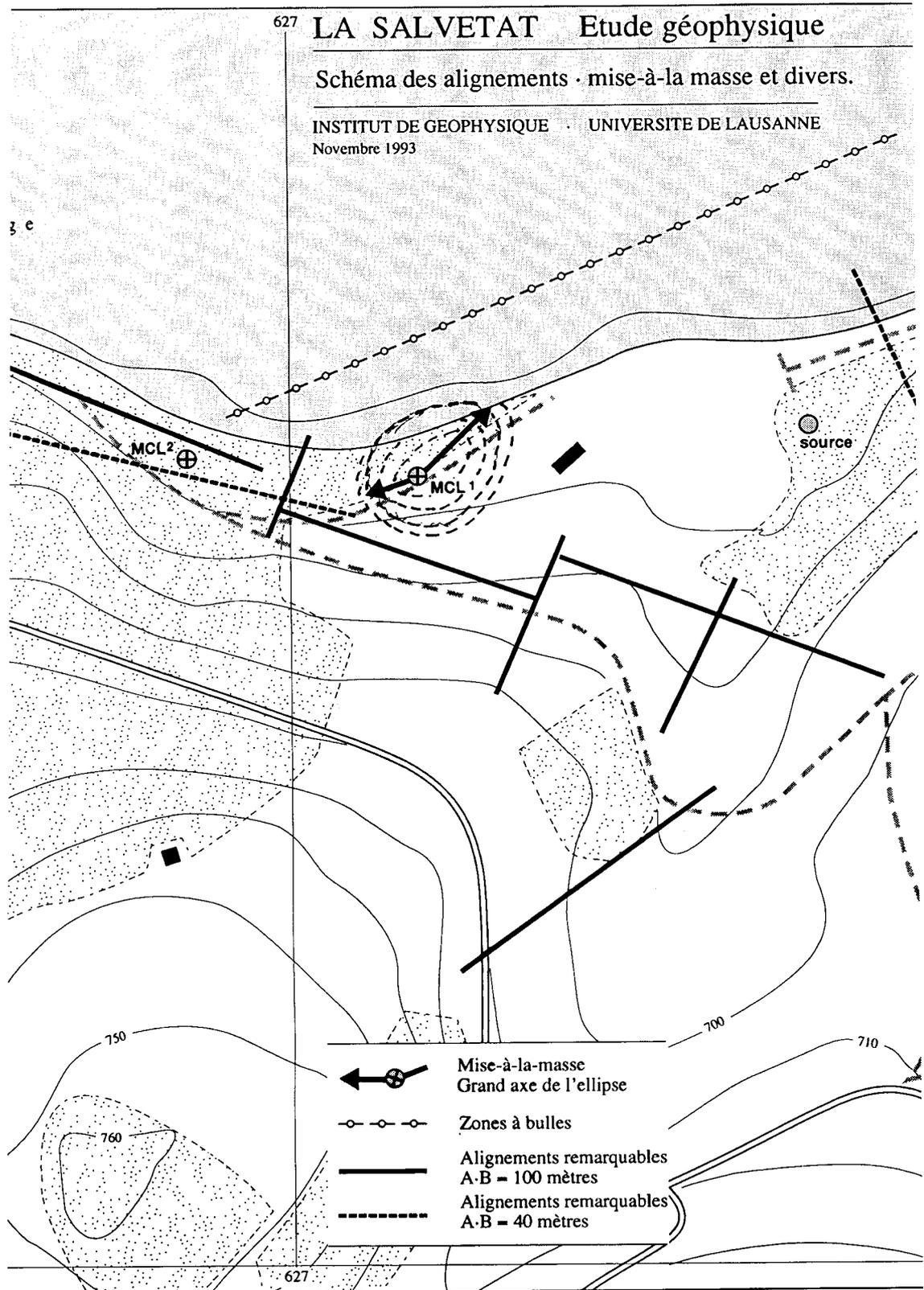


Figure 3-30 Exemple de mise à la masse (La Salvetat)

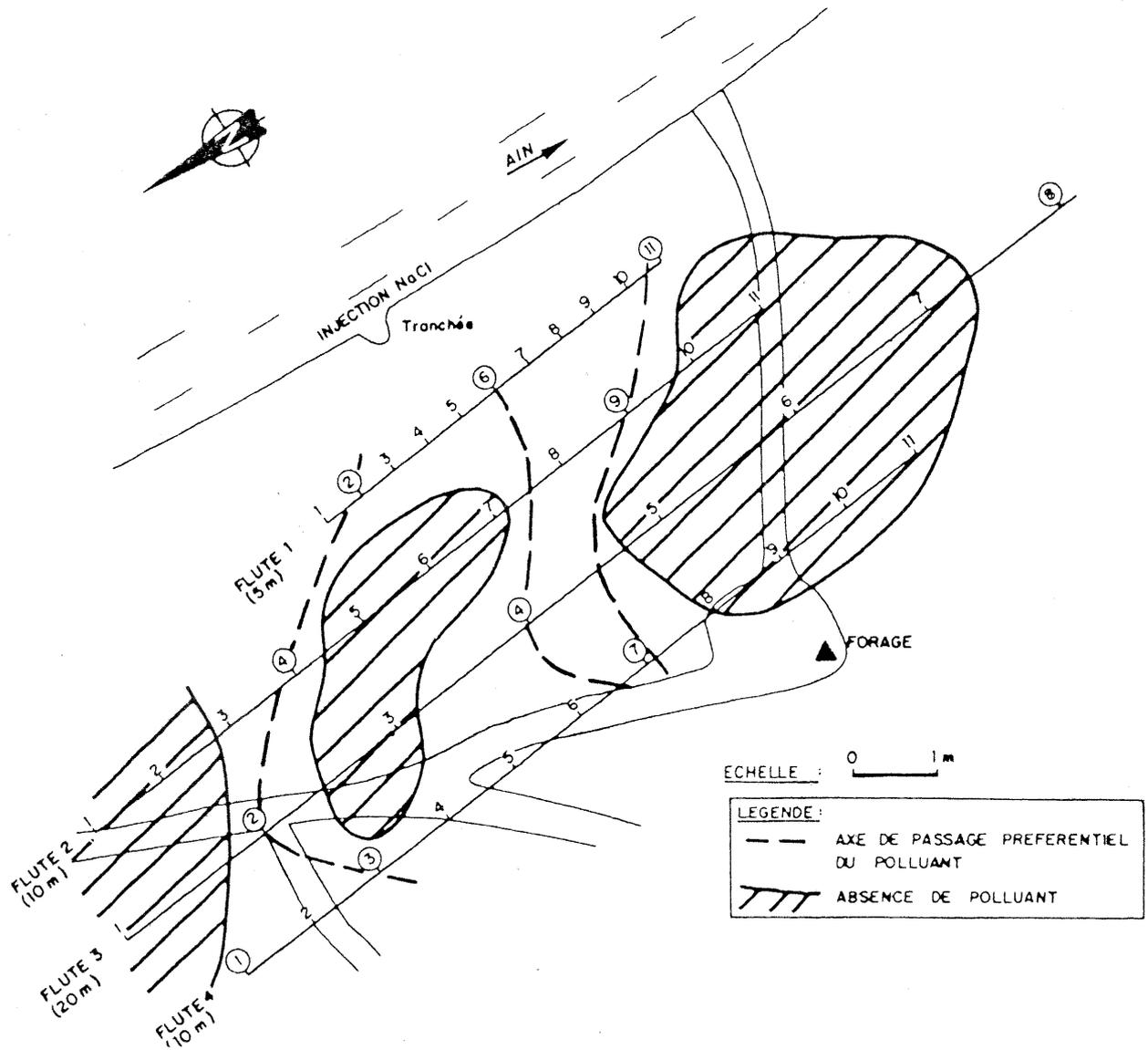


Figure 3-31 b Exemple de mise à la masse lors d'une étude environnementale (Polluant)

Chapitre 4

LES PROFILS ET LES CARTES DE RESISTIVITE

4.1 Introduction

Nous avons vu jusqu'à présent:

- Que l'on pouvait caractériser les roches par leur **paramètre " résistivité "**.
- Que cette résistivité pouvait être mesurée par un dispositif approprié.
- Que ceci débouchait sur une première méthode de prospection qui est l'établissement des **cartes de potentiel**.

Mais nous avons vu aussi que l'établissement d'une carte de potentiel est une méthode longue, fastidieuse, qui demande des corrections topographiques, et que d'autre part il faut souvent établir plusieurs cartes pour différentes positions du pôle d'envoi de courant.

Finalement, l'idée est venue de déplacer solidairement les quatre électrodes AMNB, et d'effectuer ainsi **des profils et des cartes de résistivité**. Nous avons vu en effet que si l'on ferme un circuit d'intensité I à l'aide de deux électrodes A et B, on peut entre M et N mesurer la différence de potentiel créé par le passage du courant (Figure 4-31).

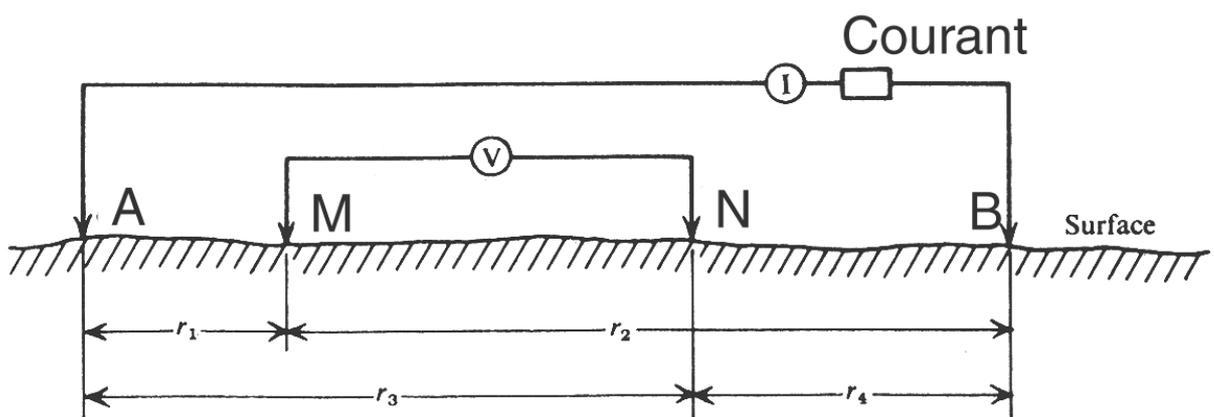


Figure 4-32 Arrangements des électrodes de courant (C1 et C2) et de potentiel (P1 et P2) à la surface d'un terrain homogène et isotrope.

4.2 Principe de mesure - Mise en oeuvre

Les dispositifs sont nombreux et variés, le quadripôle reste le plus répandu.

4.2.1 La source de courant:

On utilise généralement des piles sèches de 90 volts en série. Plus rarement une génératrice à essence couplée avec un redresseur ou une batterie de voiture. Avec les nouveaux appareils 10 piles en série peuvent être utilisées .

4.2.2 Les électrodes d'émission:

Ces électrodes sont généralement constituées par des piquets d'acier. Nous avons vu que la résistance de passage se localise au voisinage immédiat de l'électrode. En effet, supposons une électrode métallique parfaitement conductrice, et calculons la résistance de contact de cette électrode. Nous pouvons calculer la résistance du terrain en r en prenant $L = 1$ m par exemple.

$$dR = \rho \frac{dL}{s} = \rho \frac{dL}{2\pi L^2}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{L} \right)$$

et si nous admettons pour le terrain environnant l'électrode une résistivité ρ de 30 ohms.m et un rayon $r = 0,02$ m, nous obtenons $R = 234$ ohms.

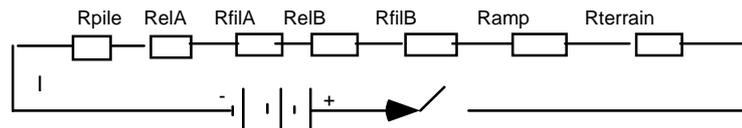
Conclusions: si le courant qui passe par ces électrodes A et B est trop faible on peut

- **soit changer l'électrode et en mettre une de plus gros diamètre**
- **soit l'enfoncer plus profondément**
- **soit diminuer la résistivité du terrain au voisinage de l'électrode, en versant de l'eau salée par exemple**

On comprend alors qu'il est nécessaire de mesurer le potentiel vers le tiers central du dispositif AB afin de s'affranchir de la résistance de contact (qui ne fournit pas d'information sur le sous-sol).

4.2.3 Le circuit de courant

Le courant, pour passer, doit parcourir un circuit fermé. L'équivalent électrique de ce circuit est :



RelA et RelB: résistance électrique de l'électrode A et B et de la portion de terrain située dans leur voisinage immédiat.

RfilA et RfilB : résistance de la ligne d'amenée de courant en A et B

Rpile: résistance interne de la pile, qui limite le courant disponible aux bornes de celle-ci. Cette résistance dépend bien sûr de l'état de la pile neuve ou usagée.

Ramp: résistance de l'appareil de mesure de courant

Rterrain: résistance apparente équivalente à la portion de terrain dans laquelle passe le courant I. Cette résistance est faible vu la section et la longueur du conducteur.

Si nous appliquons la loi d'ohm au circuit, calculons le courant I pouvant être injecté:

$$I = \frac{U_r}{R_{pile} + R_{elA+B} + R_{filA+B} + R_{amp} + R_{terrain}}$$

A titre d'exemple: soit une tension de 3 piles de 90 volts, soit 270 volts (U_r)

R_{pile} : 3 x 20 Ω	60 Ω
R_{amp}	1 Ω
$R_{fil A et B} = 400 \times 0,1 \times 2$	80 Ω
$R_{el A et B} = 234 \times 2$	468 Ω
$R_{terrain}$	<u>10 Ω</u>
total	619 Ω et $I = 270 \text{ volts} / 619 \Omega = 0,436 \text{ amp.}$

(La résistance du fil est environ de 0,1 ohms par mètre, la longueur du fil A et B est de 400m)

4.2.4 Les électrodes de mesure de potentiel M et N

La mesure de I ne pose pas en fait de réels problèmes, la mesure de ΔV est plus délicate. En effet, dans le sol, M et N s'oxydent de façon différente et sont polarisées. On parle de **polarisation spontanée des électrodes**.

Pour limiter le plus possible le plus efficacement possible le phénomène de polarisation des électrodes, on choisit pour confectionner les électrodes des métaux chimiquement assez stables (cuivre, plomb). Cependant du fait de l'état d'oxydation différent sur la surface des deux électrodes une différence de potentiel apparaît entre M et N en l'absence de tout courant extérieur. Cette différence **doit être éliminée**. On utilise par exemple des électrodes impolarisables ou, le plus souvent, on compense ce potentiel parasite à l'aide d'une petite source de tension auxiliaire ajustable.

Une fois cette compensation effectuée, on peut mesurer le ΔV dû au passage du courant que l'on envoie entre A et B. Dans certains cas, le ΔV devient trop petit pour être mesuré convenablement, on remédie à cette difficulté de la façon suivante:

- On augmente la sensibilité de l'appareil
- On augmente la distance entre M et N. En effet, sur le graphique de l'évolution du champ et du potentiel, on remarque qu'agrandir MN correspond à augmenter ΔV . Cependant, un MN très grand devient très réceptif à toutes sortes de courants **parasites** tels que:
 - ◆ Une composante variable du réseau 50 hertz
 - ◆ Une autre composante 16 hertz provenant des lignes de chemin de fer
 - ◆ Des courants très variables dans le temps, non périodiques, dus à l'enclenchement de machines diverses
 - ◆ Des courants dus à des phénomènes naturels, telluriques, foudre, etc..

4.3 Le calcul de la résistivité

Ayant mesuré ΔV et I , il ne nous reste qu'à calculer la résistivité. Dans un milieu homogène de résistivité ρ avec deux pôles A et B, l'action conjuguée de A et B donnera :

potentiel en M

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right)$$

potentiel en N

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)$$

ΔV entre M et N

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

$$\text{et } \rho = \frac{K dV}{I} \quad \text{avec} \quad K = \pi \frac{AM * AN}{MN}$$

pour un dispositif symétrique par rapport à O milieu de AB (dV en millivolts, I en milliampères, ρ en ohms.m, K = **facteur géométrique** qui dépend de l'espacement entre les électrodes).

Si le sous-sol est homogène et isotrope, avec un dispositif de ce type on obtiendra **la résistivité vraie**. Si par contre, le sous-sol est hétérogène, on mesurera **la résistivité apparente**, qui est fonction de la nature du sous-sol et de la dimension du dispositif utilisé.

Les résultats que l'on obtient en maintenant constante la distance entre A, B, M, et N, l'ensemble se déplaçant le long d'un profil, servent à établir **les profils et cartes de résistivité**.

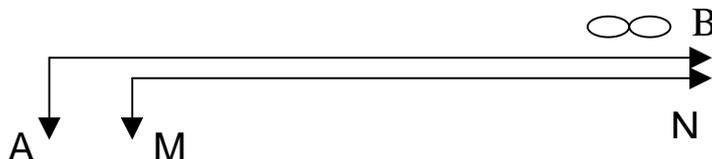
Une carte de résistivité apparente dessinée à partir de plusieurs profils est une carte des **anomalies relatives** qui se rapporte à une **longueur et une orientation sensiblement**

constante de tout le dispositif de mesure. En effet, à une longueur déterminée de AMNB correspond une profondeur d'investigation à peu près constante, donc à l'étude d'une tranche de terrain **d'épaisseur et de largeur déterminées**. Les dimensions du dispositif seront donc choisies en **fonction du problème à traiter**. Il est souvent nécessaire de dresser des cartes avec plusieurs longueurs de ligne pour pouvoir interpréter correctement les résultats.

4.4 Les dispositifs utilisés

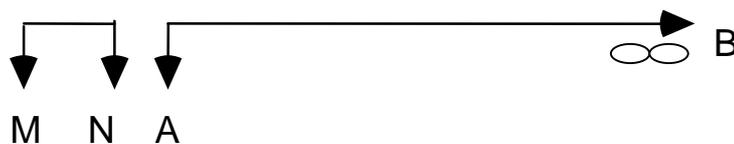
Pour l'établissement d'une carte de résistivité les dispositifs les plus variés peuvent être envisagés. Tout dispositif de mesure comporte en fait quatre électrodes, deux A et B, pour l'envoi de courant "circuit d'émission" et deux M et N, pour la mesure du potentiel ΔV "circuit de mesure".

4.4.1 Les dipôles ou pôle - pôle



Les électrodes B et N sont placées à l'infini, on ne s'occupe que de A et M. Ce dispositif est théoriquement simple puisque le potentiel mesuré en M est dû à A seul. Dans la pratique cependant ce dispositif est encombrant à cause de la longueur des câbles nécessaires pour rendre négligeable l'effet des électrodes placées à l'infini.

4.4.2 Les tripôles ou pôle - dipôle

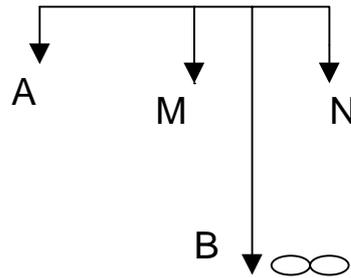


On ne rejette à l'infini qu'une des quatre électrodes, on obtient un tripôle AMN ou ABM. En vertu du principe de réciprocité, on peut théoriquement utiliser ABM ou AMN. En fait le dispositif avec MN très écarté est peu commode car l'influence des vagabonds et des telluriques devient prépondérante.

Le tripôle le plus courant est celui où les trois électrodes sont disposées sur une même ligne droite, A étant à l'extérieur de MN. De plus généralement, ou bien ces trois électrodes sont équidistantes, ou bien la distance MN est petite par rapport à AN.

On peut aussi, au lieu de rejeter B assez loin pour que son influence soit négligeable, le placer de manière qu'il crée le même potentiel en M et N. En milieu homogène, il suffit de le placer sur la **médiatrice** de MN. Ainsi, l'effet de B s'élimine des ΔV mesurés. En pratique,

il faut éloigner B suffisamment pour que les dissymétries introduites par la non-homogénéité du sous-sol puissent être négligées.



Les tripôles présentent l'intérêt de n'exiger que le déplacement de trois prises et moins de câble ce qui peut présenter parfois un certain avantage, cependant leur caractère dissymétrique leur fait en général préférer les quadripôles complets.

4.4.3 Les quadripôles

Dans la plupart des quadripôles utilisés, les quatre prises sont disposées sur un même alignement (Figure 4-32). Les deux électrodes de mesure M et N sont le plus souvent, à l'intérieur de l'intervalle AB et en général symétriques par rapport au milieu O de cet intervalle. Parfois il peut être intéressant d'utiliser un dispositif dissymétrique, M et N étant beaucoup plus près de l'un des pôles d'envoi, l'influence du second pôle est alors très faible. Les deux quadripôles les plus utilisés sont:

- **Le Wenner:** toutes les électrodes sont équidistantes, $AM = MN = NB = AB/3$
- **Le Schlumberger:** La distance MN est petite par rapport à AB. En général $MN < AB/5$

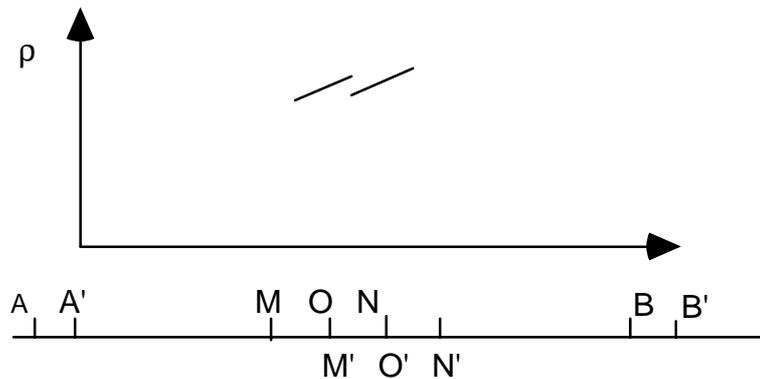
Le dispositif Wenner présente l'avantage d'avoir une plus grande ligne MN ce qui facilite la mesure de ΔV ; avec les voltmètres modernes cet avantage a perdu de son importance. De plus un grand MN est toujours beaucoup plus affecté par les parasites.

Il existe aussi un dispositif où MN est à l'extérieur de AB. Ce dispositif est appelé "double dipôle". L'avantage de celui-ci est de n'exiger que des longueurs de câble beaucoup faibles pour une profondeur d'investigation donnée. Il nécessite cependant un appareillage très sensible, car si la profondeur d'investigation croît avec la distance entre A et B, le ΔV que l'on mesure entre M et N décroît avec le cube de cette distance (dans un Schlumberger le ΔV décroît avec le carré de cette distance).

Une des variantes des quadripôles alignés consiste à placer une des électrodes à l'intérieur de l'intervalle AB. Pratiquement, on utilise ce branchement avec un dispositif Wenner.

La comparaison obtenue avec les trois branchements, Wenner alpha, beta et gamma, permet de se rendre compte de l'influence de la zone proche de chacune des électrodes et peut faciliter l'interprétation.

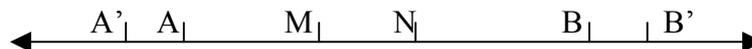
4.4.4 Les multipôles



Il est possible d'ajouter une électrode supplémentaire de mesure de ΔV en O milieu de MN. Ce dispositif s'appelle le dispositif de LEE. On peut alors soit exécuter un traîné à répétition: On mesure ΔV entre MO et ON, puis l'ensemble est décalé d'un bond égal à OM. les résultats sont représentés au milieu des segments MO et ON, pour une position donnée de AB, on obtient deux points que l'on réunit par un segment de droite. La succession des segments de droite montrera les effets du passage de AB sur les accidents. On peut aussi inscrire la moyenne entre les mesures avant arrière.

4.4.5 Le traîné multiple

Des mesures avec une seule longueur de ligne sont souvent insuffisantes, d'autant plus que leur profondeur d'investigation peut varier avec la succession des résistivités dans le sous-sol. Au lieu de refaire plusieurs fois les mesures, on peut employer des traînés simultanés à plusieurs longueurs de lignes. Un même MN sert successivement à la mesure de ΔV pour l'envoi de courant entre A' B' et AB. L'ensemble du dispositif est ensuite décalé le long du profil.



L'avantage de ce dispositif est qu'il permet de mieux distinguer les à-coups-de-prise. Bien entendu, ces dispositifs multiples nécessitent l'emploi de câbles spéciaux à nombreux conducteurs. Ceci est d'ailleurs la base des Pseudos sections.

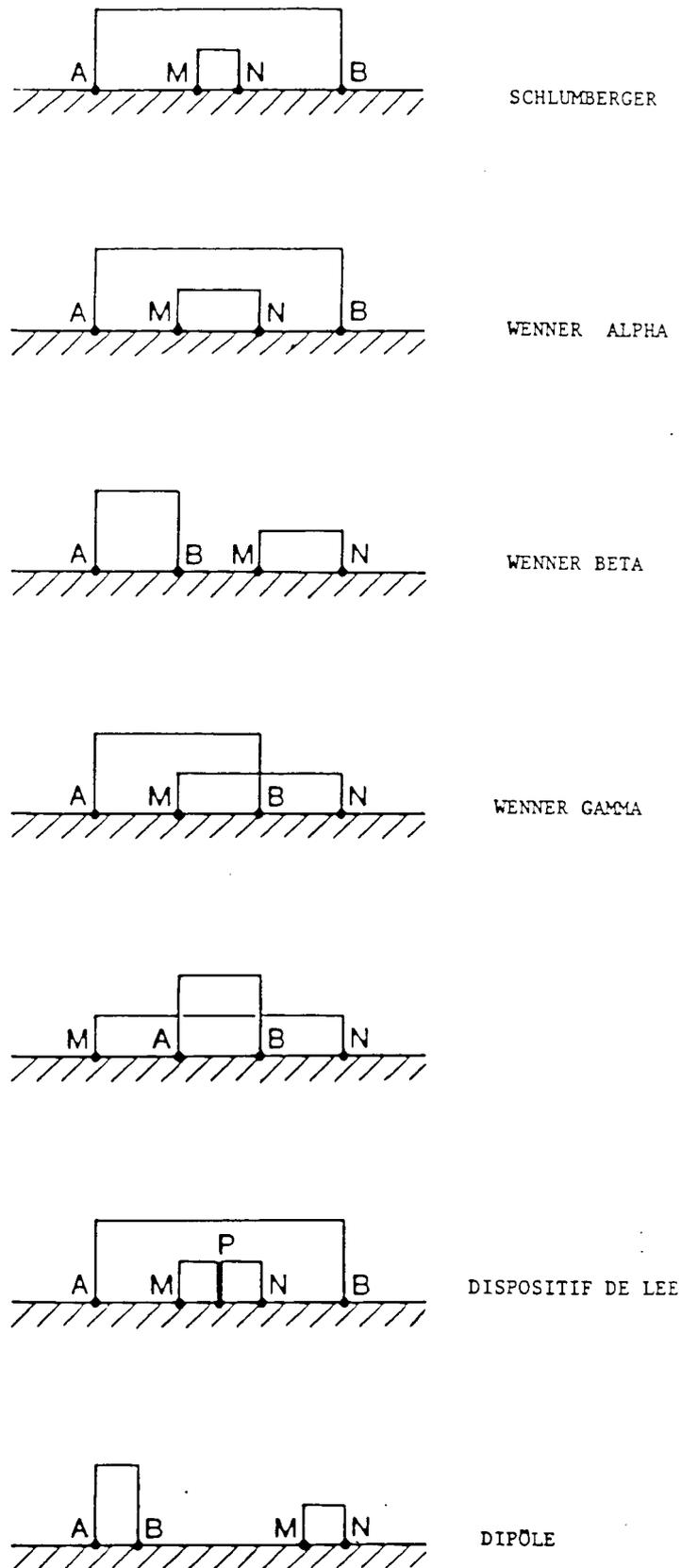
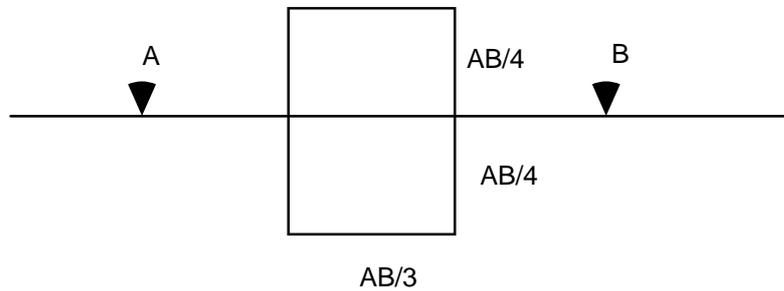


Figure 4-33 Les principaux dispositifs quadripôles.

4.4.6 Le dispositif rectangle



Enfin, on peut aussi utiliser un dispositif où toutes les électrodes ne sont pas sur la même droite, le plus couramment utilisé est celui dit " du rectangle AB ". MN reste sur l'alignement de AB généralement dans le 1/3 central à une distance inférieure à AB/4.

Dans le rectangle ainsi défini, le champ, nous l'avons vu, est à peu près constant. La distance entre M et N est toujours très petite, 1/25 à 1/50 de AB. On obtient avec ce procédé une petite carte de résistivité apparente en maintenant la position de A et B fixe. On ne bouge alors que MN. L'inconvénient est qu'il faut calculer K, le facteur géométrique, pour chaque position de MN et que la profondeur d'investigation n'est pas constante. On peut effectuer des corrections pour corriger cet effet qui fait qu'il est souvent difficile de raccorder entre eux des rectangles voisins.

4.4.7 Le dispositif carré

Enfin il existe un dispositif particulier destiné à mettre en évidence des phénomènes d'anisotropie. Les électrodes sont arrangées selon un carré et les mesures se font de la façon suivante :

Modèle	Configuration	Position des électrodes																
	α β χ	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>M</td> <td>N</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>N</td> <td>M</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>M</td> <td>B</td> <td>N</td> </tr> </table>	1	2	3	4	A	M	N	B	A	B	N	M	A	M	B	N
1	2	3	4															
A	M	N	B															
A	B	N	M															
A	M	B	N															

$$\rho_m = \frac{2\pi a}{2 - \sqrt{2}} \left(\frac{R\alpha + R\beta}{2} \right)$$

$$AIR = 2 \left(\frac{R\alpha - R\beta}{R\alpha + R\beta} \right)$$

On obtient ainsi des résistivité moyenne et un coefficient d'anisotropie. Quelque soit le dispositif employé, il est caractérisé par une certaine profondeur d'investigation, et un certain pouvoir de résolution.

Le tableau suivant donne pour quelques dispositifs les profondeurs d'investigation et le pouvoir de résolution. **On remarque que pouvoir de résolution et profondeur d'investigation varient en sens inverse.** Pour le dipôle-dipôle la profondeur d'investigation dépend de l'espacement entre les deux électrodes les plus externes.

Dispositifs	← L →				Prof. D'investigation		Pouvoir de résolution
					Roy 1971	Baker 1989	
Wenner	I+	P1	P2	I-	0.11L	0.17L	1/2,25
Schlumberger	I+	P1	P2	I-	0.125L	0.19L	1/2,45
Dipole-Dipole	I+	I-	P1	P2	0.195L	0.25L	1/3,45
Pole-Pole	I+			P1	0.35L		1/8,4

4.5 Espacement des mesures

Qu'il s'agisse de l'un ou l'autre de ces dispositifs, on déplace le tout suivant l'alignement des électrodes en traînant l'ensemble des câbles, d'où le nom de traîné. L'intervalle entre les mesures successives dépendra de la précision avec laquelle on veut localiser les accidents. Il est en général égal à AB pour les études de reconnaissance, pour les études de précision (repérage de zones fracturées) on peut utiliser un pas de mesure égal à MN ce qui conduit à une exploration continue du profil. Le même travail est ensuite repris sur des profils parallèles et équidistants. Là encore, la distance entre profils dépendra de la précision, cette distance peut être supérieure ou égale à la distance entre mesures successives. Le plus souvent, les profils auront été orientés normalement à la direction des accidents étudiés.

4.6 La sensibilité des dispositifs.

Il est possible de représenter la fonction de sensibilité des différents dispositifs pour un terrain homogène (Figure 4-33). Cette fonction nous permet de savoir à quel point les variations de la résistivité dans une région influenceront la mesure de la différence de

potentiel. Plus la valeur de cette fonction est élevée, comme c'est le cas à proximité des électrodes, plus elle influencera la mesure du potentiel. On constate immédiatement que les valeurs de cette fonction diffèrent selon les dispositifs. Ils vont donc chacun avoir leurs caractéristiques propres et donc être influencés de manière différente par la géométrie des corps à étudier. Un Wenner sera plus sensible à une variation verticale de la résistivité (la fonction est étalée horizontalement) alors qu'un dipôle-dipôle sera influencé par une variation horizontale de la résistivité (fonction étalée verticalement). Un Schlumberger présente un comportement intermédiaire. Ceci est surtout valable à grande distance des électrodes.

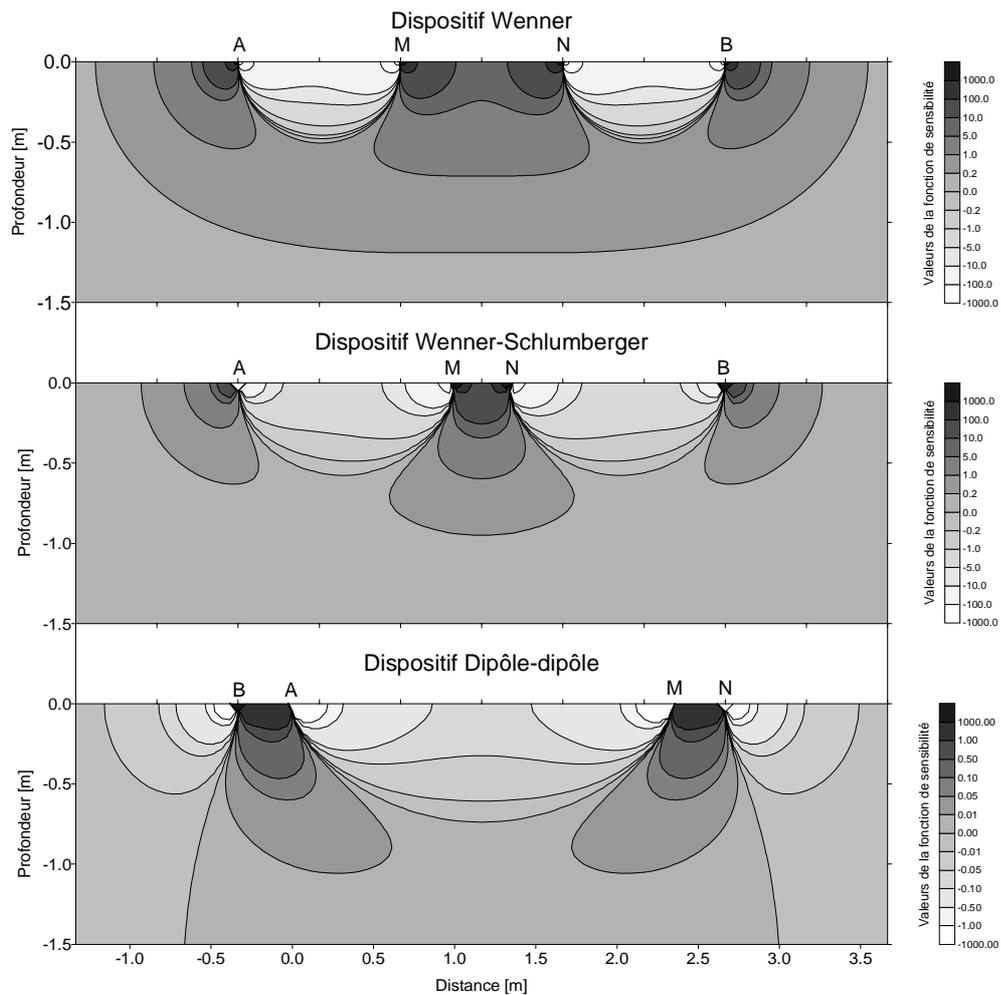


Figure 4-34 Valeurs de la fonction de sensibilité pour les dispositifs les plus courants

4.7 La représentation des résultats

La représentation des résultats obtenus ne pose aucun problème particulier.

Pour les dispositifs symétriques, on reporte au centre du dispositif la valeur de la résistivité apparente obtenue. Dans le cas des dispositifs dissymétriques, MN extérieurs par exemple, on convient de reporter les résultats à l'aplomb du milieu des électrodes MN. Cette convention est arbitraire.

Il est important de pouvoir, en tout temps, disposer des données brutes (voir feuille de données, avec la longueur de ligne, l'espacement des mesures, les valeurs mesurées). Dans le dossier on doit aussi trouver un plan de situation de l'étude avec l'échelle, les coordonnées, les renseignements topographiques ,...

Les résultats d'un ensemble de profils (Figure 4-34) sont représentés sous forme de **cartes de résistivités apparentes** (Figure 4-41), chacune correspond à une longueur de ligne bien définie qui doit être indiquée. A l'emplacement O de tous les milieux de MN on inscrit la valeur de la résistivité apparente obtenue, on trace en suite par interpolation entre les points de mesure des courbes d'égale valeur de cette résistivité.

Dans tous les cas, une carte de résistivité doit être accompagnée de la longueur de ligne utilisée, de l'échelle, de l'espacement des mesures, d'une légende permettant de localiser l'étude.

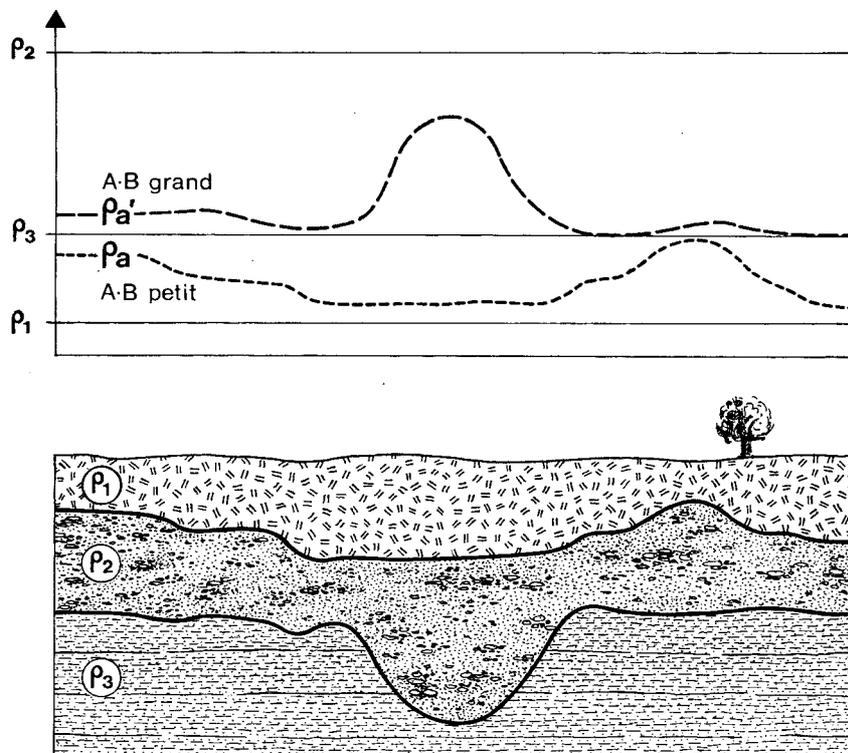


Figure 4-35 Variations des résistivités apparentes avec la longueur AB de la ligne d'émission
($\rho_2 > \rho_1 < \rho_3$)

4.8 Effets des différentes structures

Dans certains cas simples, il est possible de calculer ce que doit être la répartition de la résistivité apparente lorsque le sous-sol n'est pas homogène. La méthode des images de Thomson permet en effet de prévoir, qualitativement du moins, ce que doit être la distribution des potentiels et de la résistivité apparente. Les profils et cartes de résistivité obtenus au-dessus d'un sous-sol de constitution déterminée dépendent du dispositif de mesure utilisé et de son orientation.

4.8.1 Effet d'une conduite enterrée (Figure 4-35)

Supposons un tuyau métallique enterré, infiniment conducteur. On voit que le tuyau est sensible pour un dispositif parallèle jusqu'à la distance AO. Si le dispositif est rigoureusement perpendiculaire au tuyau, ce dernier agit peu, sauf pour certaines distances critiques comme $h = AO$ par exemple.

4.8.2 Effet d'un contact vertical (Figure 4-36)

Voici le profil de résistivité apparente que l'on obtiendrait perpendiculairement à un contact vertical entre deux terrains de résistivité différente avec un AB très grand et un MN infiniment petit. Dans la pratique, les dimensions de AB et MN sont finies et l'allure de la courbe des résistivités apparentes se complique par des variations brusques que l'on appelle des à-coups de prise. On voit sur la Figure 4-36, les à-coups de prise dus au passage de MN et de AB au-dessus de la faille.

4.8.3 Effet de couches minces (Figures 4-37, 4-38)

L'effet des couches minces dépend du pendage. L'effet d'une couche mince **conductrice** est maximum si elle est **horizontale**, presque nul si cette couche est verticale (fracture conductrice). C'est l'inverse pour les couches minces **résistantes**, l'effet est alors **maximum** quand elles sont verticales.

4.8.4 Effet de couches minces (Figures 4-39, 4-40)

De même pour un cylindre, si le cylindre est résistant, il provoquera une anomalie plus nette sur les profils qui lui sont perpendiculaires. Un dôme peut être considéré comme un cylindre tronqué. Un dôme résistant ne modifiera le champ que de 10% quand l'épaisseur du recouvrement est égale au diamètre du dôme.

Si ces à-coups sont assez faciles à mettre en évidence quand il s'agit de couches épaisses, ils deviennent plus gênants lorsque les couches sont minces. La Figure 4-37 montre ce que l'on obtiendrait au-dessus d'une couche verticale conductrice dont l'épaisseur serait égale à la moitié de AB. Voici aussi le profil de résistivité que l'on obtiendrait au passage d'un mur résistant (Figure 4-38).

D'une manière générale, les pôles AB ne provoqueront des à-coups de prise importants qu'en présence de changements de résistivité affectant de gros volumes. Tout au contraire, les Hétérogénéités locales donnent surtout des à-coups au moment du passage des électrodes M et N. C'est ce que nous montre cette figure. On obtient une anomalie marquée au moment du passage de M et N, qu'il s'agisse d'une demi-sphère ou d'un cylindre. Par contre, les à-coups de AB seront d'autant plus réduits qu'il s'agit d'un accident superficiel d'extension faible comme c'est le cas pour la demi-sphère.

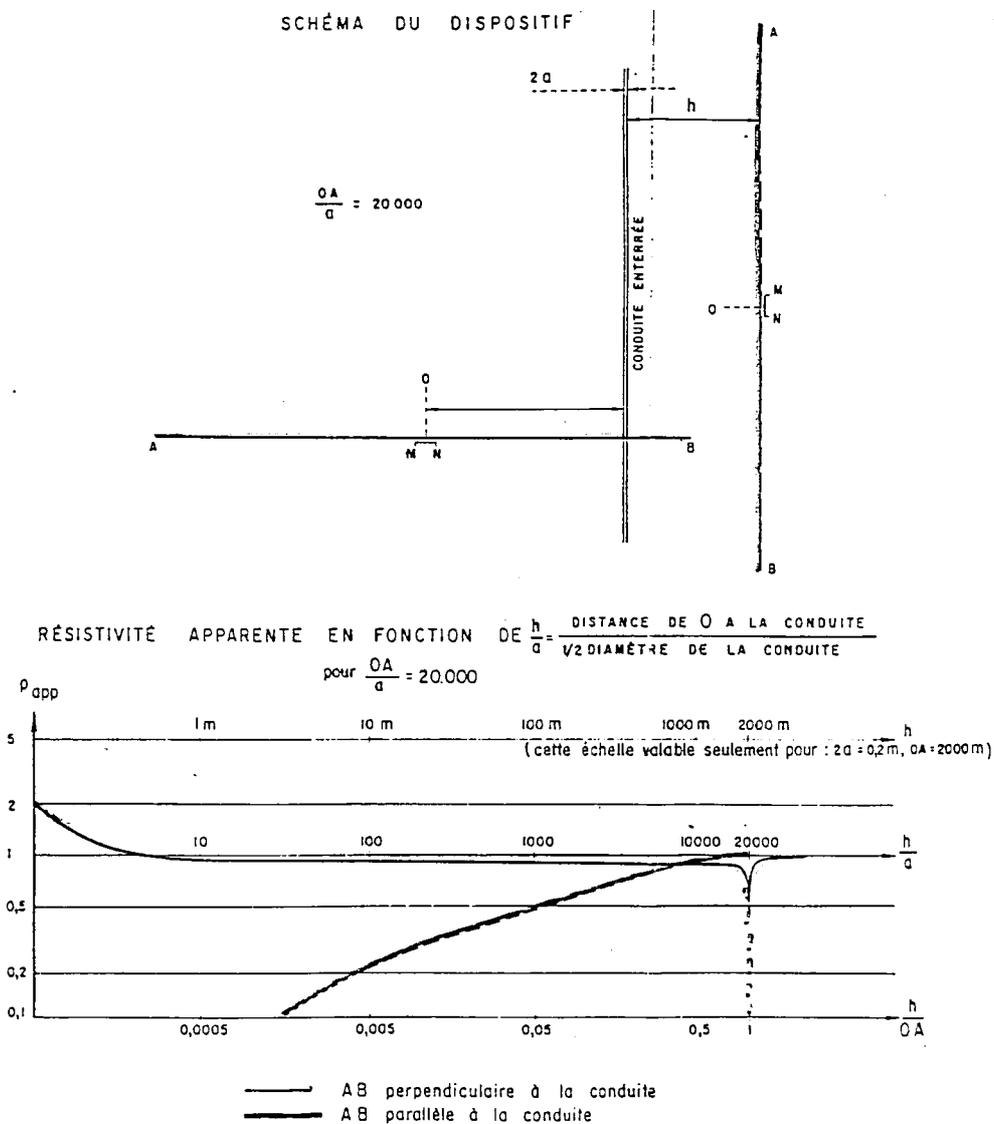


Figure 4-35 Effet d'une conduite enterrée (supposée infiniment conductrice)

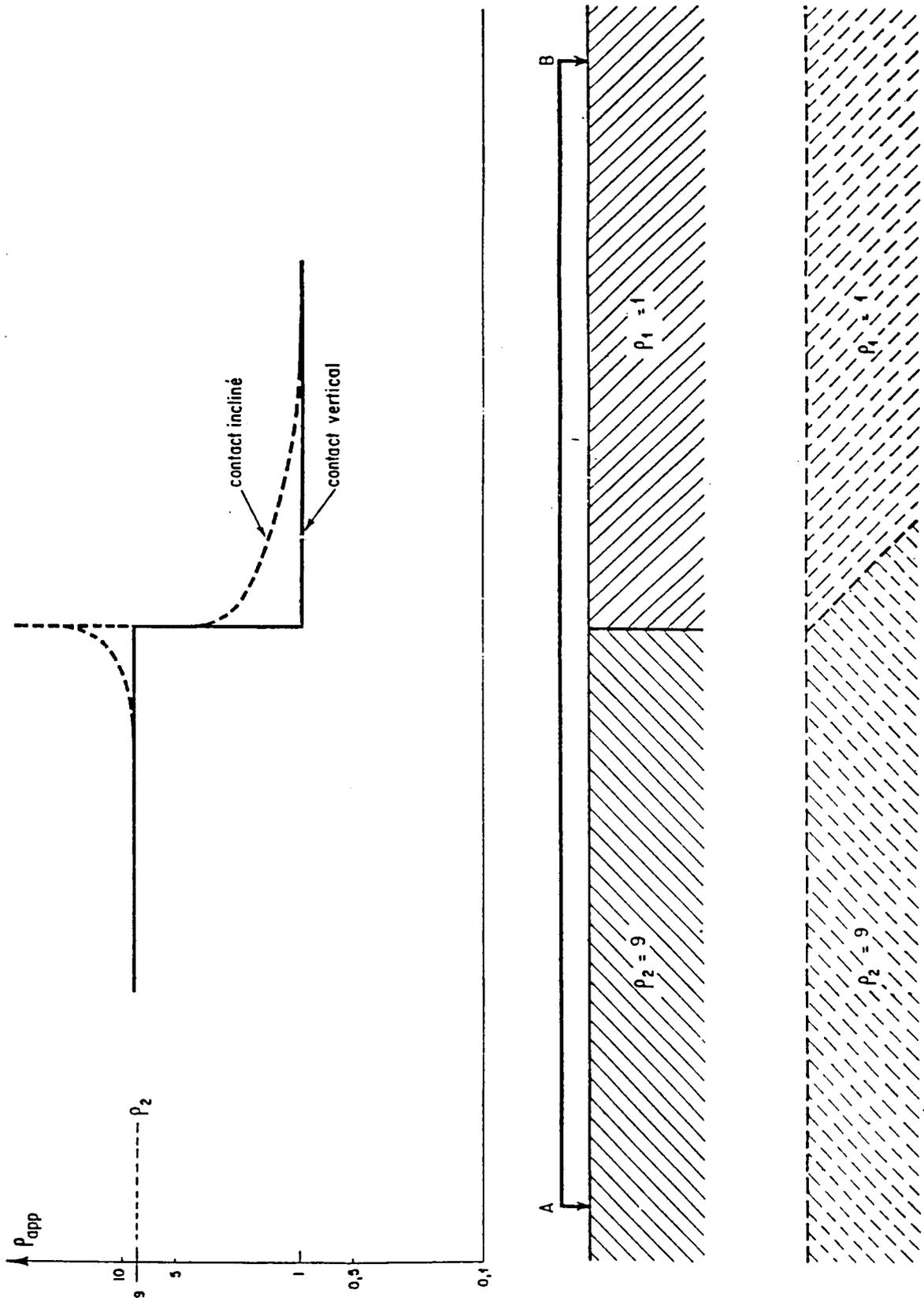


Figure 4-36 Profil AB sur contact vertical et sur contact incliné (MN infiniment petit)

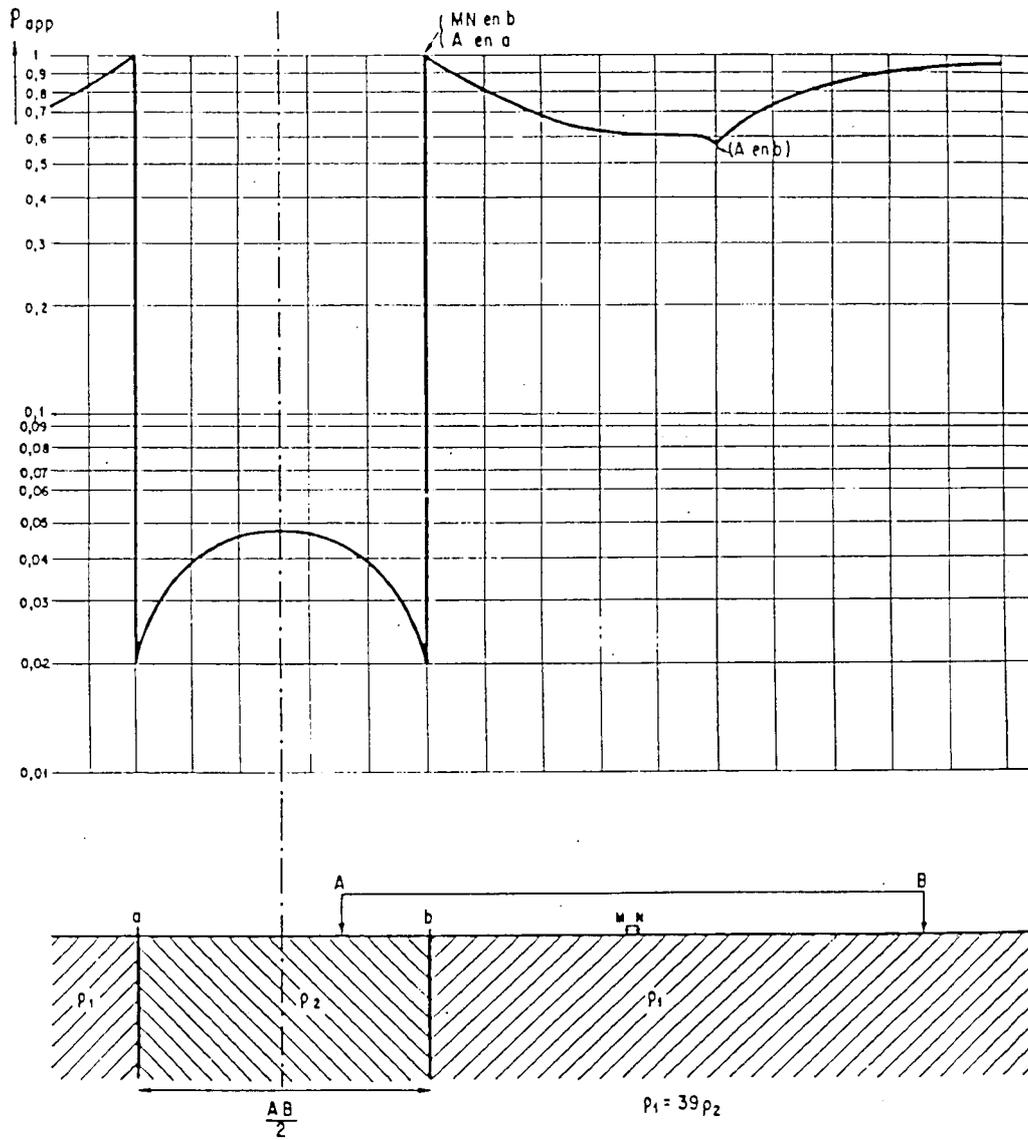


Figure 4-37 Profil de résistivité perpendiculaire à une couche verticale conductrice d'épaisseur $AB/2$ (MN infiniment petit)

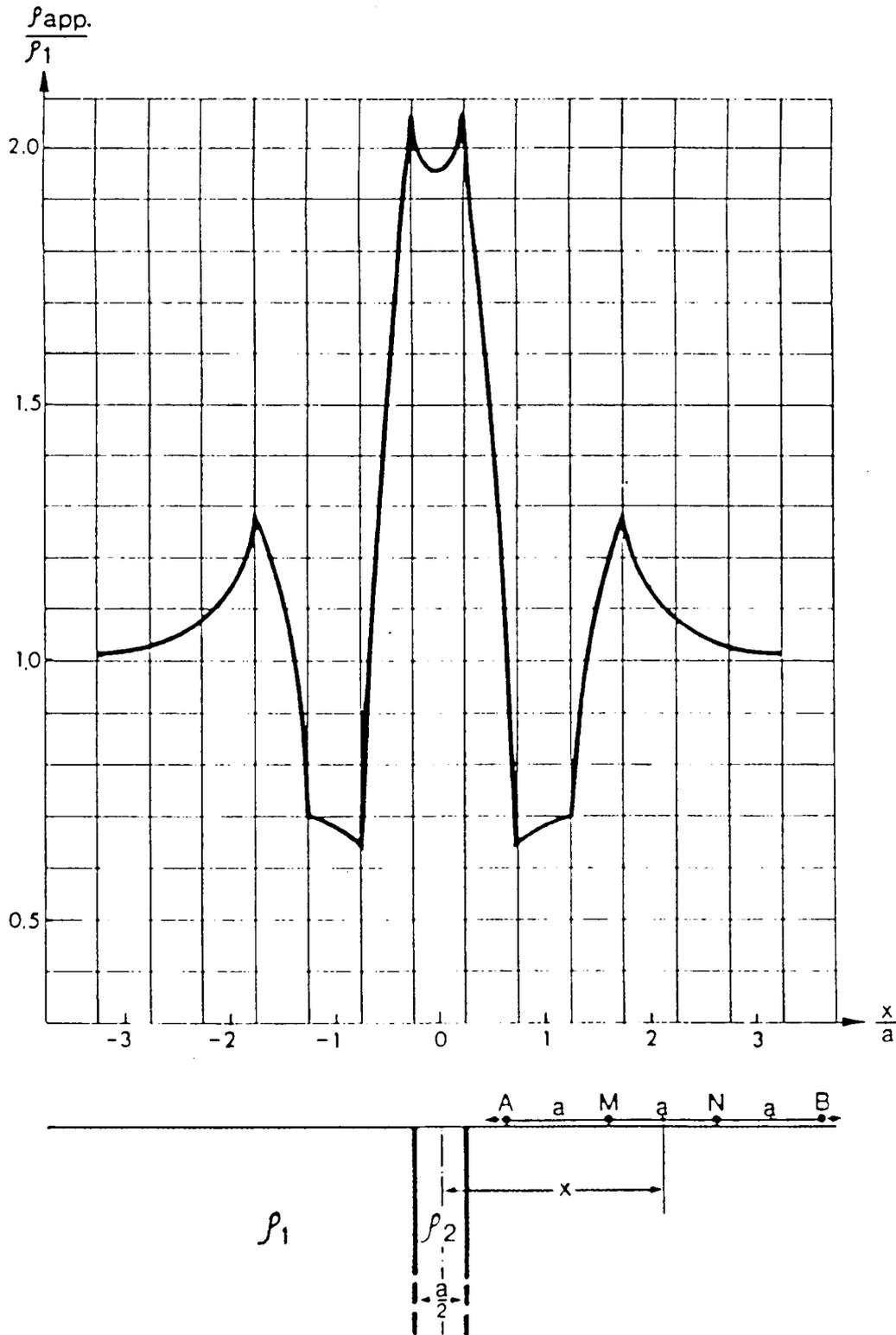


Figure 4-38 Profil des résistivités apparentes ($\rho_{app.}$) au passage d'un mur vertical résistant infini.

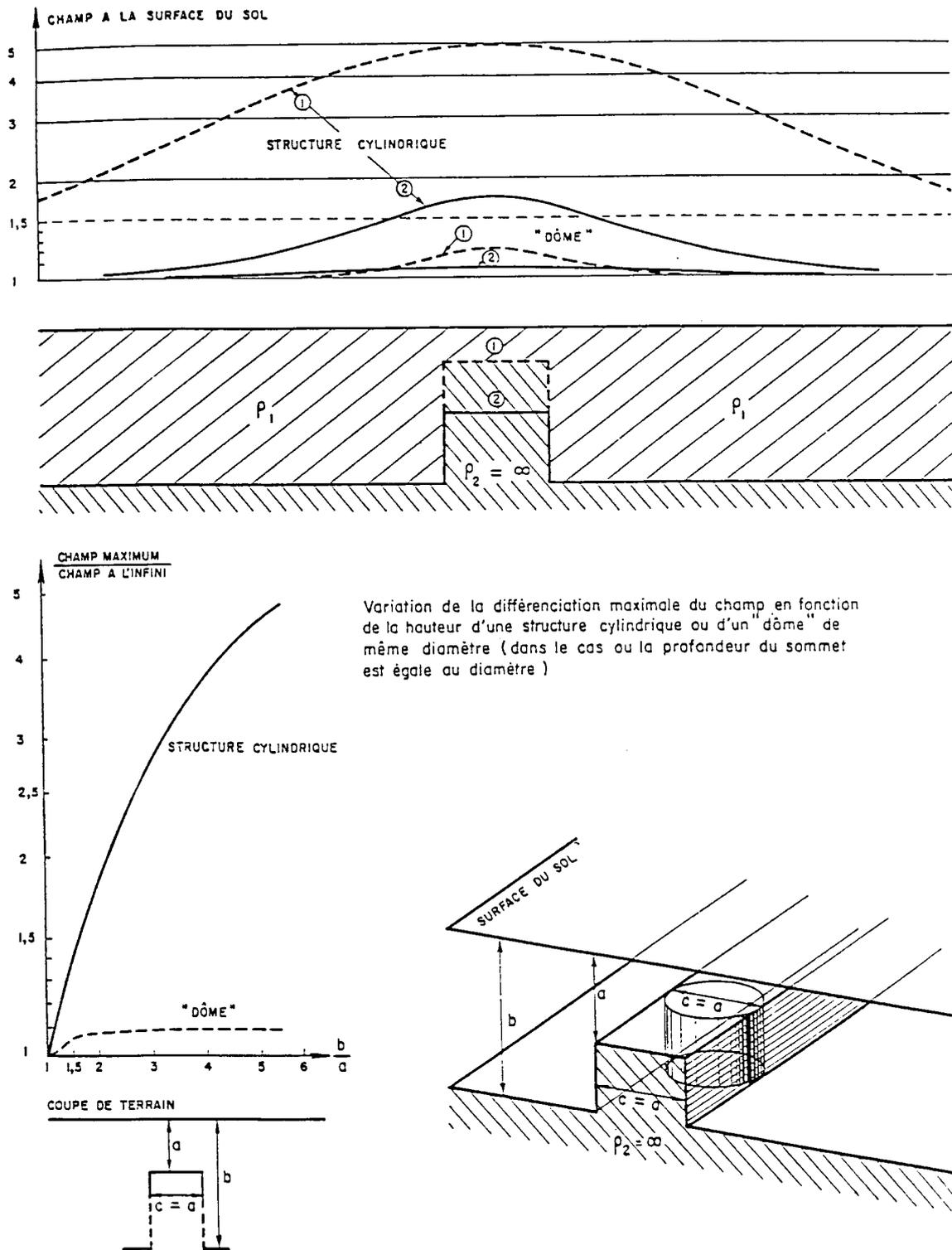


Figure 4-39 Effets comparés de l'influence de structures cylindriques et de dômes de même diamètre (A et B très éloignés)

$\rho_1 = 1$
 $\rho_2 = \text{infini}$
 $b = c = 2 \cdot a$
 $AB = 9 \cdot a$
 $AB = 18 \cdot MN$

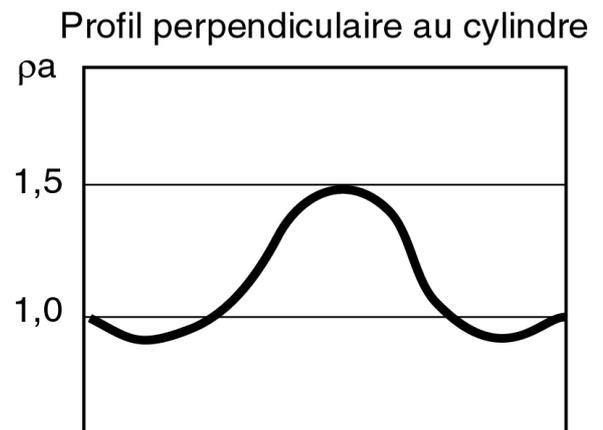
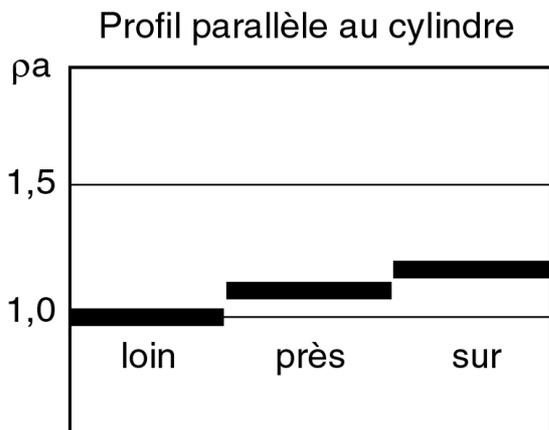
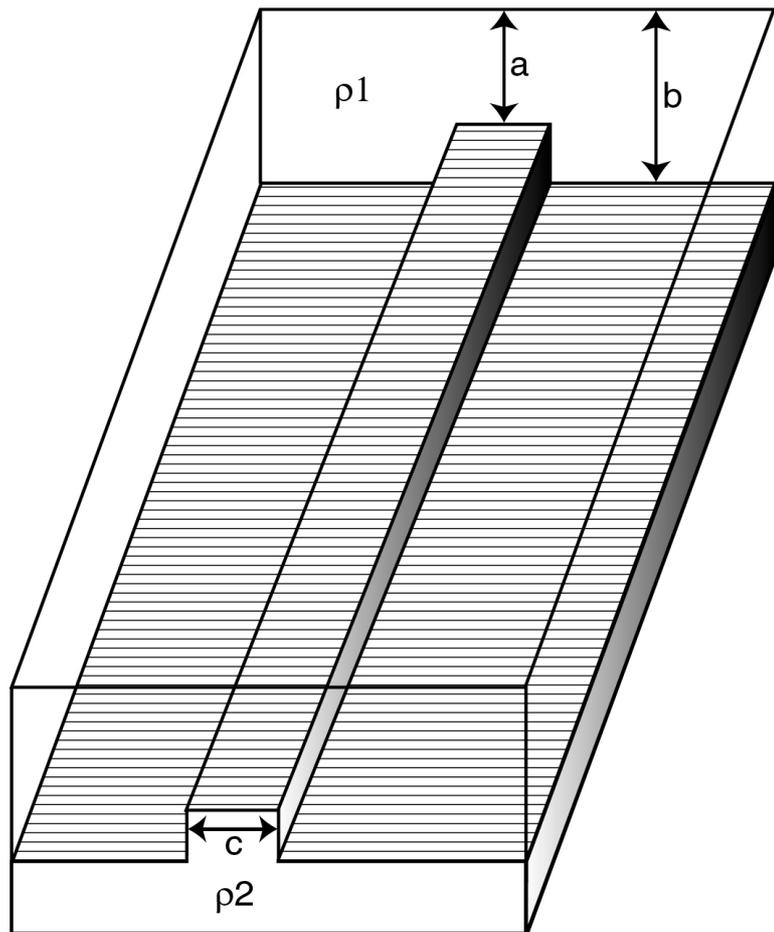


Figure 4-40 Effet d'un cylindre

4.9 Interprétation des profils de résistivité

Pour l'interprétation des profils et des cartes de résistivité, plusieurs facteurs sont à considérer :

- **Les dimensions du dispositif, AB et le type de dispositif**
- **Les variations de l'épaisseur du premier terrain, h_1**
- **Les variations de la résistivité du premier terrain, ρ_1**
- **Les variations de la résistivité du deuxième terrain, ρ_2**

Il y a souvent intérêt à établir pour la même région plusieurs cartes de résistivité avec des dispositifs AB de longueurs différentes, les plus petites faisant ressortir l'action des terrains superficiels, les autres plus grandes pour explorer le sous-sol plus profondément.

Si le sous-sol est constitué d'une couche homogène, isotrope, d'épaisseur infinie et de résistivité finie, la résistivité apparente mesurée avec un quelconque dispositif sera la résistivité vraie de ce milieu. Si le sous-sol est composé de deux couches, une première couche d'épaisseur h_1 et de résistivité ρ_1 surmontant un substratum d'épaisseur infinie et de résistivité ρ_2 , alors pour les petits dispositifs la résistivité apparente ρ_{app} est plus ou moins égale à la résistivité ρ_1 du premier terrain. Puis à fur et à mesure que l'on agrandit le dispositif on atteint une valeur asymptotique qui est celle de ρ_2 .

La longueur de ligne à laquelle on atteint la valeur de ρ_2 dépend de trois facteurs:

- l'épaisseur de h_1
- La valeur du rapport des résistivités
- Le dispositif utilisé

L'effet de l'épaisseur de h_1 est assez évident. Plus l'épaisseur du premier terrain est importante plus il faudra une grande longueur de ligne pour obtenir la résistivité du second terrain ρ_2 . Cela est vrai pour n'importe quel dispositif et pour n'importe quel rapport de ρ_2/ρ_1 . Cependant quelque soit le dispositif utilisé il faut des AB plus grands pour atteindre ρ_2 quand ρ_2 est résistant ($\rho_2/\rho_1 > 1$) que quand ρ_2 est conducteur ($\rho_2/\rho_1 < 1$).

La méthode de la carte de résistivité a eu, depuis le début de la prospection électrique, de très nombreuses applications et elle continue à être largement utilisée. Ses principaux avantages résident dans la rapidité de sa mise en oeuvre et dans la **simplicité de l'interprétation qualitative** des résultats. Les résistivités apparentes reflètent en effet les variations correspondantes à la distribution des résistivités vraies dans une tranche de terrain de profondeur assez bien déterminée et à peu près constante qui dépend de la longueur du dispositif. Elles rendent compte de la variation de la résistivité dans le sens **horizontal**.

Les cartes ou les profils de résistivité apparente qui traduisent les résultats sont analogues aux cartes relevées par les géologues sauf qu'il ne s'agit plus d'observations uniquement superficielles mais de la mesure d'un paramètre physique intéressant en moyenne une tranche de terrain d'une certaine épaisseur. Il est souvent utile de mesurer les résistivités apparentes sur un même profil avec plusieurs longueurs de ligne. On obtient ainsi des résultats pour plusieurs tranches de sol certaines plus épaisses que d'autres.

Les cartes de résistivité (Figures 4-41, 4-42, 4.43) présentent l'avantage de permettre une **exploration continue**, ce qui peut être très utile pour les études de détail comme la mise en évidence des zones fracturées en hydraulique villageoise en zone de socle en Afrique par exemple. C'est une méthode très utile dans les **études de reconnaissance** ayant pour but de mettre en évidence des zones anomaliques qui seront ensuite étudiées plus en détail. Son utilité est aussi évidente quand il s'agit de localiser des **accidents ou des variations de faciès peu profonds: failles, poches conductrices, nature des alluvions ...**

Cette méthode permet encore **d'interpoler les valeurs d'un paramètre**, résistivité ou profondeur, déterminées avec précision en un certain nombre de points isolés: forages, affleurements, sondages électriques.

Dans certains cas simples on peut même arriver à fournir des **cartes isobathes** comme par exemple le toit du bedrock sous une couverture à partir de deux longueurs de ligne différentes.

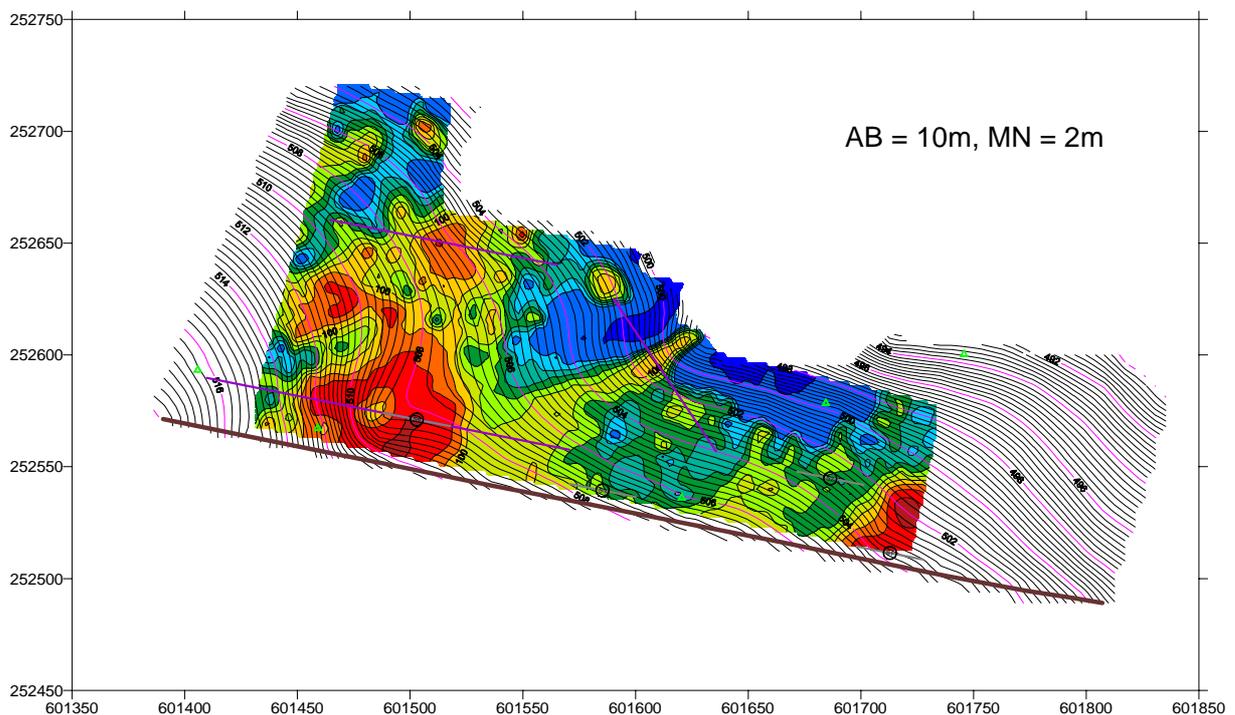


Figure 4-41 Exemple de carte de résistivités apparentes (Bâle 1999, AB = 10m) en milieu karstique. Les faibles résistivités font apparaître différentes directions d'écoulement invisibles en surface.

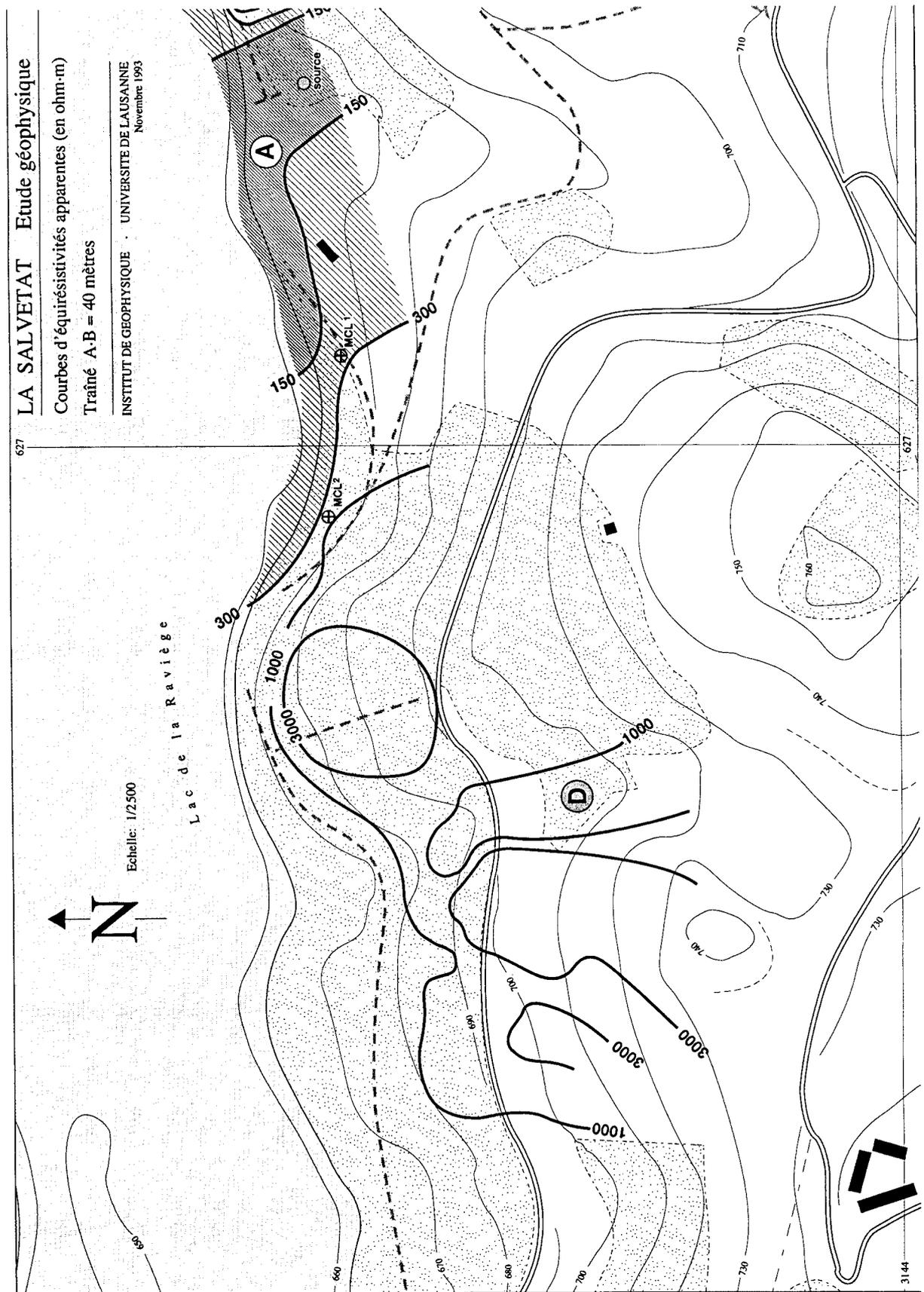


Figure 4-42 Etude géophysique de « La Salvetat », Novembre 1993, AB = 40m. Cette étude a permis l'implantation d'un forage pour l'eau ($\rho < 300$, zone A).

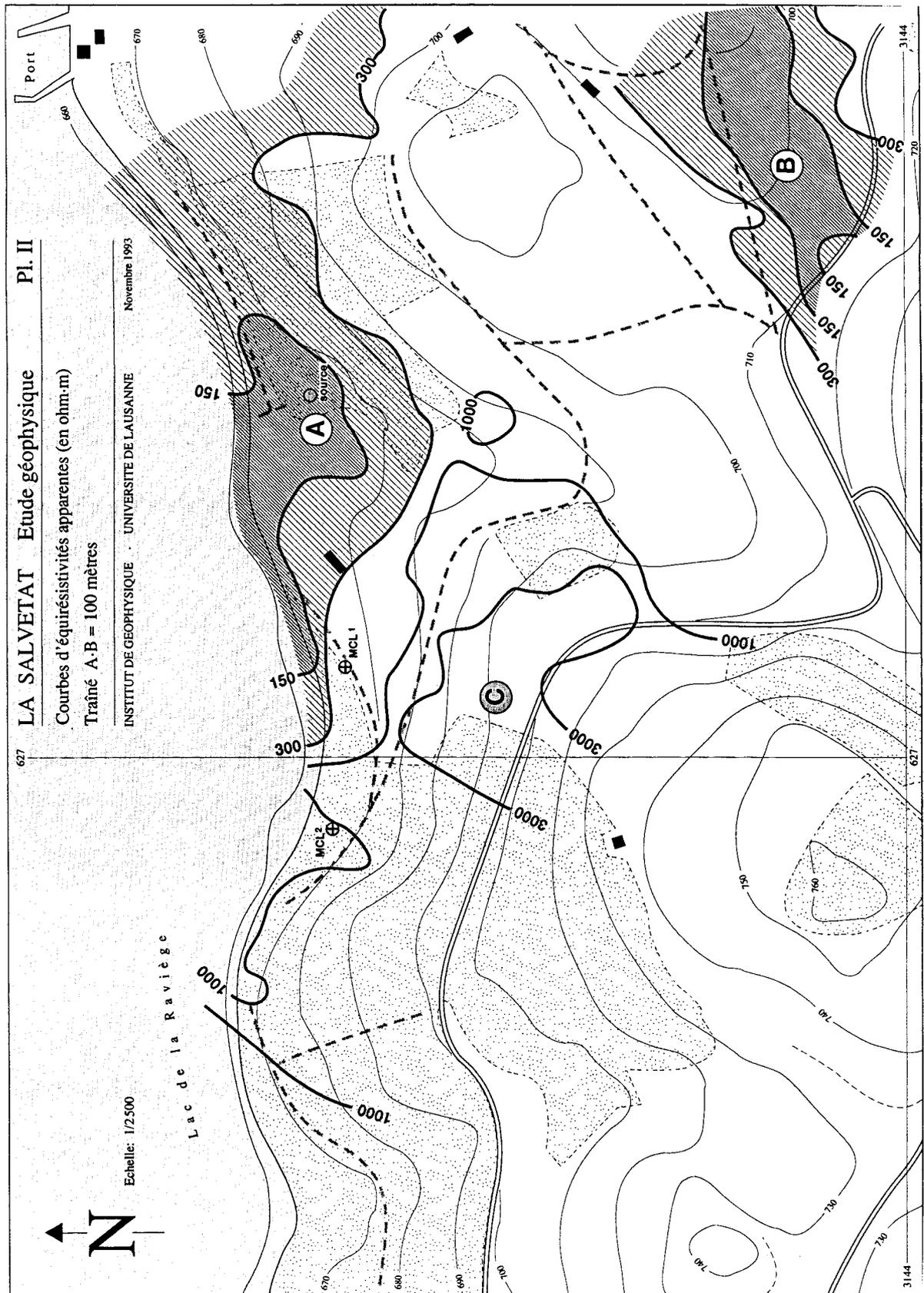
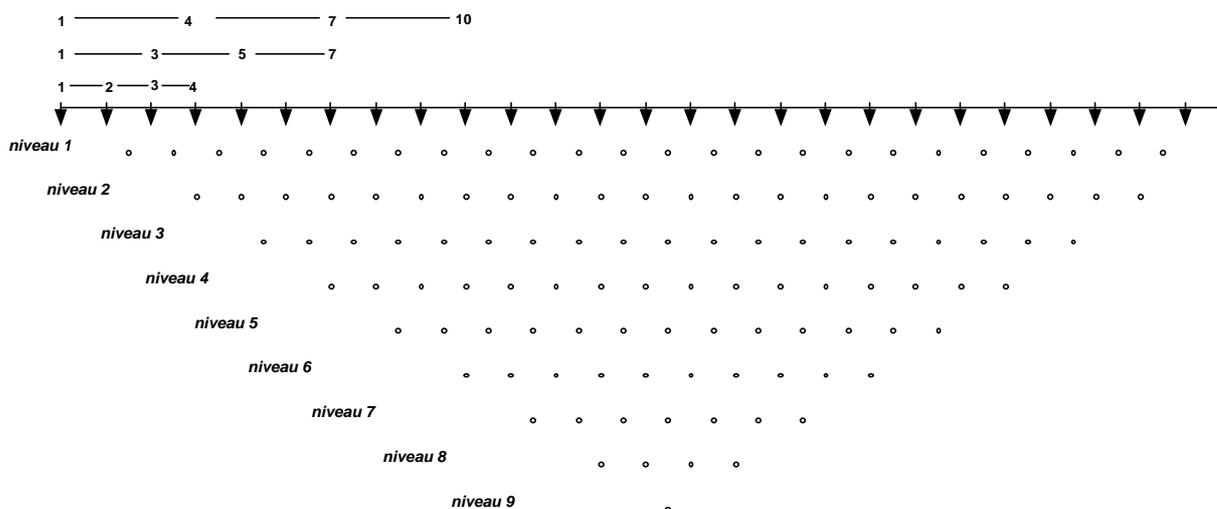


Figure 4-43 Etude géophysique de « La Salvetat », Novembre 1993, AB = 100m. Idem que Figure 4-42 mais avec une plus grande longueur de ligne.

4.10 Les panneaux électriques

Basée sur l'emploi de nombreuses longueurs de ligne, l'imagerie électrique appelée encore panneaux électriques (ou tomographies électriques) est une technique récemment développée pour l'examen de régions où la géologie est complexe et où se font sentir des variations latérales qui rendent l'utilisation des sondages électriques inadéquate. Les panneaux électriques consistent à faire des profils multiples en augmentant régulièrement l'espacement entre les électrodes. Les points sont reportés à l'aplomb du dispositif à une profondeur proportionnelle à a . On parle alors de niveaux d'acquisition.

Mise en oeuvre des mesures - Pseudo Section



Si l'espacement entre les électrodes augmente, la profondeur d'investigation augmente elle aussi. On peut alors représenter les résistivités apparentes mesurées sous forme de **Pseudo sections** qui reflètent qualitativement la variation spatiale de la **résistivité apparente**. La longueur du profil, la profondeur de pénétration et la résolution désirée détermine l'espacement choisi entre les électrodes qui peut varier de 10cm à 50m et plus. Cette pseudo section n'est absolument pas égale à une coupe des résistivités et profondeurs vraies des structures du sous-sol!

De nombreux dispositifs peuvent être utilisés pour construire ces Pseudo-sections. Les plus fréquemment mis en oeuvre sont les dispositifs : Wenner, Wenner-Schlumberger, le dispositif pôle-pôle, ou encore le dipôle-dipôle pour des raisons de symétrie. Un système d'acquisition automatique avec pilotage à l'aide d'un PC et des câbles permettant de brancher toute une série d'électrodes se trouvent sur le marché. Une fois construite la Pseudo-section il est possible en utilisant des logiciels de modélisation (inversion) d'obtenir une coupe de la variation de la résistivité calculée, variation qui peut être alors interprétée géologiquement. On peut à l'aide de cette technique contrôler l'évolution d'une nappe aquifère, étudier le mouvement de contaminants dans la subsurface, etc... On peut imaginer par exemple d'installer un système d'électrodes permanent et de contrôler avec le temps le changement de la résistivité. La surveillance de décharges peut aussi se faire avec des systèmes d'électrodes permanentes.

Chapitre 5

LES SONDAGES ELECTRIQUES

5.1 Introduction

Lors de l'exécution d'un sondage électrique on recherche comment varie, en un point donné de la surface, la résistivité du sous-sol **à la verticale**. Pour cela on exécute en un même endroit une succession de mesures, en augmentant chaque fois toutes les dimensions du dispositif et de ce fait la profondeur d'investigation qui leur est proportionnelle. On explore à cet endroit une tranche de terrain de plus en plus épaisse et l'on met ainsi en évidence les changements de constitution géologique **suivant la verticale**. Les mesures peuvent être réalisées avec les dispositifs classiques, Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, etc.

On représente la résistivité apparente mesurée en fonction de l'espacement du dispositif sur du papier bilogarithmique. La courbe obtenue est appelée "**courbe de sondage électrique**". Diverses méthodes d'interprétation permettent de restituer à partir de cette courbe une coupe géoélectrique du sous-sol ou chaque formation sera définie par son épaisseur et sa résistivité vraie. Cette méthode n'est applicable avec quelque rigueur que lorsque les terrains sont constitués de couches **horizontales uniformes latéralement**. En effet pour qu'un sondage électrique reflète les variations de la résistivité avec la profondeur il ne faut pas que les mesures soient affectées par des variations à l'horizontale. Il importe donc lors de l'exécution, de l'interprétation des sondages électriques d'éviter autant que faire se peut les variations à l'horizontale des résistivités. On voit trop souvent des sondages électriques qui donnent **des résultats aberrants** parce qu'ils ont été exécutés sur des terrains latéralement hétérogènes. **Des cartes de résistivité effectuées au préalable permettent de placer judicieusement les sondages électriques.**

En résolvant l'équation générale du potentiel à la surface de deux terrains parallèles, homogènes et isotropes, on peut construire une série de courbes représentant la résistivité apparente.

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n L^3}{\left[L^2 + (2n)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad \text{et} \quad L = \frac{OA}{h_1}$$

Ainsi on a, si $\rho_2 = \rho_1$, $K = 0$ et $\rho_a = \rho_1 = \rho_2$

Si $OA \rightarrow 0$, $L \rightarrow 0$ et $\rho_a = \rho_1$

Si $OA \rightarrow \infty$, $L \rightarrow 0$ et $\rho_a = \rho_2$

Si on impose $\rho_1/\rho_2 = \text{constante}$, on aura $K = \text{constante}$, le membre de droite de l'équation est alors une fonction ne dépendant que de L c'est à dire du rapport OA/h_1 . Par commodité, on représente ρ_a/ρ_1 en fonction de OA/h_1 pour différentes valeurs de ρ_2/ρ_1 sur du papier bilogarithmique; dans ce cas la relation devient:

$$\log \frac{\rho_a}{\rho_1} = F \left(\log \frac{OA}{h_1} \right)$$

L'ensemble de ces courbes porte le nom d'**abaque CH1** (Figure 5-47). Ces courbes représentent ρ_a/ρ_1 en fonction de OA/h_1 pour différentes valeurs de ρ_2/ρ_1 ($OA = AB/2$). Ces courbes sont reportées sur une échelle bilogarithmique. Chaque courbe de cet abaque correspond à la courbe d'un sondage électrique exécuté sur un sous-sol composé de deux terrains ou le premier terrain a une épaisseur et une résistivité unité (Figure 5-45).

Rappelons qu'un **sondage électrique** est constitué par une suite de mesures de résistivités apparentes effectuées avec des lignes progressivement croissantes, **le centre et la direction du dispositif restant fixes** (Figure 5-46). La variation des résistivités apparentes obtenues est essentiellement due à la pénétration croissante du courant.

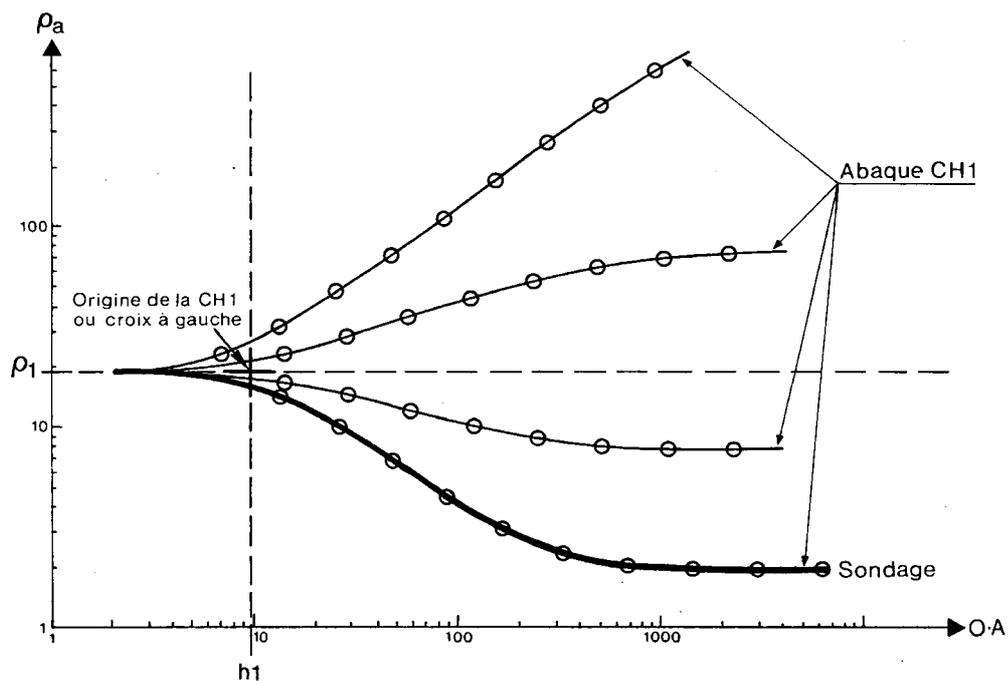


Figure 5-45 Utilisation de l'Abaque pour deux terrains

ETUDE : _____ SONDAGE N° : _____
 DATE : _____ COORDONNEES : _____
 OPERATEUR : _____ COTE : _____

$k = \frac{AM \cdot AN}{MN} \cdot 3,14$

$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$

k pour

MARQUES	O-A en m	$\frac{M}{1m} \quad \frac{N}{1m}$	$\frac{M}{10m} \quad \frac{N}{10m}$	$\frac{M}{60m} \quad \frac{N}{60m}$	$\frac{M}{200m} \quad \frac{N}{200m}$	ΔV en millivolts	I en milliampères	ρ_a en ohm-m
1	1 m	2.35						
2	2	11.8						
3	3	27.5						
1	4	49.5						
2	5	77.7						
3	6	112						
1	8	200						
2	10	313						
3	15	705	62.8					
1	20	1250	118					
2	25	1960	188					
3	30	2820	275					
1	35	3850	377					
2	40	5020	495					
3	50	7850	780					
1	60	11300	1120					
2	70	15400	1530					
3	80	20100	2000	288				
1	100	31400	3130	475				
2	125		4900	770				
3	150		7050	1130				
1	175		9600	1560				
2	200		12500	2040				
3	250		19600	3230				
1	300		28200	4660				
2	350			6360	1766			
3	400			8300	2360			
1	450			10500	3000			
2	500 m			13000	3760			

INSTITUT DE GEOPHYSIQUE • UNIVERSITE DE LAUSANNE • SUISSE •

Figure 5-46 Feuille d'acquisition de sondages (dispositif Schlumberger)

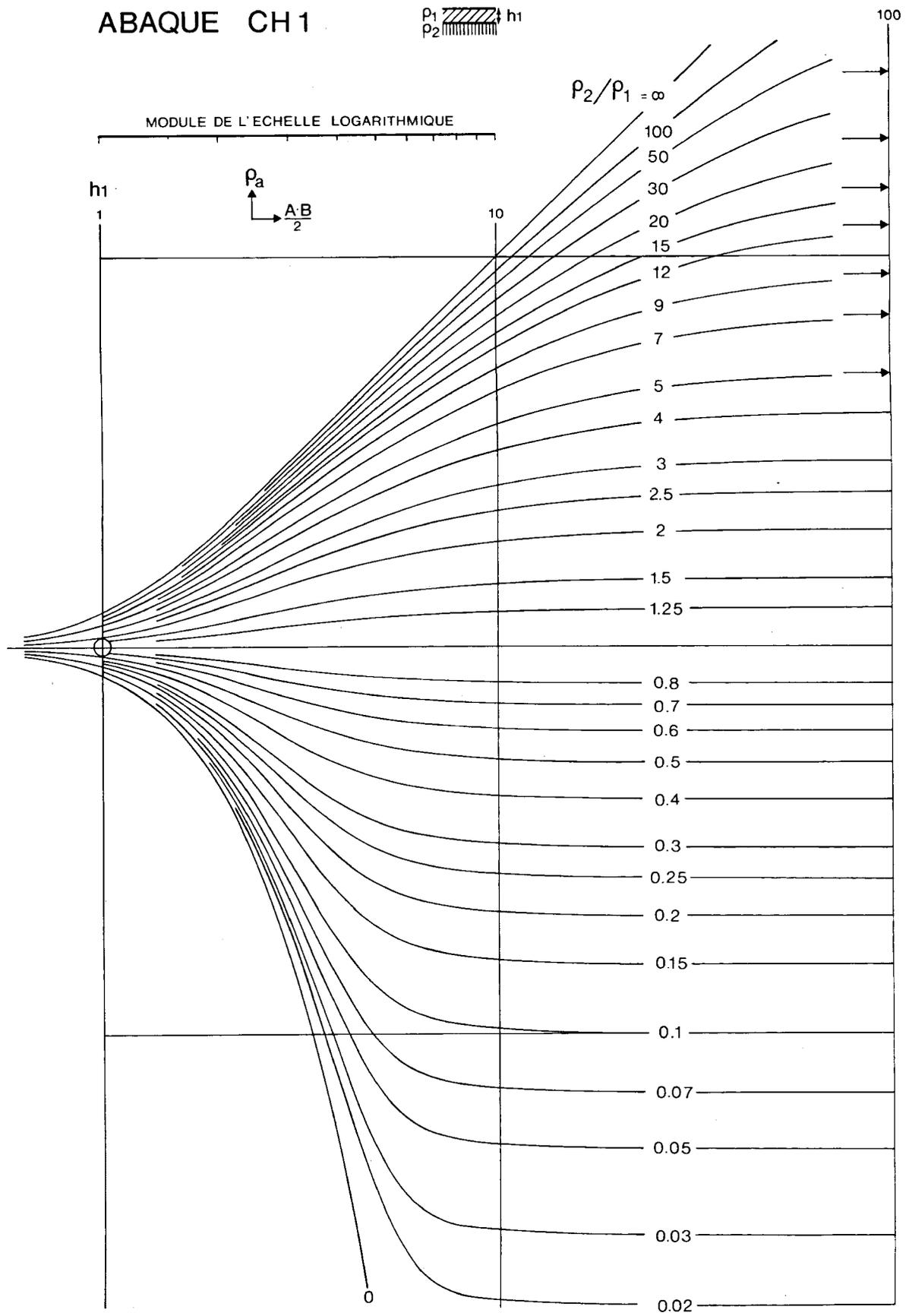


Figure 5-47 Abaque CH1

5.2 Les dispositifs

En principe, tous les dispositifs, dipôles, tripôles, quadripôles, etc. peuvent être utilisés pour exécuter des sondages électriques. Dans la pratique cependant, on n'utilise guère que les quadripôles symétriques, et le plus souvent le dispositif **Schlumberger** (Figure 5-46). En pratique, la distance MN est maintenue fixe et aussi petite que possible pendant un certain nombre de mesures, cela allège le travail manuel et évite le nombre des " **à-coups de prise** ".

Nous avons vu en effet que les hétérogénéités locales perturbent les mesures bien davantage quand passent à leur aplomb les électrodes MN qu'au passage des pôles AB. Il n'est cependant guère possible pratiquement de faire un sondage complet avec une seule position de MN, en effet pour les très grandes longueurs de ligne le ΔV mesuré serait trop faible. On effectue alors ce que l'on appelle **un débrayage**.

Exemple (Figure 5-46): La mesure faite pour $OA = 25\text{m}$, c'est à dire $AB = 50\text{m}$ avec $MN = 1\text{m}$ est refaite sans déplacer les électrodes AB mais avec un MN plus grand (5 à 10 fois la longueur du précédent). Ici $MN = 10\text{m}$. On continue alors le sondage électrique avec le nouvel $MN = 10\text{m}$. Ces mesures appelées **débrayages**, effectuées avec le même AB pour deux MN successifs ont une grande importance, car elles permettent de voir et parfois de corriger les à-coups de prise dus aux changements de MN.

Remarque : la profondeur d'investigation dépend dans une certaine mesure de la distance AM, agrandir MN revient donc à diminuer quelque peu la profondeur d'investigation .

Si les " à-coups de prise " AB sont en général moins intenses que ceux dus à MN (en particulier parce que A et B sont rarement sur un même accident local), ils sont en fait plus difficiles à éviter et à mettre en évidence. Ils peuvent parfois rendre difficile l'interprétation des sondages électriques et dans ce cas, il peut être utile d'effectuer avec le même point central O deux sondages électriques avec des directions perpendiculaires, **sondages électriques dits en croix**.

On peut aussi effectuer des sondages à trois bras. Dans ce cas on place une électrode supplémentaire, électrode C, à l'infini sur la médiatrice de MN. Puis on effectue les mesures entre AC, en multipliant les ΔV obtenus par 2, on obtient ainsi un sondage AC. On fait de même avec cette fois BC, et on obtient un sondage BC. On procède alors aux mesures classiques entre AB. Pour le même point nous aurons trois sondages et c'est la comparaison de ces trois sondages qui permettra de déduire l'effet des variations latérales.

5.3 La représentation des résultats

Les résultats d'un sondage électrique sont représentés sous forme d'un diagramme où l'on porte en abscisse la demi longueur de AB, soit OA, et en ordonnée la valeur de la résistivité apparente correspondante. L'échelle employée est **bilogarithmique**, c'est à dire logarithmique sur les deux axes. Une telle échelle est utile à plusieurs points de vue:

- Elle conduit à un même écart graphique pour un même écart relatif des quantités représentées, or la précision des résultats en ce qui concerne aussi bien les profondeurs que les résistivités s'exprime bien plus en valeur relative.
- L'effet d'une structure diminue avec la profondeur à laquelle elle est située, et la précision avec laquelle on peut déterminer ses dimensions diminue également. Pour des problèmes à très faible profondeur, une précision inférieure au mètre peut être exigée, alors que lorsqu'il s'agit de situer un substratum à plusieurs centaines de mètres, la précision peut n'être que de dix mètres.
- De même en ce qui concerne la résistivité, on peut chercher à déterminer la résistivité des limons conducteurs à quelques ohms.m près, alors que cette précision est irréaliste dans des calcaires résistants de plusieurs milliers d'ohms.m.
- Un autre avantage de l'échelle bilogarithmique est le suivant: Si l'on multiplie les épaisseurs d'un même facteur, la résistivité apparente ne change pas, la forme de la courbe ne change pas, les deux courbes se déduisent par simple translation parallèle à l'axe des abscisse. De même, si les résistivités sont multipliées par un même facteur, les courbes se déduisent cette fois par une translation parallèle à l'axe des ordonnées.

La forme de la courbe du sondage électrique ne dépend pas de la résistivité ρ_1 et de l'épaisseur h_1 du premier terrain pour autant que les rapports ρ_2/ρ_1 , ρ_n/ρ_1 et h_2/h_1 , h_3/h_1 h_n/h_1 restent constants.

CECI EST LA BASE DES METHODES D'INTERPRETATION.

Les résultats du terrain peuvent être comparés avec des courbes pré calculées pour divers modèles (épaisseur et résistivité variable). D'autre part dans le calcul des courbes théoriques l'épaisseur h et la résistivité ρ de la première couche peuvent être considérées comme égale à l'unité ce qui élimine deux paramètres pour le calcul des courbes de sondage correspondant à un modèle donné.

5.4 Interprétation des sondages électriques

5.4.1 Les paramètres géoélectriques

Une section géologique diffère d'une section géoélectrique quand les limites entre les couches géologiques ne coïncident pas avec les limites entre les différentes résistivités. Par exemple quand la salinité de l'eau d'un sable varie avec la profondeur on peut distinguer plusieurs couches **électriques** alors qu'il s'agit de la même **couche géologique**, par contre si de l'argile à 20 ohms.m repose sur de la molasse à 20 ohms.m on ne distinguera pas ces deux couches.

Une **couche électrique** peut être décrite à l'aide de deux paramètres fondamentaux, sa résistivité ρ_i et son épaisseur h_i , d'autres paramètres géoélectriques peuvent être obtenus à partir de ces deux paramètres fondamentaux (Figure 5.48), ce sont:

- *La résistance transverse* $T = h/\rho_t$ ρ_t = résistivité transversale
- *La conductance longitudinale* $S = h/\rho_l$ ρ_l = résistivité longitudinale

Où h = épaisseur

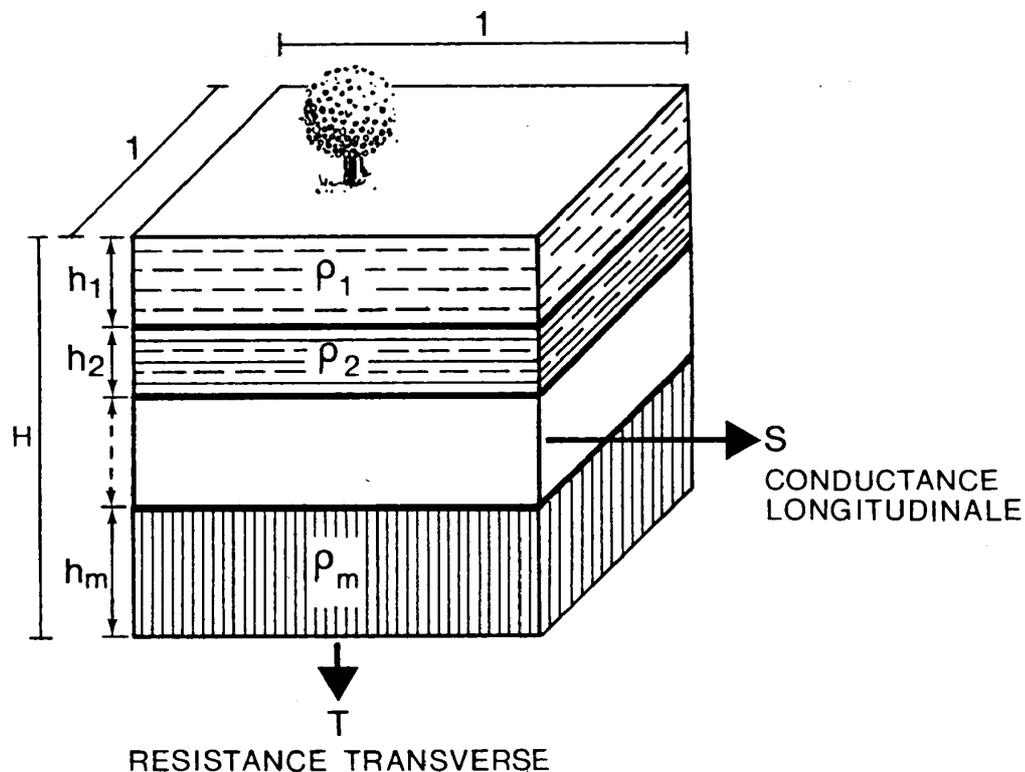


Figure 5-48 Conductance longitudinale et résistance transverse

Ces paramètres sont particulièrement importants quand ils sont utilisés pour décrire une section géoélectrique constituée de plusieurs couches. Pour **n couches on obtient:**

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}$$

$$T = T_1 + T_2 + \dots + T_n = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i$$

Ces paramètres T et S sont appelés les **paramètres de Dar Zarrouk**. Ils sont à la base des méthodes d'interprétation. Ils sont définis par rapport à une colonne de section unitaire de 1 m^2 de section.

Souvent, dans la nature, une couche de terrain présente une anisotropie verticale liée à l'histoire de sa formation. Pratiquement cette anisotropie se traduit par une résistivité transversale plus grande que la résistivité longitudinale. On définit donc :

Un coefficient d'anisotropie $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_s}}$

Une résistivité moyenne $\rho_m = \sqrt{\rho_t \rho_s}$

Pour une couche isotrope $\rho_t = \rho_l$ et $\lambda = 1$

5.4.2 Les différents types de sondages électriques.

La forme des courbes obtenues par sondage électrique au dessus de milieux stratifiés est une fonction de la résistivité, de l'épaisseur des couches et de la configuration du dispositif de mesure.

5.4.2.1 **Milieu homogène et isotrope** (Figure 5-49)

Si le milieu est constitué d'une couche homogène, isotrope, d'épaisseur infinie et de résistivité finie, la résistivité apparente mesurée sera une ligne droite dont l'ordonnée est la résistivité ρ_l de ce milieu (Figure 5-49).

5.4.2.2 Milieu à deux couches (Figure 5-50)

Si le sous-sol est composé de deux couches, une première couche d'épaisseur h_1 et de résistivité ρ_1 surmontant un substratum d'épaisseur infinie et de résistivité ρ_2 , alors le sondage électrique débute, pour les petits espacements, par une portion de ligne droite ou la résistivité apparente ρ_{app} est plus ou moins égale à la résistivité ρ_1 du premier terrain. Puis, à fur et à mesure que l'espacement augmente, la courbe monte ou descend selon que ρ_2 est plus grande ou plus petite que ρ_1 et finalement atteint une valeur asymptotique qui est celle de ρ_2 . L'espacement OA auquel on atteint la valeur de ρ_2 dépend de trois facteurs:

- **L'épaisseur de h_1**
- **la valeur du rapport de résistivités**
- **le dispositif utilisé.**

L'effet de l'épaisseur de h_1 est assez évident. Plus l'épaisseur du premier terrain est importante plus il faudra un grand espacement pour obtenir la résistivité du second terrain. Cela est vrai pour n'importe quel dispositif et pour n'importe quel rapport de ρ_2/ρ_1 . Cependant quelque soit le dispositif utilisé **il faut des OA plus grands pour atteindre ρ_2 quand ρ_2 est résistant ($\rho_2/\rho_1 > 1$) que quand ρ_2 est conducteur ($\rho_2/\rho_1 < 1$).**

Pour obtenir la résistivité vraie d'une couche située sous 2m de couverture il faudra utiliser $AB = 50m$ (25 fois h_1) pour un conducteur et $AB = 400m$ (200 fois h_1) pour un résistant. L'influence de la couche 2 se fait sentir bien avant ces longueurs heureusement et il n'est pas en pratique nécessaire d'atteindre toujours la valeur exacte de la deuxième résistivité. Comment interpréter des sondages électriques à deux terrains:

Nous avons vu que l'avantage de l'emploi du papier bilog réside dans le fait qu'il suffit de translater les courbes. Ainsi, si notre sondage a pour résistivité $\rho_1 = 10$ ohms.m, on translate la courbe théorique verticalement et si $h_1 = 10m$ on translate la courbe horizontalement. L'interprétation des sondages électriques se fait donc par **simple superposition de l'abaque CH1** et du graphique obtenu sur le terrain sur papier bilog. Les valeurs (ρ_1 et h_1) lues sous **la croix à gauche de l'abaque CH 1** sont la résistivité et l'épaisseur du premier terrain, obtenues après une double translation à partir de l'abscisse 1 et de l'ordonnée 1. La valeur de ρ_2 est la valeur atteinte par l'asymptote de la courbe choisie. On voit ici qu'il n'est pas toujours nécessaire de pousser les mesures pour avoir la valeur de ρ_2 .

On arrive ainsi à une **précision de 5 à 10 %**. L'erreur commise lors de l'estimation de l'épaisseur du premier terrain sera d'autant plus grande que l'imprécision sur ρ_1 sera élevée, il est donc important d'avoir suffisamment de mesures au début du sondage.

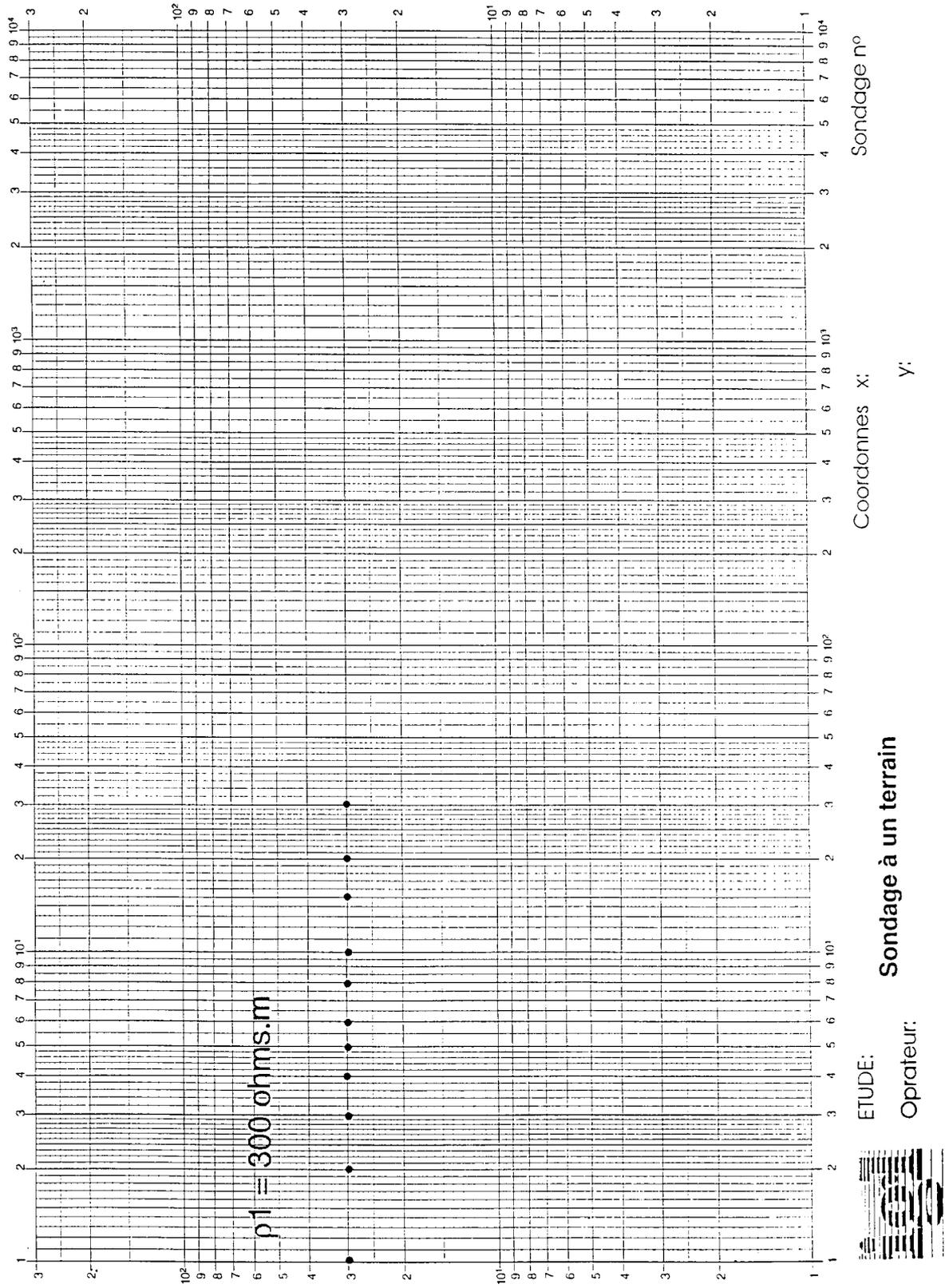


Figure 5-49 Exemple de sondage à un terrain

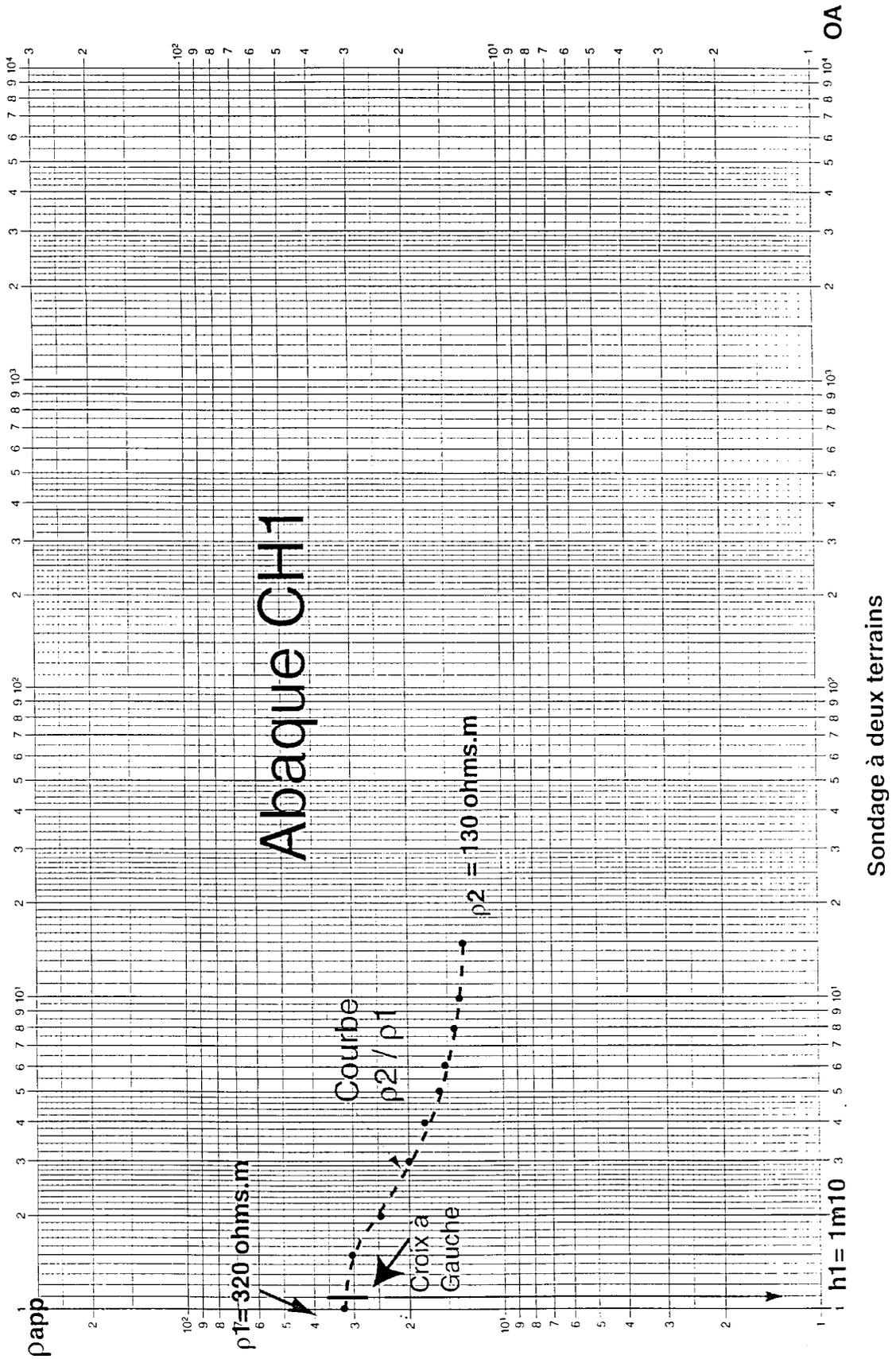


Figure 5-50 Exemple de sondage à deux terrains ($\rho_1 > \rho_2$).

Chapitre 6

LES SONDAGES A PLUSIEURS COUCHES

6.1 Les sondages à trois couches

Si le sous-sol est composé de trois couches de résistivité ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 et d'épaisseur h_1 , h_2 il y a alors quatre combinaisons possibles (Figure 6-51):

- Conducteur compris entre deux résistants, sondage de type H
- Résistant compris entre deux conducteurs, sondage de type K
- Résistivité qui augmente par palier, sondage de type A
- Résistivité qui diminue par palier, sondage de type Q

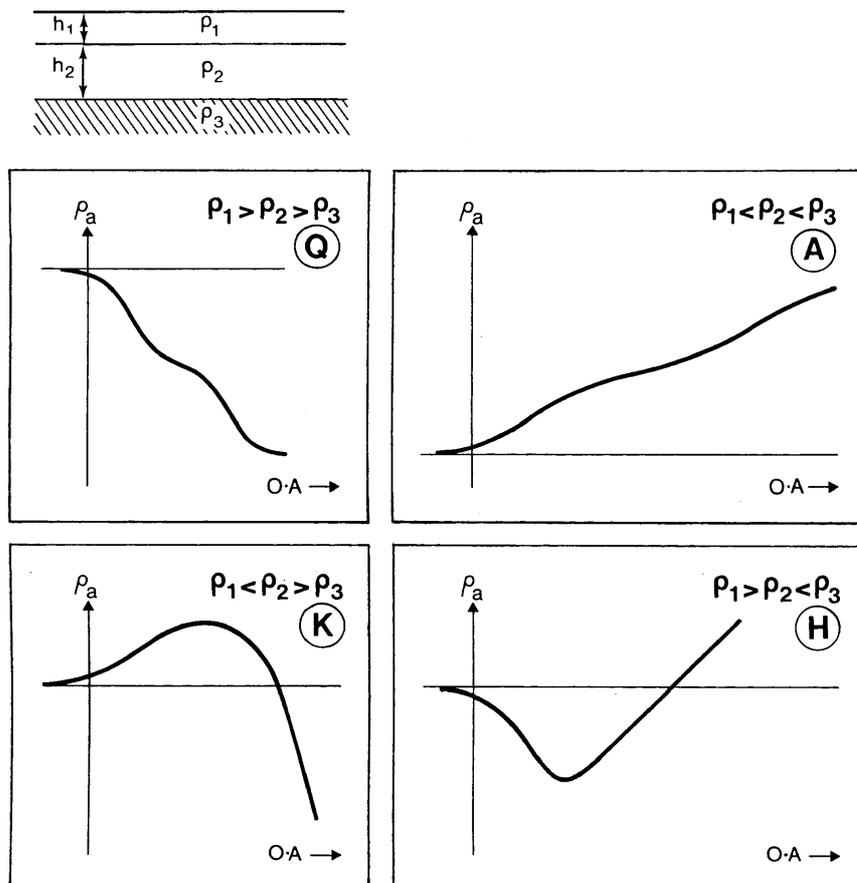


Figure 6-51 Les quatre cas possible d'un sondage sur trois terrains

Après avoir déterminé à quel type de courbe correspond notre sondage nous allons interpréter ce sondage (Figure 6-52) afin de trouver ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , et h_1 , h_2 . Dans le cas de couches horizontales, infinies latéralement, on démontre qu'à une succession donnée de résistivités et d'épaisseurs correspond un **seul diagramme de sondage électrique bien défini, malheureusement l'inverse n'est pas vrai.**

Une courbe de S.E. peut correspondre à des répartitions très différentes des résistivités et des épaisseurs, ce qui peut conduire à une indétermination. IL Y A PLURIVOCITE DE INTERPRETATION. Cette indétermination se manifeste sous deux formes particulière qui ont reçu le nom de **PRINCIPE D'EQUIVALENCE ET DE PRINCIPE DE SUPPRESSION.**

6.2 Le principe d'équivalence

Le principe d'équivalence concerne des couches dont la résistivité est soit inférieure soit supérieure à celle des deux terrains entre lesquels elles sont comprises, soit des sondages de type **H** et **K**. Prenons le cas d'un terrain résistant entre deux terrains plus conducteurs, sondage de type **K**. Le terrain 2 se manifestera par sa **résistance transverse**, produit de sa résistivité par son épaisseur. Tant que ce produit reste **constant** et dans certaines limites, le sondage électrique reste **inchangé** (Figure 6-53).

$$R = h\rho$$

Une couche conductrice comprise entre deux couches résistantes se fera connaître par sa **conductance longitudinale**, rapport de son épaisseur par sa résistivité, sondage de type **H**. Tant que le **rapport reste le même**, le sondage reste **inchangé** (Figure 6-53).

$$R = \frac{h}{\rho}$$

Les limites de validité de ce principe dépendent des caractéristiques de l'ensemble des couches en présence. Il existe un autre principe très important lors de l'interprétation des sondages électriques, c'est le **principe de suppression**.

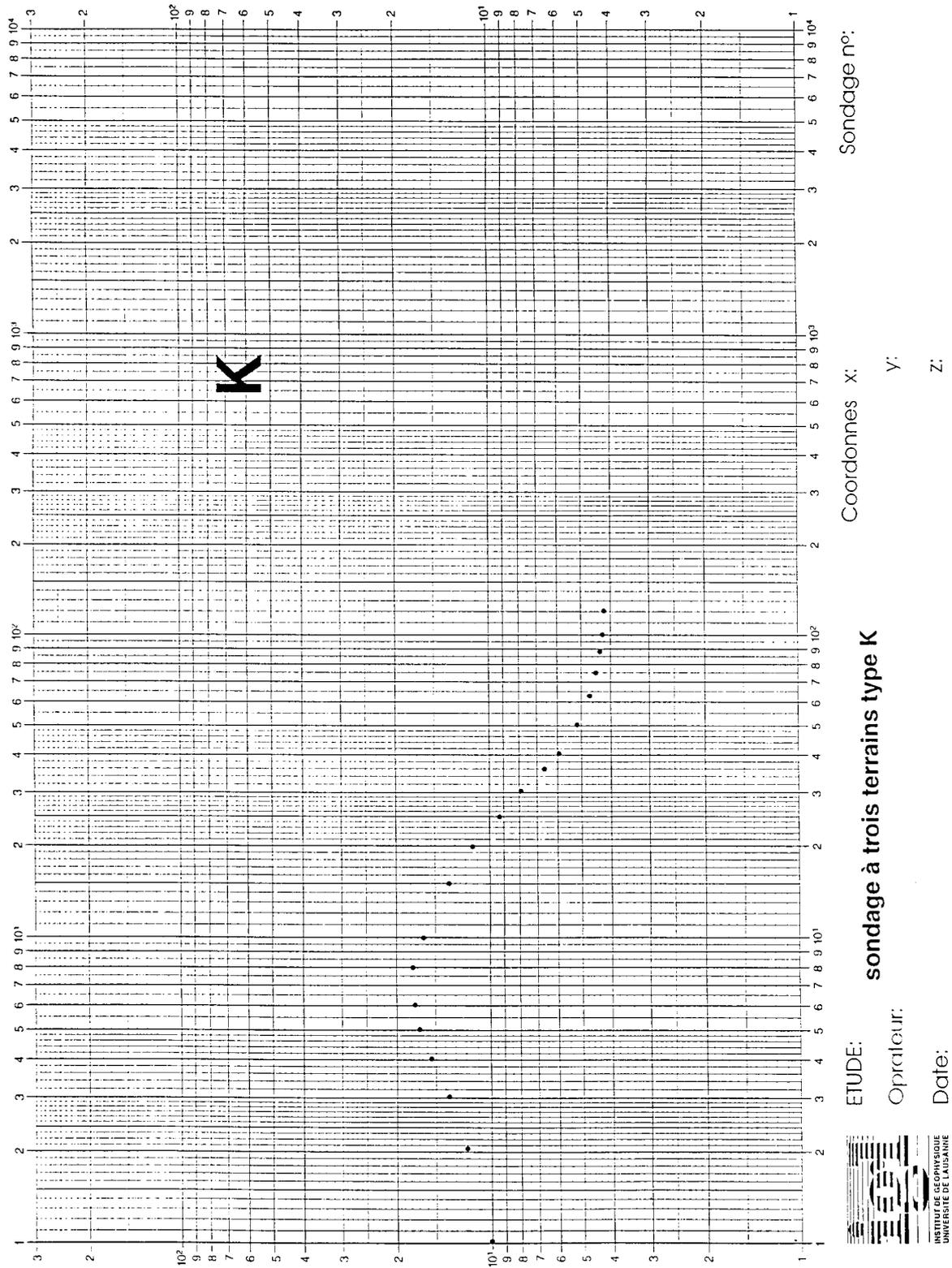
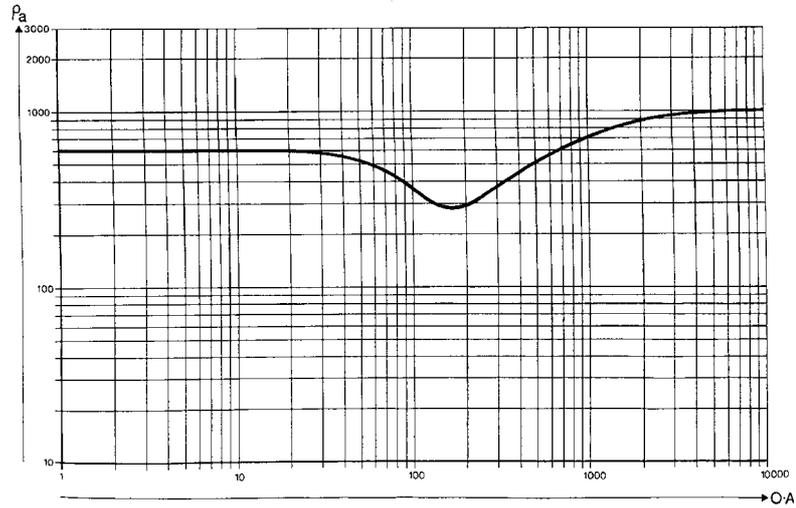


Figure 6-52 Exemple de sondages à trois terrains de type K

ETUDE : <u>EQUIVALENCE</u>			SONDAGE N° : <u>1</u>
Résistivité (ohm m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)	
600	50.0	0.0	
20	10.0	50.0	Interprétation A
1000		60.0	
Résistivité (ohm m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)	
600	50.0	0.0	
60	30.0	50.0	Interprétation B
1000		80.0	



ETUDE : <u>EQUIVALENCE</u>			SONDAGE N° : <u>2</u>
Résistivité (ohm m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)	
40	36.0	0.0	
800	10.0	36.0	Interprétation A
30		46.0	
Résistivité (ohm m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)	
40	36.0	0.0	
400	20.0	36.0	Interprétation B
30		56.0	

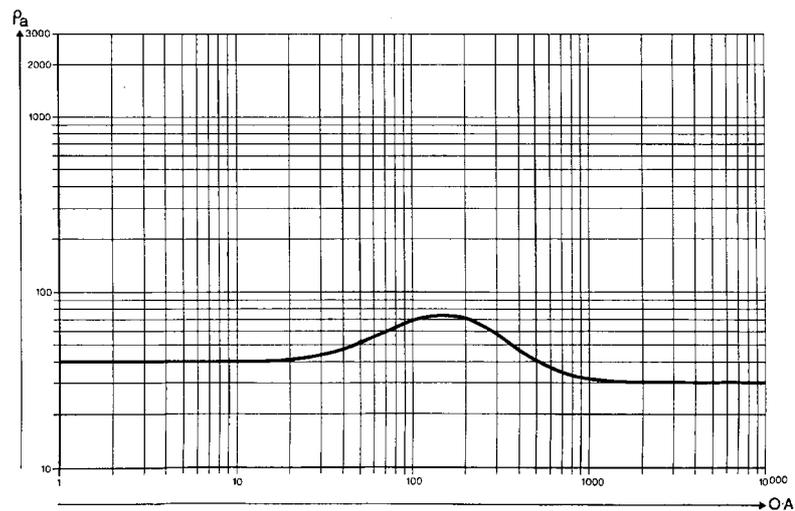


Figure 6-53 Exemples d'équivalence pour deux sondages réels

6.3 Le principe de suppression

Ce principe est relatif à des couches dont la résistivité est intermédiaire entre celle des couches encaissantes. De telles couches, tant qu'elles n'ont pas une épaisseur assez grande ne modifient pas ou peu le diagramme de sondage électrique (Figure 6-54). Cette indétermination se trouve fréquemment dans les études hydrogéoelectriques où l'on a affaire à des alluvions sèches puis des alluvions aquifères reposant sur un substratum conducteur type grès molassique. Il s'agit alors d'un sondage de type **Q** (Figure 6-55).

Inversement on peut souhaiter mettre en évidence des graviers aquifères reposant sur des calcaires. Là encore on peut avoir suppression, la suppression se fait d'ailleurs plus rapidement dans ce cas de sondage de type **A** (Figure 6-55).

Ces deux principes (équivalence et suppression) s'appliquent pour les sondages à 4, 5, 6, etc. couches et aussi lors de l'inversion des pseudos sections

6.4 Les sondages électriques isolés

Il est rarement possible d'aboutir à une interprétation quantitative de sondage électrique isolé. Ces sondages ne peuvent fournir que **des indications qualitatives** sur la nature des terrains. Ce n'est que l'étude comparative des traits communs et des déformations progressives d'un ensemble de sondages électriques qui permet d'aboutir à des données plus précises. Nous avons vu aussi que pour qu'un sondage électrique rende compte des variations de la résistivité avec la profondeur, il faut que celle-ci ne varie pas latéralement.

La meilleure approche consiste à établir une carte de résistivités avant d'implanter des sondages électriques dans les zones où il existe peu ou pas de variations latérales .

6.5 Etalonnage des sondages électriques

La détermination des valeurs absolues de h et ρ supposent d'autres circonstances favorables. La première chose à faire lorsque l'on désire implanter des sondages électriques dans une zone inconnue est **un étalonnage**. S'il existe dans la région à étudier **des forages mécaniques assez profonds**, ils peuvent fournir un étalonnage quantitatif des sondages électriques exécutés à leur emplacement. A défaut de forages, **des affleurements des principaux terrains en présence** permettront d'effectuer un certain nombre de ces sondages d'étalonnage que l'on nomme « **SONDAGES PARAMÉTRIQUES** ».

Ces sondages paramétriques permettront de déterminer **les résistivités vraies des différents terrains en présence** et faciliteront l'interprétation des autres sondages effectués dans la région dans la mesure où l'on peut admettre une certaine constance de faciès. Ces sondages paramétriques permettent d'autre part de faire le choix **de la longueur de ligne à utiliser pour le traîné**.

L'interprétation des sondages électriques multicouches peut être faite à partir d'un jeu d'abaques ou encore par ordinateur (Figure 6-56). Dans ce dernier cas, le géophysicien entre un modèle tenant compte des a priori géologiques et l'ordinateur calcule la réponse du modèle. Le géophysicien modifie alors le modèle de manière à ce que la courbe calculée corresponde aux mesures de terrain.

ÉTUDE MALI — M. Meyer

SONDAGE N° 2

	Résistivité (ohms-m)	Épaisseur (m)	Profondeur (m)	
A	600	6,0	0,0	Altérites sableuses
	20	30,0	6,0	Altérites argileuses
	1000		36,0	Socle
	Résistivité (ohms-m)	Épaisseur (m)	Profondeur (m)	
B	600	6,0	0,0	Arènes d'altération
	20	26,0	6,0	Socle altéré
	200	3,0	32,0	Socle
	400	5,0	35,0	

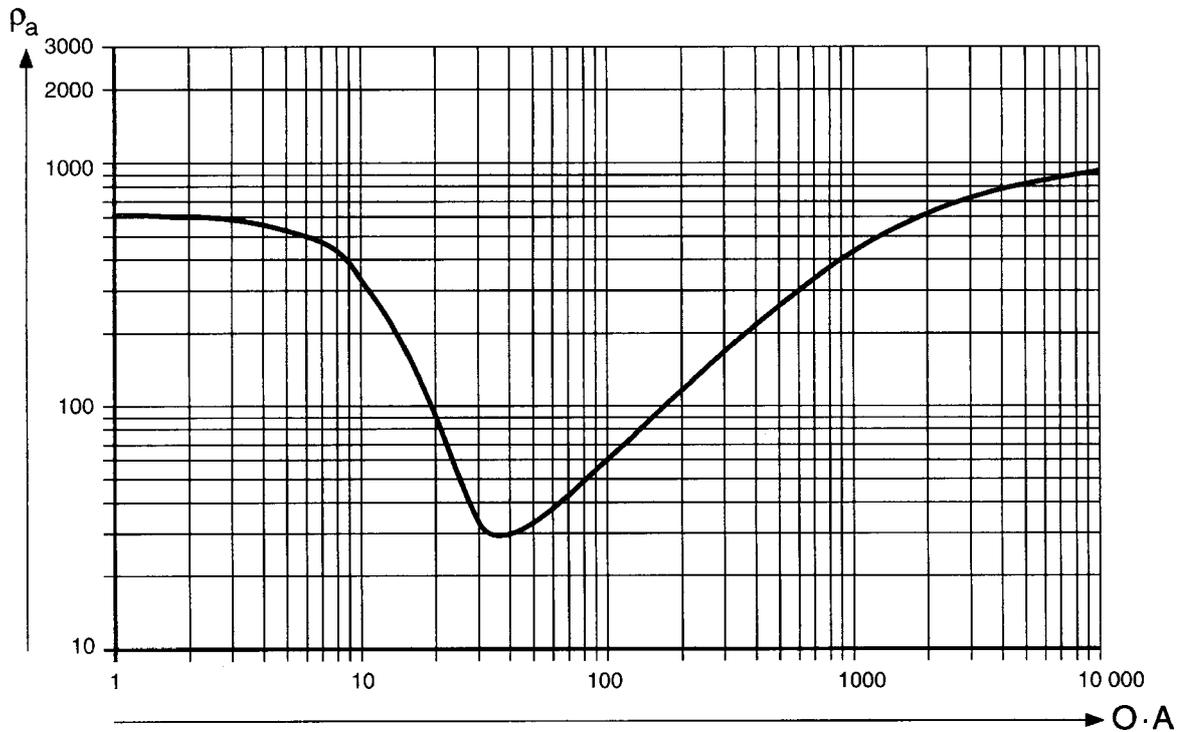
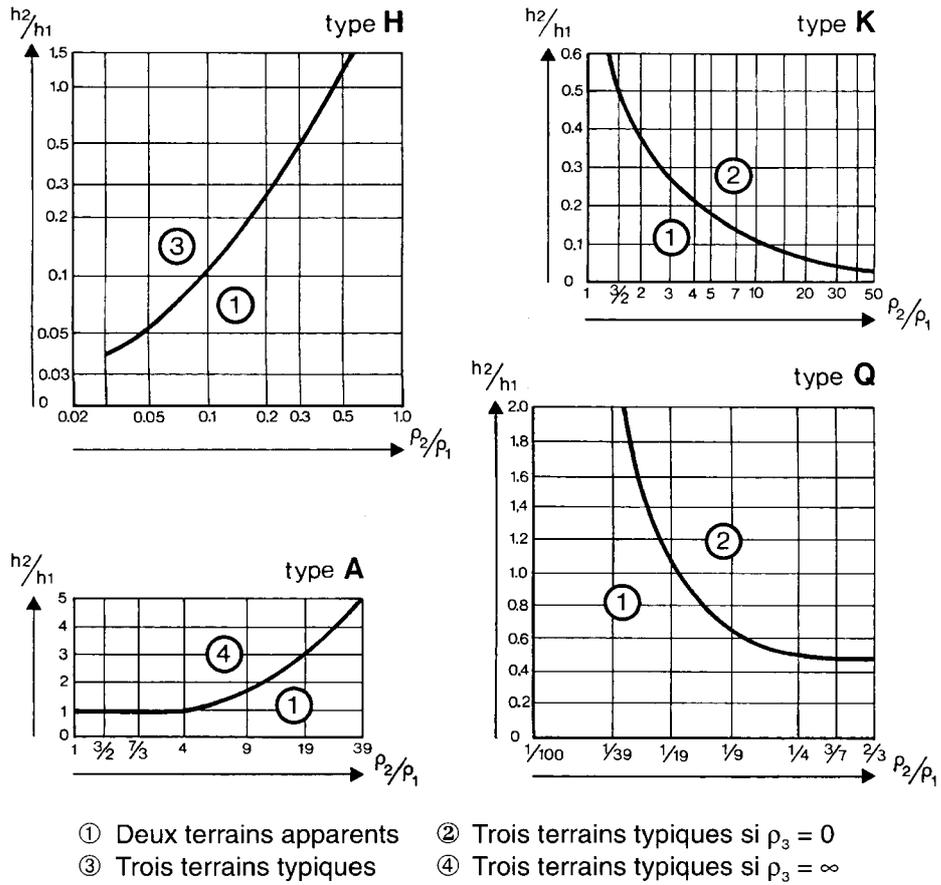


Figure 6-54 Exemple de suppression sur un sondage réel



Limites entre terrains détectables et supprimés pour les sondages de type H, A, K et Q.

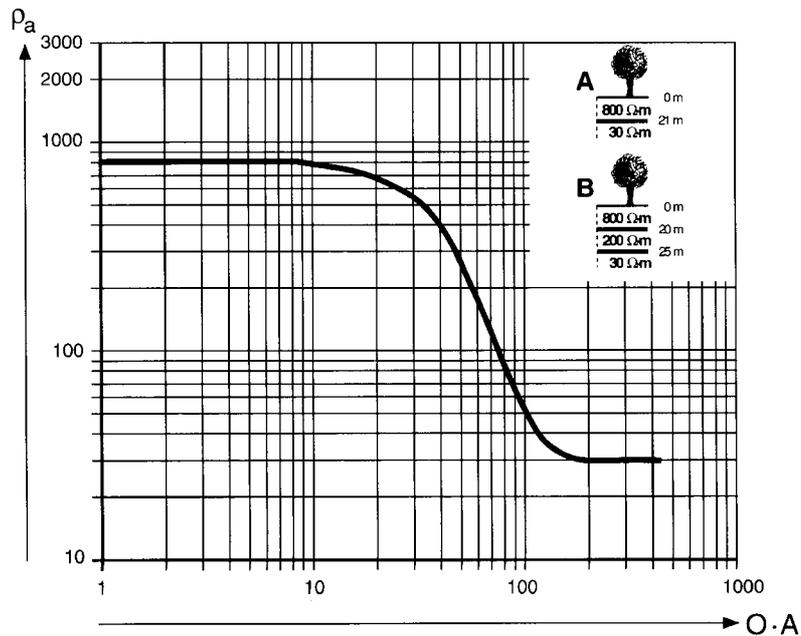


Figure 6-55 Limites entre terrains détectables et supprimés pour des sondages de type H, A, K et Q (en haut) ainsi qu'un exemple de suppression sur un sondage réel (en bas)

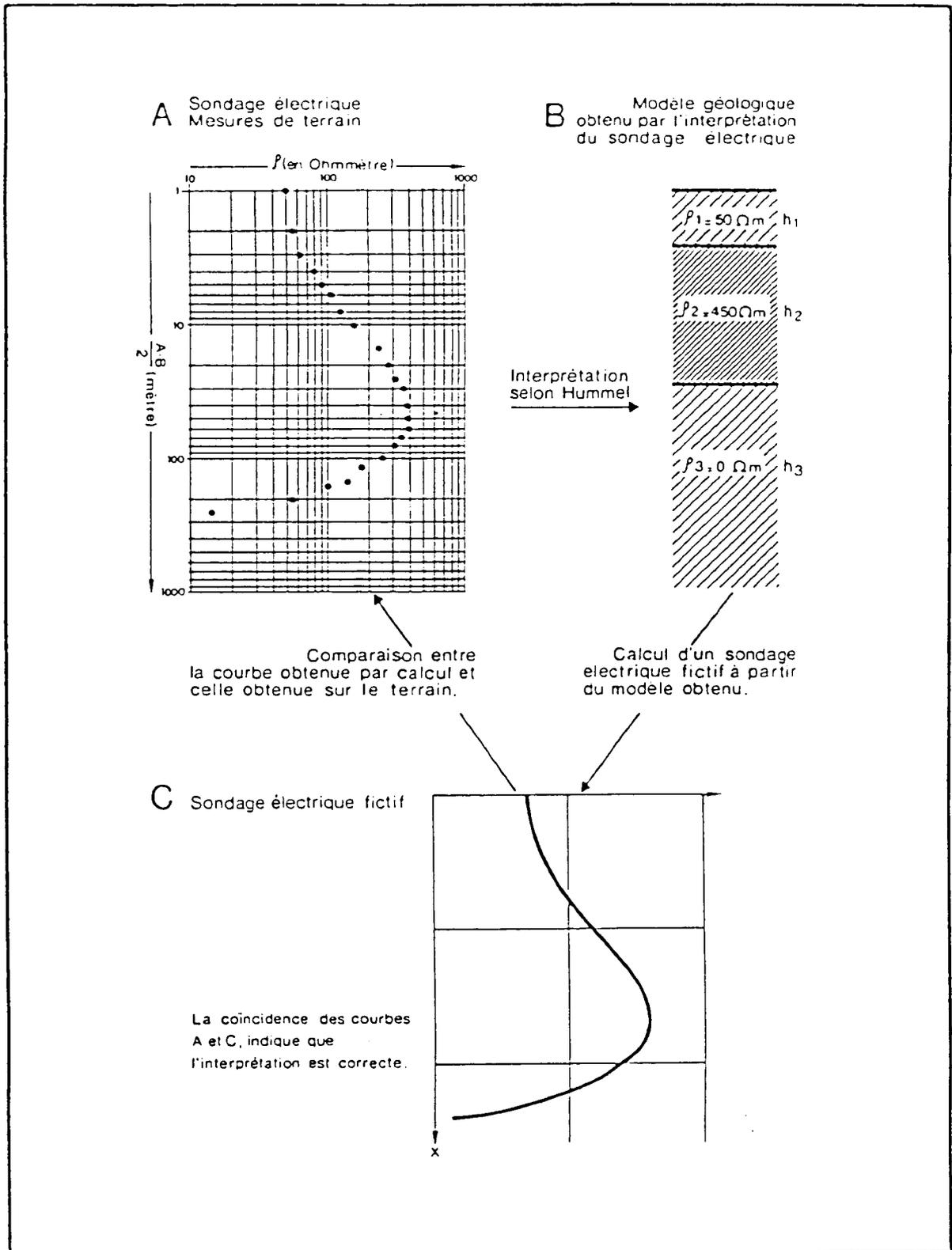


Figure 6-56 Interprétation d'un sondage électrique contrôlée par ordinateur

Chapitre 7

LES DIFFERENTES ETAPES D'UNE PROSPECTION ELECTRIQUE

7.1 Première phase: Sondages électriques paramétriques

Ils fournissent des **INDICATIONS PRELIMINAIRES** sur les résistivités en présence et permettent de choisir les longueurs de ligne à utiliser pour le traîné.

7.2 Deuxième phase: Les cartes de résistivités

Elles fournissent des indications sur la **REPARTITION HORIZONTALE** des résistivités et sur l'extension des principales formations du sous-sol.

7.3 Troisième phase: Sondages électriques et pseudo-sections

7.3.1 Les sondages électriques INTERPRETATIFS

Ils fournissent des indications sur la **REPARTITION A LA VERTICALE** des résistivités et permettent de dessiner une " coupe " du sous-sol à condition qu'il soient bien placés d'après la carte des résistivités.

7.3.2 Les pseudos sections

Elles permettent de faire dans des endroits choisis des coupes 2D du sous-sol. Elles doivent être calibrées par des sondages électriques.

7.4 Quatrième phase: Interprétation, intégration des données, rapport et recommandations.

Toutes les méthodes classiques d'interprétation des sondages électriques se fondent sur les deux hypothèses fondamentales suivantes :

- **Les résistivités du sous-sol varient de façon discontinue, à la verticale, sous le sondage.**
- **Les résistivités du sous-sol ne VARIENT PAS, ou fort peu, à l'horizontale dans la zone du sondage et cela sur une distance au moins égale à la longueur du sondage.**

IL EST INDISPENSABLE QUE CES DEUX CONDITIONS SOIENT REMPLIES pour qu'un sondage électrique se prête à une interprétation correcte.

Lors de la première phase de la prospection, le géophysicien ne sait rien de la répartition des résistivités dans le sous-sol. Les sondages paramétriques sont **indispensables**, ils sont placés à proximité d'un forage mécanique ou sur des affleurements. Ils permettent de se faire une idée des résistivités dans une région et ils permettent en outre de fixer les longueurs de ligne efficaces pour l'exécution de la deuxième phase.

C'est grâce aux cartes de résistivités établies lors de la deuxième phase que le géophysicien peut placer les sondages électriques de la troisième phase de façon optimum, c'est à dire, dans les zones intéressantes et de manière à ce que les résistivités varient le moins possible à l'horizontale.

LES SONDAGES ELECTRIQUES DE LA TROISIEME PHASE, OBTENUS EN RESPECTANT LES CONDITIONS MENTIONNEES SONT LES SEULS QUI SE PRETENT A UNE INTERPRETATION RIGOUREUSE

LES PSEUDOS SECTIONS DOIVENT AUSSI ETRE ETALONNEES PAR DES SONDAGES ELECTRIQUES POUR POUVOIR CHOISIR CORRECTEMENT LES PARAMETRES DE RESTITUTION (INVERSION).

Bibliographie :

- CHAPELLIER, D.**, 1987, DIAGRAPHIES APPLIQUEES A L'HYDROLOGIE, TECHNIQUE ET DOCUMENTATION (LAVOISIER), *DIAGRAPHIES*
- DOBRIN, M. B.**, 1976: INTRODUCTION TO GEOPHYSICAL PROSPECTING, MC GRAW-HILL BOOK CO., *GENERAL*
- GEOPHYSICAL PROSPECTING** revue publiée chez BLACKWELL SCIENTIFIC PUBLICATIONS, *GENERAL*
- GEOPHYSICS**, revue de la S.E.G., *GENERAL*
- GRIFFITHS, D.H. AND KING, R. F.** , 1981: APPLIED GEOPHYSICS FOR GEOLOGISTS & ENGINEERS, PERGAMON PRESS, *GENERAL*
- JOURNAL OF APPLIED GEOPHYSICS**, revue publiée chez ELSEVIER, *GENERAL*
- KELLER, G.V. and F.C. FRISCHKNECHT**, 1966: ELECTRICAL METHODS IN GEOPHYSICAL PROSPECTING., PERGAMON PRESS., *ELECTRICITE*
- KUNETZ, G.**, 1966: PRINCIPLES OF DIRECT CURRENT RESITIVITY PROSPECTING, MONOGR., SER. NO2. GEOPUBL. ASSOC.GEOEXPLOR., *ELECTRICITE*
- MEYER DE STADELHOFEN, C.**, 1991: APPLICATION DE LA GEOPHYSIQUE AUX RECHERCHES D'EAU, TECHNIQUE ET DOCUMENTATION (LAVOISIER), *GENERAL*
- MILSON, J.**, 1989: FIELD GEOPHYSICS, GEOLOGICAL SOCIETY OF LONDON HANDBOOK OPEN UNIVERSITY PRESS, *GENERAL*
- PARASNIS, D. S.**, 1973: MINING GEOPHYSICS, ELSEVIER, *GENERAL*
- PARASNIS, D. S.**, 1979: PRINCIPLES OF APPLIED GEOPHYSICS, CHAPMAN & HALL, *GENERAL*
- SERRA, O.**, 1984: FUNDAMENTALS OF WELL-LOG INTERPRETATION, ELSEVIER SCIENCE PBLISHERS, 1 ET 2, *DIAGAPHIES*
- STANLEY H. WARD**, 1990: GEOTECHNICAL AND ENVIRONMENTAL GEOPHYSICS, S.E.G. INVESTIGATIONS IN GEOPHYSICS, VOL 5, EDWIN B. NEITZEL, SERIES EDITOR, I, II, AND III, *GENERAL*
- TELFORD, W. M., L., P. GELDART, R. E. SHERIFF AND D. A. KEYS**, 1976: APPLIED GEOPHSCICS, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, *GENERAL*
- REYNOLDS, J.M.**, 1997 AN INTRODUCTION TO APPLIED ANS ENVIRONMENTAL GEOPHYSICS, WILEY, *GENERAL*.

Table des figures

Figure 1-1	Densité versus porosité	4
Figure 1-2	Propriétés physiques des roches et techniques géophysiques (P et S = effet prépondérant, respectivement secondaire sur la réponse géophysique)	4
Figure 1-3	Vitesse sismique des ondes P versus densité	
Figure 1-4	Caractéristiques des types de roches rencontrées en prospection géophysique	6
Figure 2-5	Relation entre la résistivité et la quantité de pyrite et de pentlandite présente dans un gabbro (les échantillons proviennent d'un minerai dans le Sud du Maine).	9
Figure 2-6	Résistivité de différents types d'eau	11
Figure 2-7	Résistivité de différentes eau et de polluants	12
Figure 2-8	ABaque 1: Résistivité – Température – Salinité	13
Figure 2-9	ABaque 1b : Résistivité – Température – Salinité	14
Figure 2-10	ABaque 2: Résistivité des filtrats et des eaux de formation	15
Figure 2-11	Quelques caractéristiques de sédiments meubles, d'après l'U.S. Geological.	17
Figure 2-12	ABaque 3 : Porosité versus facteur de formation.	18
Figure 2-13	Valeurs de la porosité efficace moyenne pour les principaux réservoirs	19
Figure 2-14	Porosité, perméabilité et résistivité de différentes roches	22
Figure 2-15	Lithologie et résistivité des Molasses du Plateau Suisse	22
Figure 2-16	Granulométrie et perméabilité (1 darcy = 1 cm ³ /s à travers 1 cm ² sous un gradient hydraulique de 1 atm/cm)	23
Figure 2-17	Plage des résistivités de différentes formations	24
Figure 2-18	Répartition des résistivités : porosités et perméabilités	25
Figure 2-19	Résistivité et conductivité	26
Figure 3-20	Représentation des équipotentiels et des filets de courant pour une source unique	28
Figure 3-21	Equipotentiels lignes de courant dans un sol homogène	29
Figure 3-22	Décroissance de la densité de courant sous le centre de AB = L	31
Figure 3-23	Equipotentiels et filets de courant pour différentes configuration d'électrode (en haut : une électrode positive, au milieu : une électrode positive et une négative ; en bas : deux électrodes positives)	38
Figure 3-24	Equipotentiels et filets de courant à proximité d'un corps résistant (en haut) et d'un corps conducteur (en bas)	39
Figure 3-25	Comportement des équipotentiels au contact de deux terrains	40
Figure 3-26	Effet de la topographie en terrain non homogène	41
Figure 3-27	Effet de la topographie en terrain homogène	42
Figure 3-28	Mise à la masse en prospection de surface	47
Figure 3-29	Mise à la masse en prospection de forage	48
Figure 3-30	Exemple de mise à la masse (La Salvetat)	49
Figure 3-30b	Exemple de mise à la masse en environnement (Polnant)	50
Figure 4-31	Arrangements des électrodes de courant (C1 et C2) et de potentiel (P1 et P2) à la surface d'un terrain homogène et isotrope.	51
Figure 4-32	Les principaux dispositifs	59
Figure 4-33	Valeurs de la fonction de sensibilité pour les dispositifs les plus courants	62
Figure 4-34	Variations des résistivités apparentes avec la longueur AB de la ligne d'émission ($\rho_2 > \rho_1 < \rho_3$)	63
Figure 4-35	Effet d'une conduite enterrée (supposée infiniment conductrice)	65
Figure 4-36	Profil AB sur contact vertical et sur contact incliné (MN infiniment petit)	66
Figure 4-37	Profil de résistivité perpendiculaire à une couche verticale conductrice d'épaisseur AB/2 (MN infiniment petit)	67
Figure 4-38	Profil des résistivités apparentes (ρ app.) au passage d'un mur vertical infini	68
Figure 4-39	Effets comparés de l'influence de structures cylindriques et de dômes de même diamètre (A et B très éloignés)	69
Figure 4-40	Effet d'un cylindre	70
Figure 4-41	Exemple de carte de résistivités apparentes (Bâle 1999, AB = 10m)	72
Figure 4-42	Etude géophysique de « La Salvetat », Novembre 1993, AB = 40m	73
Figure 4-43	Etude géophysique de « La Salvetat », Novembre 1993, AB = 100m	74
Figure 5-45	Utilisation de l'Abaque pour deux terrains	77
Figure 5-46	Feuille d'acquisition de sondages (dispositif Schlumberger)	78
Figure 5-47	Abaque CH1	79

Figure 5-48	Conductance longitudinale et résistance transverse	82
Figure 5-49	Exemple de sondage à un terrain	85
Figure 5-50	Exemple de sondage à deux terrains	86
Figure 6-51	Les quatre cas possible d'un sondage sur trois terrains	87
Figure 6-52	Exemple de sondages à trois terrains de type K	89
Figure 6-53	Exemples d'équivalence pour deux sondages réels	90
Figure 6-54	Exemple de suppression sur un sondage réel	92
Figure 6-55	Limites entre terrains détectables et supprimés pour des sondages de type H, A, K et Q (en haut) ainsi qu'un exemple de suppression sur un sondage réel (en bas)	93
Figure 6-56	Interprétation d'un sondage électrique contrôlé par ordinateur	94