
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université TAHRI Mohamed, Béchar



Faculté de Technologie
Département de Génie Civil & Hydraulique

Polycopié Pédagogique
de
-Cours -
Intitulé :
"Techniques de
Reconnaissance et
Forages d'eau"
Code de la Matière : - F322
Niveau : M2 (S3.)
Filière (s) et Spécialité (s) :
(Hydraulique Urbaine)
MEKKAOUI Abderrahmane

Année Universitaire : 2024/2025

Avant-propos

Tout d'abord, je dédie le présent polycopié" à la mémoire de mon père "Didi Ben Ahmed"

Ayant eu la bonne fortune de pouvoir mener des travaux de reconnaissance et de prospection sur plusieurs sites, me permettant de cumuler une expérience professionnelle en domaine de géologie minière, en géotechnique et en hydrogéologie.

la reconnaissance dépend fondamentalement du but, puis découle l'échelle du travail et les techniques et les méthodes. Ce polycopié pédagogique propose des cours du module F222 "reconnaissance et forages". Ils sont dédiés aux étudiants en M2 Hydraulique Urbaine, à une large gamme d'étudiants de tous niveaux en Sciences de la Terre et plus généralement aux praticiens, concernés aux questions "Quelles sont les caractéristiques des sols et du sous sol et que cache t-il? Ces questions chevauchent sur la prospection minière, de pétrolière et la géologie de l'ingénieur et la Géotechnique, voir même l'hydrogéologie.

ce polycopié comprend deux parties complémentaires.

Partie A traite le canevas général de la reconnaissance

Partie B se réserve aux techniques de forages et au forage d'eau.

Le propos est de venir en aide au lecteur, étudiant de l'Université TAHRI Mohamed de Béchar, ou autre, dans sa compréhension du Canevas Général de Reconnaissance et forage

processus géologiques, en le baladant dans des échelles de temps ou d'espace très variées et en tirant ici ou là sur la pelote de la complexité par quelques brins.

Il s'agit là d'une synthèse tirée de différents ouvrages en relation avec les thématiques proposées, étayée par mes expériences professionnelles. Il présente une certaine conformément aux programmes officiels (canevas de formation).

Des définitions et des rappels d'ordre linguistique sur les termes (connaitre, reconnaître, explorer, prospecter....). Il évoque en deuxième volet le canevas général de reconnaissance et quelques conseils pour s'assurer d'un déroulement meilleur d'une mission de reconnaissance. Le dernier volet est réservé aux forages sous différents aspects.

Ce cours s'adresse aux étudiants en géologie ayant choisi une direction en géologie de l'ingénieur ou à de futurs ingénieurs civils et en environnement. Il se fixe comme objectif de donner un minimum de connaissances sur les méthodes de reconnaissances directes sur le terrain dans les divers domaines couverts par la géologie de

l'ingénieur et de l'environnement. En effet, l'expérience montre que beaucoup d'étudiants arrivent dans leur première situation professionnelle sans jamais n'avoir vu et relevé un sondage de reconnaissance. Au contraire des méthodes géophysiques, qui sont intensivement enseignées dans le cursus des géologues, les méthodes directes souffrent d'un grave défaut de formation qui finit par porter préjudice à la formation tout entière, notamment aux yeux des futurs employeurs.

Les étudiants qui suivent ce cours ne deviennent pas ingénieurs de forage mais ils acquièrent des bases théoriques sur toutes les méthodes que l'on peut rencontrer dans tous les pays du monde (y compris dans les pays en développement). Ils ont l'occasion de mettre en pratique ces bases dans des exercices sur des cas vécus sur le terrain. Ils seront sans doute plus à l'aise pour prendre des responsabilités rapidement dans des bureaux d'étude en géologie de l'ingénieur et en géotechnique.

Partie

A

	Pages
Cours 1 : Généralités et Acteurs scientifiques	
Cours 2 : Canevas de reconnaisances	
Cours 3 : Méthodes et techniques directes	
Cours 4 : Méthodes et techniques indirectes	
Cours 5: Méthodes et techniques in situ	
Cours 6 : Méthodes et techniques en laboratoire	

Partie

B

Les géotechniciens, les géologues, les géophysiciens, et les hydrogéologues ne peuvent pas apporter à la fin de leurs travaux que des probabilités quelle que soient leur intelligence, la précision de leur mesure, la qualité de leur interprétation et la qualité de leur observation. Ainsi « pour trouver du pétrole, du gaz ou de l'eau, il faut de toute façon forer un puits ».

Cette phrase d'un pétrolier américain, Alfred JACOBEN est devenue une sorte de proverbe chez les foreurs et sondeurs. Seul, le forage permet de savoir et de confirmer si une structure contient ou non des fluides ou des minéraux en quantité et qualité suffisantes pour justifier l'exploitation.

	page
Cours 7. Généralités sur les forages	
Cours 8 : Techniques de forages	
Cours 9 : Forage d'eau	

Cours 10: Forages miniers	
Cours 11 : Conseils généraux	

Cours 2

Canevas Général de
Reconnaissances
du sols et sous sol

	1. Introduction 2. Esquisse globale du canevas de reconnaissance 2.1. Définition 2.2. Canevas de reconnaissance 3. Conduite des travaux de Reconnaissances et esprits de Stratégie et tactique 4. Conclusion <i>Pour en savoir plus (Bibliographie)</i> Bibliographie.....	Page 11 19
---	--	----------------------

I.1. Introduction

Le sol est défini comme la couche supérieure de la croûte terrestre composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes.

Le sol n'est pas seulement le support des constructions et des activités humaines, mais remplit aussi de nombreuses fonctions indispensables à l'équilibre des écosystèmes et constitue une interface entre l'air et l'eau (eaux superficielles et souterraines).

Il peut subir une dégradation physique (érosion, tassemement, saturation en eau...), chimique (acidification, salinisation, contamination par des micropolluants comme les métaux lourds et les produits phytosanitaires...) ou biologique (réduction de la diversité biologique, modification de la minéralisation de l'humus).

Le **sous sol** désigne l'ensemble des couches de l'écorce terrestre situées sous la couche superficielle renferme, souvent des aquifères et des concentrations de substances utiles (métalliques ou non métalliques très recherchées

I.2. Canevas de reconnaissance

I.2.1. Définition "Canevas"

Le mot canevas veut dire ensemble des lignes directives ou des principaux points de quelques chose. Il signifie aussi un plan à suivre.

I.2.2. Le Canevas de reconnaissance

Il se définit comme l'ensemble des méthodes et techniques permettant de vaincre toutes les questions relatives au sol et au sous sol.

A titre d'exemple, on cite les questions suivantes :

- Quelle est la nature du sol et le sous sol?
- Quelles sont les formations géologiques situées sous le sol?
- A quelle profondeur se trouve chaque formation Géologique?
- Quelle est épaisseur de chaque formation?
- Y a t'il des formations aquifères et des formations aquiclude?
- etc.....

Le canevas de reconnaissance est un ensemble de méthodes et techniques synthétisées dans le tableau suivant (fig. 1) :

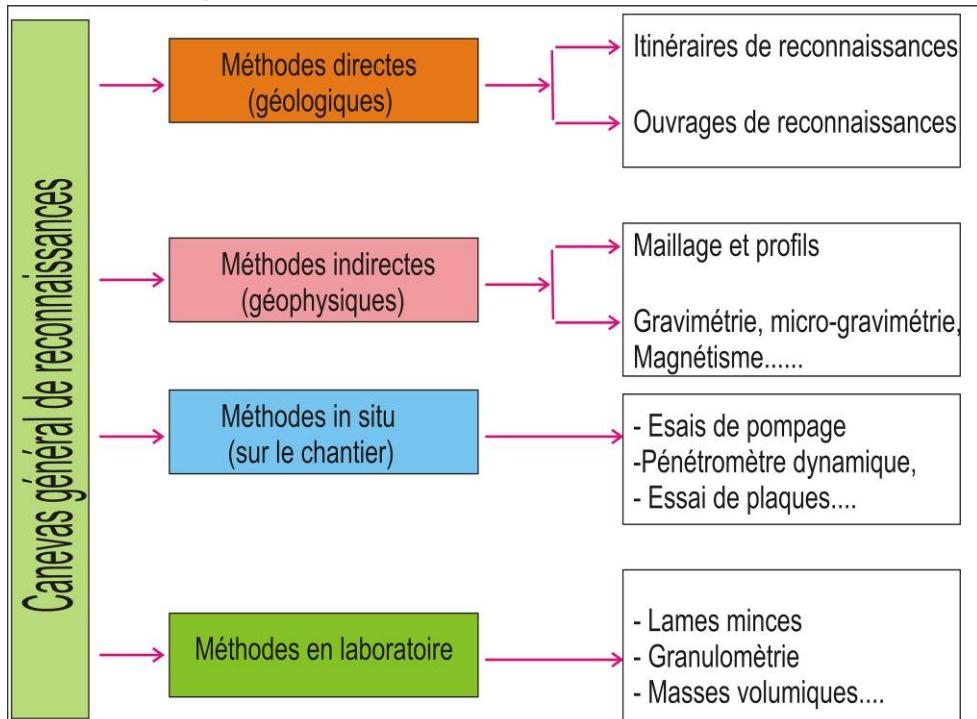


Figure 1: Esquisse du canevas de reconnaissance

2.1. Méthodes Directes (méthodes géologiques)

s'appuient sur la géologie de l'ingénieur, qui **La géologie de l'ingénieur (Engineering Geology)**, appelée aussi dans un sens restrictif géologie

du génie civil, applique les principes et les méthodes des sciences minérales et connexes aux travaux de l'ingénieur.

Ce dernier ne peut en effet négliger ni les caractéristiques des sols, des roches, des massifs rocheux et des eaux souterraines, ni le rôle des processus géologiques en action ou potentiels. Assumant ainsi la jonction entre les observations du naturaliste et l'art de l'ingénieur, la géologie de l'ingénieur se trouve tributaire à la fois des conditions naturelles d'un site ou d'un territoire et de la nature d'un projet, et doit faire appel, entre autres disciplines, à la géologie classique, à la pétrographie, à la mécanique des sols et des roches, à la géotechnique et à l'hydrogéologie.

Son originalité réside dans la multiplicité de ses sources, la diversité de ses méthodes et la spécificité de ses objectifs, bien que son but ultime se résume à la définition complète et précise des conditions naturelles et de leur évolution prévisible, que l'ingénieur doit connaître pour maîtriser l'environnement en s'y adaptant.

Située au carrefour de sciences et de techniques diverses, la géologie de l'ingénieur implique un travail d'équipe. Les résultats obtenus doivent, d'autre part, être non seulement interprétés collégialement mais aussi présentés sous une forme utile et adéquate aux ingénieurs, aux architectes et aux planificateurs ainsi qu'à des interlocuteurs inhabituels comme les promoteurs, les fonctionnaires, les sociologues, les économistes, les juristes ou les hommes politiques.

La géologie de l'ingénieur s'est surtout développée depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. Elle a acquis une identité propre, comme en témoignent les nombreux traités ou revues scientifiques qui lui sont consacrés et les congrès et colloques organisés par des associations internationales et des comités nationaux, qui groupent des milliers de spécialistes et un nombre exceptionnel d'adhérents non géologues. Stimulée par les besoins en constante augmentation de la société industrielle, et les impulsions émanant des sciences et techniques dont elle procède, cette branche de la géologie appliquée connaît des prolongements remarquables : géologie urbaine dans les zones d'habitat où s'accumulent les sujétions et géologie de l'environnement, à laquelle incombent, au-delà des réalisations immédiates, la prévision et l'élimination de dommages dus, à moyen et à long terme, à l'intervention de facteurs naturels et anthropiques, et à leurs interactions.

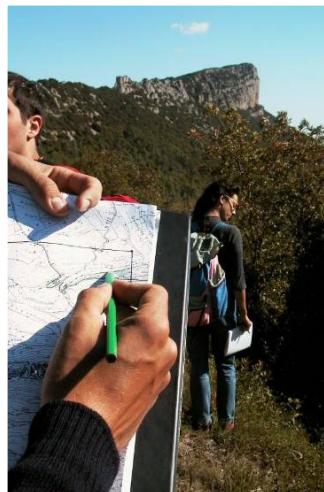
L'ampleur des recherches sur le terrain et dans les laboratoires, l'instauration d'enseignements spécifiques, la large diffusion des résultats, l'utilisation des moyens de l'informatique et de la modélisation témoignent enfin du rôle socio-économique de la géologie de l'ingénieur et de son

impact sur l'opinion publique. Dans la nécessaire coopération mondiale, elle occupe une place privilégiée pour le transfert de connaissances et de technologies vers les pays en voie de développement.

Une branche de la géologie appliquée

L'application des techniques et principes de la géologie aux sols, aux roches et aux eaux souterraines vise à connaître et à interpréter correctement, avant de les transmettre aux responsables, les conditions affectant la conception, le projet, l'exécution, l'efficacité, la sécurité et l'économie des structures, et le développement rationnel des ressources minérales et aquifères du sous-sol, la protection contre les risques naturels et contre ceux qu'entraînent les activités humaines.

Son domaine comprend une telle variété d'objets et implique le recours à tant de discipline.



coll. 2003 Pierre Savaton (<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/carte-geologique.xml>)

2.2. Méthodes et techniques indirectes dites méthodes géophysiques

Ce sont des méthodes et les techniques de la géophysique qui se basent sur l'application des lois physiques sur les roches et le globe terrestre. Les différentes méthodes de prospection géophysique nous renseignent sur la distribution des propriétés physiques du sous-sol.

Leur avantage principal réside dans leurs caractères non invasif et non destructif. Le milieu n'est pas perturbé de façon permanente après leur passage. Elles permettent également la couverture d'une grande surface ou d'un grand volume à faible coût et peuvent être mises en oeuvre dans pratiquement tous les types d'environnements. Autre avantage: elles peuvent être utilisées en imagerie en surface et/ou en profondeur pour obtenir une image à un temps t donné, mais on peut également les utiliser pour un suivi temporel. Avant de se lancer dans la présentation des méthodes de prospection géophysiques perse, nous allons débuter par un survol des principales propriétés physiques des roches afin d'avoir une idée de ce qu'on va tenter de caractériser avec la géophysique. On pourra ensuite passer à la présentation des différentes méthodes.

La géophysique appliquée est la partie de la géophysique dont nous attendons des informations pour les activités humaines dans différents domaines. Dans le sens originel du mot, la géophysique appliquée correspond à la prospection géophysique, par exemple, la recherche de substances utiles dans le sous-sol ou d'objets posés sur le fond de l'océan, pour les cas qui nous concernent. Cette diversité d'objectifs et d'échelles implique l'existence de nombreuses méthodes :

La gravimétrie La méthode magnétique La méthode tellurique La scintillométrie Les méthodes acoustiques et sismiques La méthode électrique Les méthodes électromagnétiques Elles sont toutes des outils essentiels utilisés dans des domaines tels que : La recherche scientifique La prospection pétrolière et le domaine parapétrolier Le génie civil La prospection minière L'hydrogéologie La pédologie La géothermie L'hydrogéologie L'archéologie D'un point de vue industriel, la prospection géophysique concerne presque exclusivement la recherche d'hydrocarbures, (environ 97 % en chiffre d'affaire) et c'est là qu'elle trouve le moteur de son développement.

L'objectif du géophysicien pétrolier est d'éviter les forages inutiles, le coût d'un puits étant extrêmement élevé. La prospection pétrolière ne peut donc se concevoir sans un usage intensif de levés géophysiques préalables aux forages eux-mêmes. L'objectif du géophysicien minier, en revanche, peut être simplement de préciser l'extension d'un gisement déjà connu. Des travaux de sismique sont par exemple conduits pour trouver la profondeur d'anciennes vallées depuis longtemps comblées, dans lesquelles des accumulations de minéraux intéressants ont pu se rassembler. D'un point de vue scientifique, l'emploi le plus fréquent de la géophysique est l'étude de grandes surfaces à distance. Nous utilisons par exemple souvent des méthodes aéroportées pour mesurer le champ magnétique naturel moyen ou pour étudier l'effet de champs électromagnétiques induits. La télédétection par satellites, méthode relativement récente, permet également d'obtenir des informations sur toute la surface du globe en peu de temps et d'efforts. Nous couvrons ainsi systématiquement, et à peu de frais, de grandes régions terrestres, parfois inaccessibles du sol.

N.B. le géologue travaille en étroite collaboration avec le géophysicien

2.3. Méthodes de reconnaissance in situ

Ce sont des essais qui se déroulent au niveau de terrain.

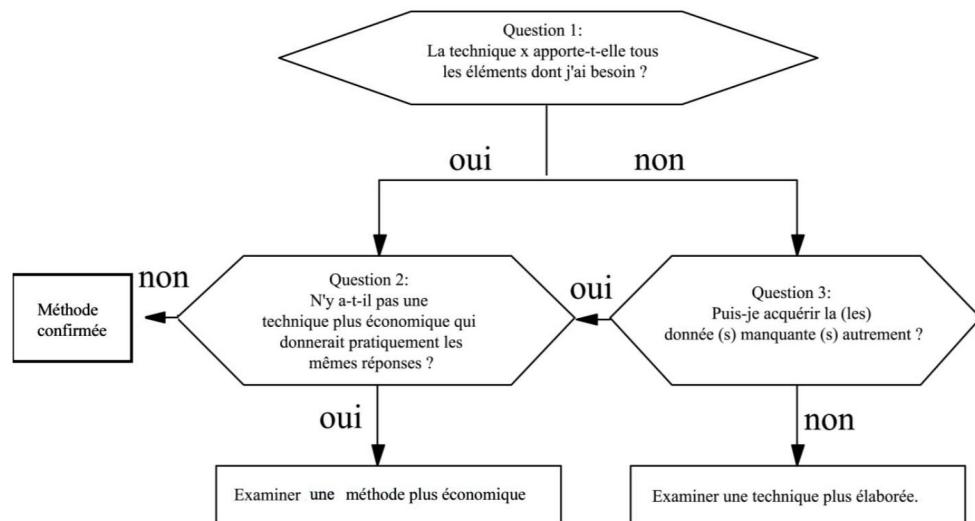
2.4. Méthodes et techniques en laboratoire

elles englobent sous les essais qui se déroulent au niveau du laboratoire. elles sont nombreuses et elles s'effectuent sur des échantillons qui exigent le représentativité aboutissant par homogénéisation et la réduction

Stratégie et tactique sont deux modalités différentes et présentées comme opposées de la gestion de l'action en vue de la quête de l'efficacité. Selon

les positionnements des uns et des autres protagonistes du champ et de l'espace du pouvoir, des choix différents sont faits. Le texte proposé consiste en une étude des logiques et formes de déploiement de l'une et de l'autre figures d'organisation de l'action ainsi que des conséquences qu'elles engendrent. À un moment où les techniques, les outils et les discours sur l'action et sa gestion mutent reconfigurant ainsi autrement les problématiques classiques, il est nécessaire et utile de relire les textes des différents penseurs de l'action afin d'en réévaluer la pertinence. Il est, à cet effet, un auteur dont la réflexion sur le statut de l'action non seulement résiste mais semble ouvrir des chemins et des perspectives analytiques nouvelles sur les complémentarités paradoxales des figures de l'action. Mais au-delà de la dimension purement technique, ces paradoxes disent autre chose sur l'éénigme humaine.

- **Le choix de la technique optimale** doit être fait en se posant les questions suivantes :
- Question 1 : La technique x apporte-t-elle tous les éléments dont j'ai besoin ?
- Question 2 : N'y a-t-il pas une technique plus économique qui donnerait pratiquement les mêmes réponses ?
- Question 3 : Puis-je acquérir la (les) donnée(s) manquante(s) par une autre méthode ?
- La réponse à ces questions permet de déterminer la technique la plus adéquate selon la figure ci dessous
- **A titre d'exemple**, les questions suivantes se posent souvent en pratique :
 - - Vaut-il la peine d'économiser x milliers **de francs** en faisant le sondage en destructif plutôt qu'en carottage continu ?
 - - Ne peut-on pas économiser un sondage carotté et passer directement au creusage d'un puits ?
 - Une méthode est parfois préférée à une autre en raison de la possibilité d'effectuer des essais ou de la nécessité d'implanter un équipement spécial dans le sondage. Certaines contraintes sont incontournables : par exemple, pour effectuer un essai de pompage dans un sondage, un diamètre minimum du trou de 110 mm est nécessaire pour placer une pompe immergée pouvant atteindre 200 l/mn.
 - Figure



• Figure 1.4. : Les critères de choix d'une technique de sondage.

- A titre d'exemple, les questions suivantes se posent souvent en pratique :
- - Vaut-il la peine d'économiser x milliers de francs en faisant le sondage en destructif plutôt qu'en carottage continu ?
- - Ne peut-on pas économiser un sondage carotté et passer directement au creusage d'un puits ?
- Une méthode est parfois préférée à une autre en raison de la possibilité d'effectuer des essais ou
- de la nécessité d'implanter un équipement spécial dans le sondage. Certaines contraintes sont incontournables : par exemple, pour effectuer un essai de pompage dans un sondage, un diamètre minimum du trou de 110 mm est nécessaire pour placer une pompe immergée pouvant atteindre 200 l/mn.
- **Le choix définitif** de la méthode et du programme des essais sont faits après avoir analysé en détail ce qu'offrent et n'offrent pas les différentes techniques à disposition. Une matrice d'évaluation est recommandée pour résumer les variantes. Nous verrons au

Bibliographie

Guinand, Sandra. (2020) Seaport Historic District : récits et mise en images d'un projet de redéveloppement du « plus ancien nouveau quartier de New York ». *Métropoles*. DOI: [10.4000/metropoles.7632](https://doi.org/10.4000/metropoles.7632)

Cours 3

Méthodes directes ou Méthodes Géologiques

	1. Introduction.....	Page de et
	
	2. Notion de cartographie.....	
	2.1. Carte topographie et géologique.....	
	2.3. Importance de la cartographie	
	3. Méthodes de reconnaissance directes	
	3.1. Principes de la reconnaissance directe.....	
	3.2. Itinéraires de reconnaissances	
	3. 2.1. Itinéraires libres	
	3. 2.2. Selon une maille	
	3. 2.3. Maille rectangulaire	
	3. 2.4. Maille carrée	
	3.3. Ouvrages de reconnaissance	
	.Tranchée	
	. Puits	
. Forage		
.Galerie		
4. Avantages et inconvénients		
5. Conclusion		
Pour en savoir plus		

1. Introduction

La géologie est une science d'une importance majeure tant sur les plans scientifiques, qu'économiques ou technologiques (Mekkaoui, 217). En effet, la géologie minière, discipline appliquée, s'intéresse à prospection les profondeurs pour mis à jours de minéraux. La géologie pétrolière explore le sous-sol pour découvrir des puits de gaz et de pétrole. L'hydrogéologue recherche les eaux souterraines pour répondre aux besoins d'une agglomération. Le géotechnicien s'intéresse à étudier le

sol et ses propriétés. En géologie de l'ingénieur, on cherche, par exemple, des matériaux de construction.

A chaque domaine d'application, on définit un objectif et on mis en œuvre des techniques spécifiques bien conçu afin de satisfaire de tel objectif. Cependant, ces disciplines prétendent communément à explorer (connaitre) les profondeurs de la terre.

Ce cours évoque des notions élémentaires sur la méthode et techniques de reconnaissance géologique, dies aussi directes dont le technicien de base est le géologue.

Cette méthode se base sur la cartographie sur lesquelles sont projetés les ouvrage de reconnaissance et sont suivi d'autres opérations, tel que levé géochimique, géophysique.....

La présentation cartographique évoque des notions de base de cartographie et échelle, puis maille de reconnaissance qui n'est pas bardeuse et absurde, c'est plutôt obéit à des règles et des normes.

. Notion de cartographie

Ensemble des opérations ayant pour objet l'élaboration, la rédaction et l'édition de cartes. elle correspond à une représentation spatiale d'une réalité géographique.

La carte c'est la représentation simplifiée sur un plan d'une portion de terrain obtenue par projection, dont les dimensions sont réduite selon un rapport appelé l'échelle de la carte (Joly F., 1976)

.Carte topographie et géologique

Tout travail de reconnaissance s'effectue sur une carte, soit topographique soit géologique.

La carte géologique ou topographique, document indispensable à toute approche du terrain, est une interprétation personnelle d'observations dispersées. Le géologue projette, sur le papier ou sur l'écran, sa culture scientifique, c'est-à-dire qu'il considère les objets après des opérations mentales et pas seulement avec des observations.

la carte est une publication scientifique réalisée à partir d'observations isolées, réunies en une hypothèse cohérente, conduite à partir des concepts personnels inscrits dans la culture de son temps.

L'identification des roches prélevées à différents affleurements permet de construire une carte géologique sur laquelle on reporte l'âge de la roche affleurant, le type de roche étant donné en légende ou dans le livret accompagnant la carte. La façon dont est déterminé l'âge de la roche vous sera enseignée en Terminale. Le code couleur utilisé est une convention : ex le bleu pour le Jurassique. On reporte aussi sur la carte des éléments structuraux tels que les failles ou les axes des plis (synclinaux ou anticlinaux), ainsi que le pendage des couches lorsqu'on a pu le déterminer.

. Importance de la cartographie

La cartographie constitue un des moyens privilégiés pour l'analyse et la communication en géographie. Elle sert à mieux comprendre l'espace, les territoires et les paysages. Elle est aussi utilisée dans des sciences connexes, démographie, économie dans le but de proposer une lecture spatialisée des phénomènes.

Sur une carte:

- On reporte des travaux réalisés et projetés
- On synthétise toutes les données dans le but de mieux appréhender investir les profondeur

3- Méthodes directes (Méthodes Géologiques)

3.1. Définition

Elles sont dites méthodes géologiques, qui signifient une maîtrise parfaites des disciplines de la géologie, particulièrement la géologie de l'ingénieur.

3.2. Principe

Ces méthodes consistent à couvrir tout le terrain choisi pour le projet par différentes techniques.

par des observations, des mesures et d'éventuels prélèvements d'échantillon.

3.3. Avantages et inconvénients

Ces méthodes offrent les avantages suivants :

- Observer directement et d'écrire les affleurements
- Mesurer les distances, les épaisseurs des couches, les directions et les pendage
- Echantillonner le roche et le sol.

3.3. Moyens de reconnaissance

3.1. Itinéraires de reconnaissance

le tableau ci dessous (Tab. 1) synthétise les itinéraires de reconnaissance :

▪ a. Itinéraires selon une maille	▪ b. Itinéraires libres
La reconnaissance s'effectue selon une maille, cette dernière est conditionnée par la nature de l'ouvrages à construire ou du projet, de l'objectif de la reconnaissance elle-même, de la structure géologiques et les détails souhaités (escomptés). Les connaissances déjà acquises jouent un rôle prépondérant dans le choix de la maille (Maille lâche, maille serrée), (Fig.2).	Si on possède déjà des connaissances sur le site, le géologue peut effectuer ses observations selon des itinéraires (lignes) brisés, indépendamment d'une maille régulière (Fig.2).

3. Méthodes de reconnaissance directes

La reconnaissance correspond à l'ensemble des moyens et techniques pour vaincre les questions relatives au sol et au sous sol.

Ces méthodes directes sont dites aussi "méthodes géologiques", menées par un scientifique, appelé "le géologue".

3.1. Principes de la reconnaissance directe

Il s'agit de travail purement de géologue basé sur 03 principes :

- Observer
- Mesurer
- Echantillonner

L'observation s'effectue sur les affleurements par observation directe. Comme on peut faire recours aux cartes géologiques et aux scènes satellitaires avec ou sans traitement d'image.

L'investigation géologique consiste en une sorte d'inventaire. Pour évoquer ce dernier, on peut retenir quelques thèmes d'observation dans le cadre d'un affleurement de terrains sédimentaires plissés

Un thème d'observation consiste à identifier des constituants décelables à l'échelle de l'affleurement :

- identification sommaire du (ou des) type(s) de roches (lithologie), pouvant mettre en évidence l'existence de différentes unités lithologiques correspondant à divers épisodes d'accumulation sédimentaire ; identification, généralement partielle et imprécise, parfois quantifiée, des constituants élémentaires de ces roches, ou encore des organismes qui y sont fossilisés.
- Ce travail s'effectue le plus souvent avec des moyens réduits (loupe, réactifs simples) et appelle nécessairement un prolongement au laboratoire : les techniques d'observation y sont mieux appropriées à l'étude d'objets de très faibles dimensions.

Pour cela les instruments du géologue sont, outre un casse-croûte et de bonnes chaussures :

- La boussole et la carte pour se repérer,
- Le carnet et l'appareil photo pour relever des informations,
- La règle et le mètre pour mesurer,
- Le marteau pour prélever les échantillons
- Loupe de terrain.



- - **Mesurer**, on mesure l'épaisseur d'une formation géologique directement, sur affleurements ou dans la coupe de forage.
- mesurer un pendage à l'aide d'une boussole

- - **Echantillonner**
 - prendre un bout (partie) d'une roche (ensemble) à condition que ce bout doit présenter l'ensemble (la représentativité)
- Les différents outils, supports et méthodes d'étude se résument comme suit :
- a. L'observation par satellites : Elle permet d'étudier de très grandes surfaces, à l'échelle des continents.
 - d. L'observation à l'œil nu : C'est l'aspect le plus courant de l'observation en Sciences de la Nature. On regarde directement les couches, les roches, les failles, les plis.
 - e. L'observation à la loupe : Elle permet d'observer le détail d'une roche, par exemple des cristaux de la taille du millimètre.
 - f. L'observation au microscope : Elle permet d'observer des éléments (cristaux par exemple), de l'ordre du dixième de millimètre.
 - g. Autres appareillages : Certains appareils comme le diffractomètre aux rayons X (RX) et le MEB (microscope optique à balayage) permettent d'étudier la structure et la composition chimique des minéraux.

4.1. Itinéraires de reconnaissances

Consiste à couvrir toute l'aire d'études par des observations directes, télédétection...

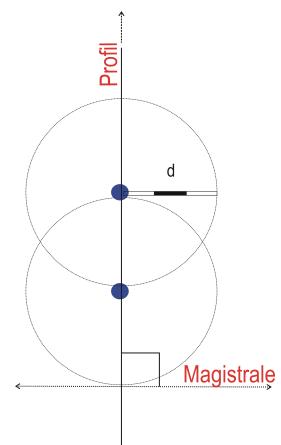


Figure itinéraires de reconnaissances directe

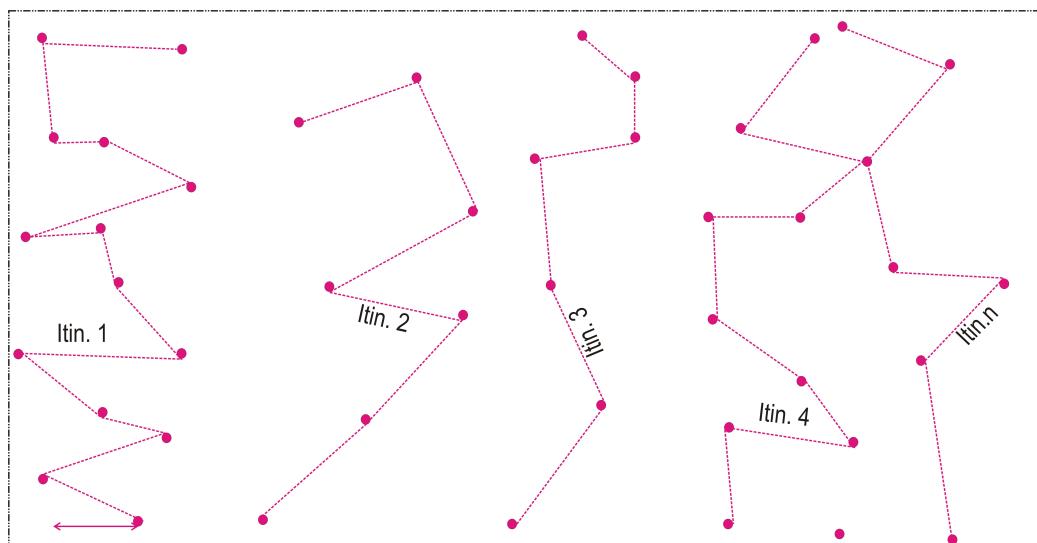
L'observation peut se faire à plusieurs échelles :

- à l'échelle du paysage,
- à l'échelle de l'affleurement : on relève la disposition relative (les uns par rapport aux autres) des différents éléments. On peut par exemple réaliser un croquis pour montrer ces différents éléments. On peut ensuite décrire précisément chaque élément :
 - débit de la roche : s'il y a un sens de cassure privilégié (par exemple débit en feuillet) ou si elle est massive,
 - litage : si la roche apparaît constituée de couches superposées,
 - cassures,
 - plissements,
 - pendage : on note l'inclinaison du plan de la couche de roche par rapport à l'horizontale.
- à l'échelle de la roche : une roche est un assemblage homogène de minéraux. On fera l'étude à l'œil nu sur une cassure fraîche et on notera quelques caractéristiques macroscopiques telle que sa couleur, sa texture (est-elle constituée de minéraux visibles à l'œil nu ou non et quels sont-ils). On peut parfois alors dire de quelle roche il s'agit mais la plupart du temps il faut prélever un échantillon pour l'examiner au laboratoire.

3.2. Itinéraires de reconnaissances

consistent à mener des observations directes sur le territoire à étudier
Les observations s'effectuent selon des itinéraires selon une maille ou en itinéraires libres (zigzags).

3.2.1. Itinéraires libres, on mène des itinéraires libres selon l'objectif et le degré de connaissances acquises.



exemple 2

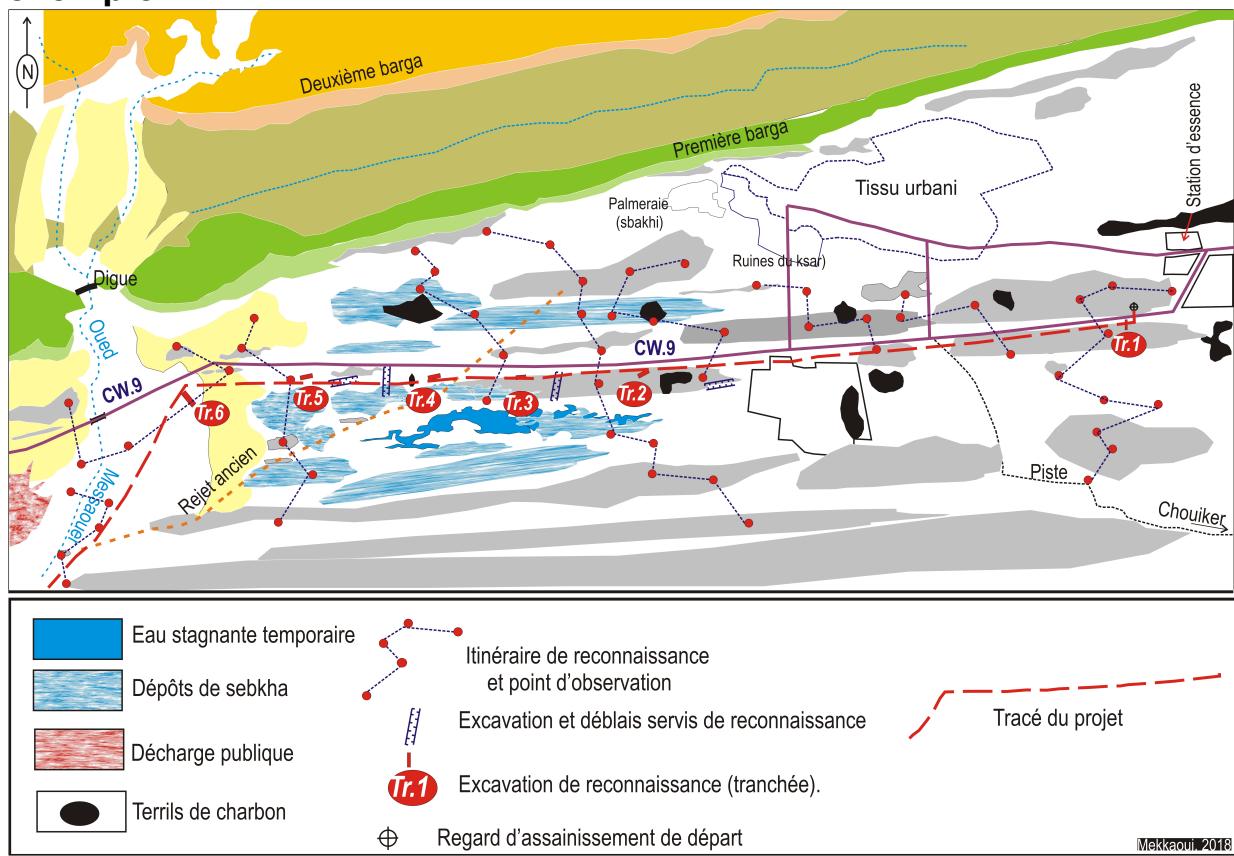


figure itinéraires libres de reconnaissance

3.2.2. selon une maille, dite reconnaissance systématiques pour une reconnaissance de précision.

- . Maille carrée implique que le pendage des strates est horizontal ('structures tabulaires')
- . Maille rectangulaire, implique que les strates sont obliques.

La maille est matérialisée par des piquetages en bois (fig.)..
la magistrale, piquets plus longues
les piquets d'observation
exemple, une reconnaissance à l'échelle 1/50000e

D=100m, d=25m
échelle 1/50000

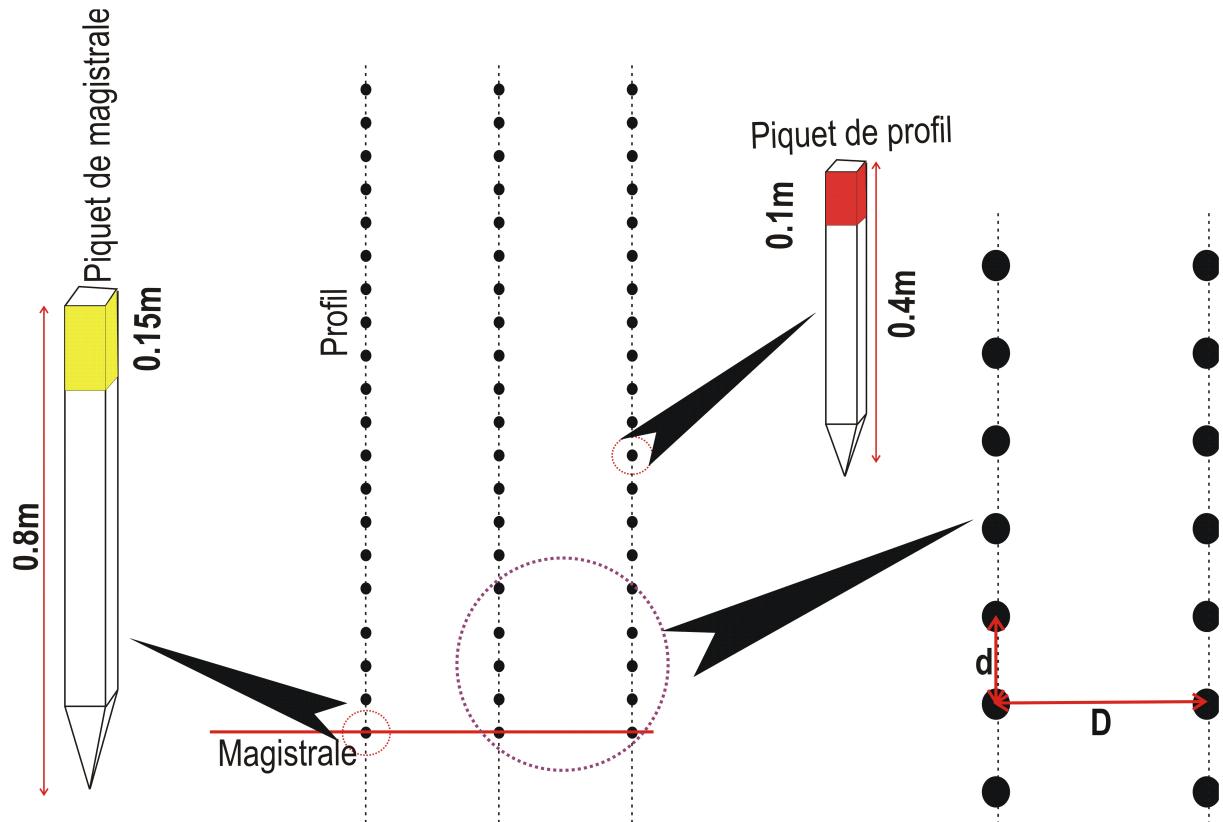
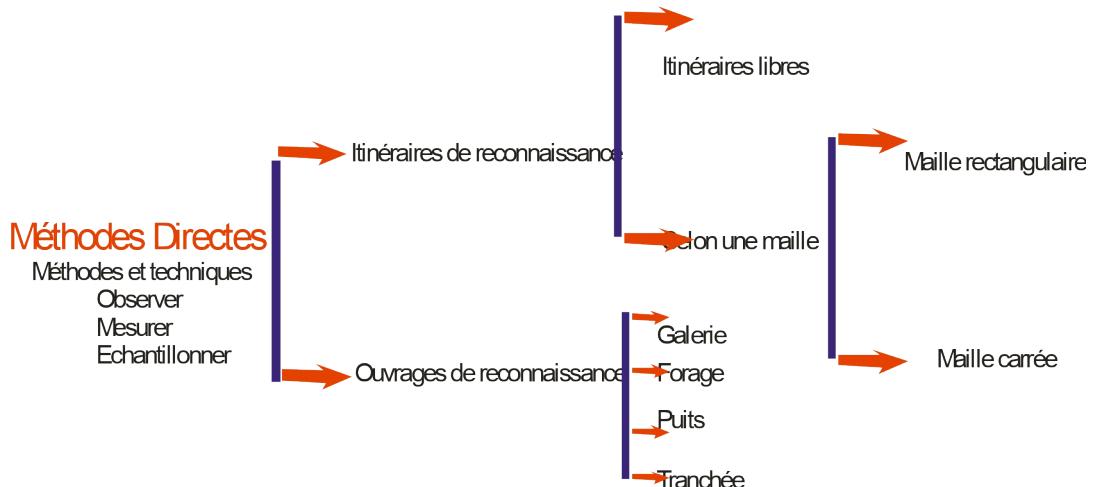


figure maille et piquetage

Récapitulation



Ouvrages De Reconnaissance

3.4. ouvrages de reconnaissance

3.2-Ouvrages de reconnaissances, Ces ouvrages sont des moyens pour enlever toutes les ambiguïtés (**Fig.3**), leurs Objectifs sont:

- Recherche du substratum, sous couverture peu épaisse
- Épaisseur d'altération de ce substratum
- Prélèvement d'échantillons pour essais mécaniques
- Réalisation d'essais in situ de mécanique des sols

- Etablir une coupe géologique argumentée.

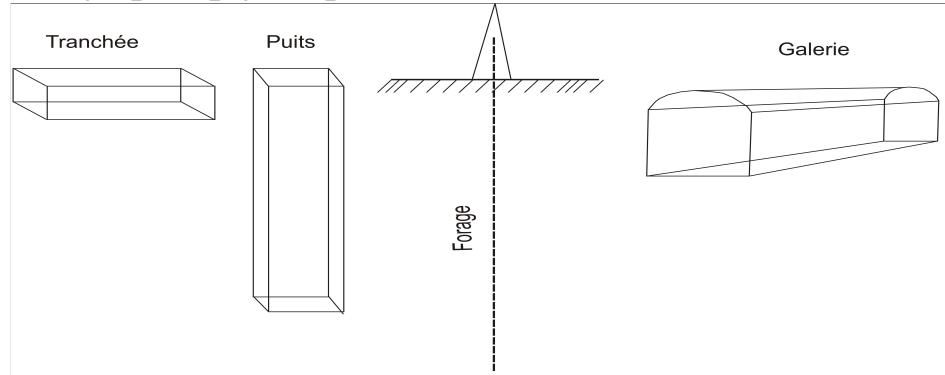


Figure 3 : Ouvrages de reconnaissance

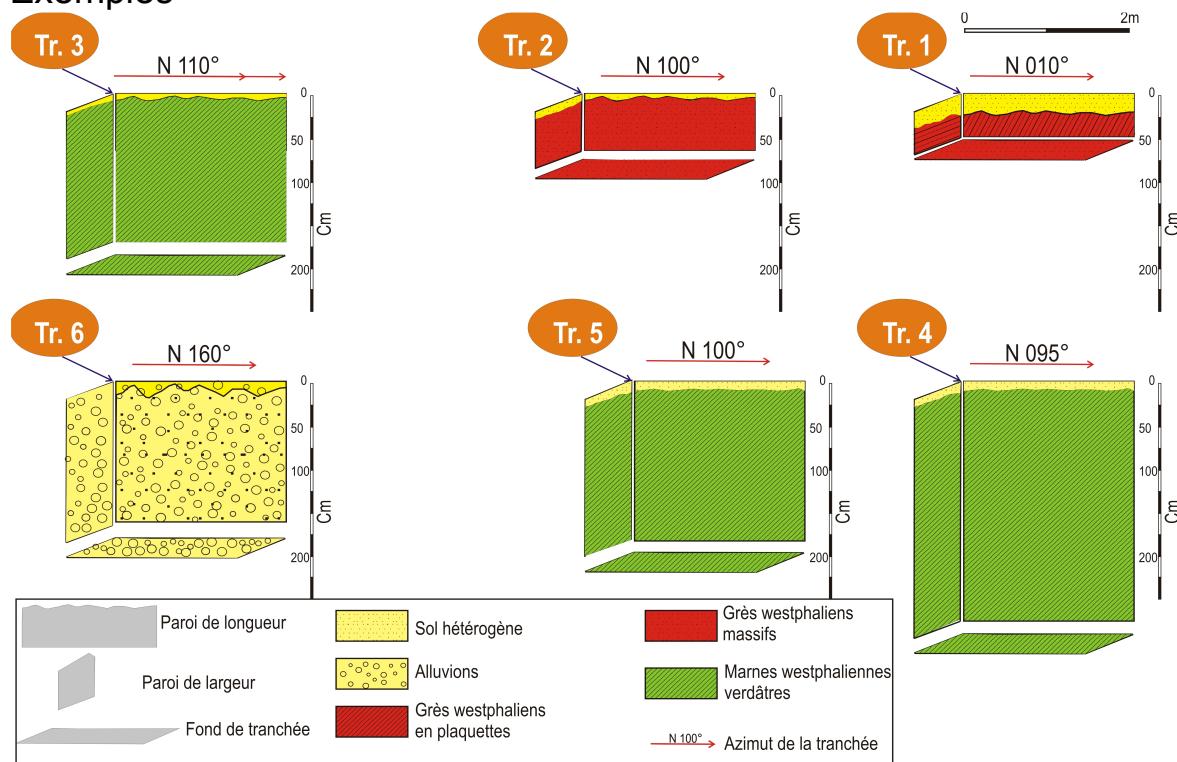
Tranchées permet d'explorer le sol sur une faible profondeur. ses dimensions sont en général 1m de largeur, 2.5m de profondeur et sa longueur peut atteindre jusqu'à 10m.

Puits permettant d'investir d'avantage en profondeur. Il s'agit d'une section de 1m², et il peut atteindre 25 m.

- Galeries

Il s'agit d'une technique beaucoup plus coûteuse qui n'est généralement mise en œuvre que pour des reconnaissances à gros budget (appuis de barrage, travaux souterrains). Les buts restent sensiblement les mêmes que dans le cas précédent, mais l'accent est mis sur la reconnaissance du bed rock (nature, fracturation et altération) et sur la possibilité de réaliser des essais in situ.

Exemples



Conclusion

la reconnaissance directe, di aussi méthodes géologiques, consiste à observer, mesurer et échantillonner.

les itinéraires s'effectuent , selon une maille (**DXd**) selon le but recherché.

les ouvrages sont la fouille, le puis, la galerie et le forage

pour en savoir plus.

- précis de cartographie

MILLES S., LAGOFUN J., 1999a – Topographie et topométrie modernes. Techniques de mesure et de représentation. Paris, éd. Eyrolles, 1, 526 p

CERTU, 2011a – La standardisation des données géographiques. Comprendre l'action de la Covadis et savoir lire un géostandard. Éd. du Certu, coll. Dossiers, 32 p

CERTU, 2011a – La standardisation des données géographiques. Comprendre l'action de la Covadis et savoir lire un géostandard. Éd. du Certu, coll. Dossiers, 32 p

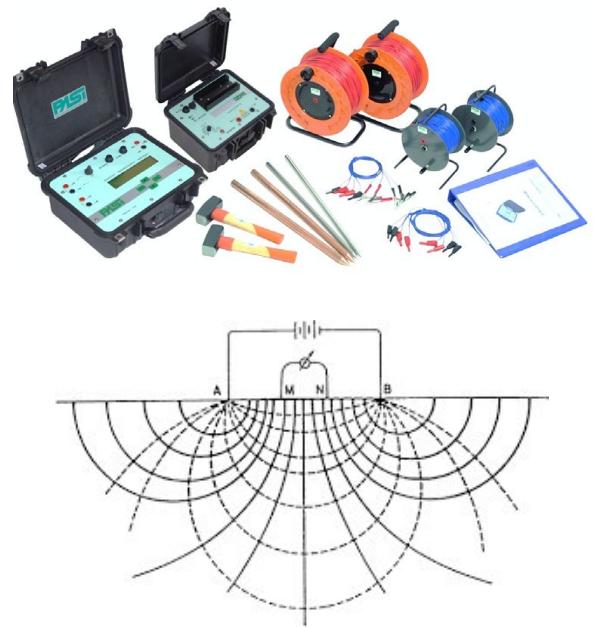
Cours 04

Méthodes indirectes Géophysique Appliquée

Les méthodes de prospection électriques

Plan

Introduction
définition de la géophysique
but de la géophysique
principes
méthodes de la géophysique
gravimétrie
magnétisme
sismique
Méthodes électriques



I. Introduction

La plus ancienne utilisation des méthodes électriques date de **Robert W. Fox (1830)**. Il a remarqué qu'il y a une circulation du courant électrique dans les mines de cuivre.

En **1882**, **Carl Barus** conduit des expériences de prospection électrique en introduisant des électrodes non polarisables.

Les bases de cette technique ont été faites par **Conrad Schlumberger**, en **1912**, pour l'utilisation active des méthodes électriques dans la terre via des sources contrôlées (Fig. 1). Cette technique devient une méthode **commerciale** utilisée, surtout, dans le domaine minier.



Figure 1 : Photo prise durant les premières compagnies d'acquisition électrique en 1912.

II. Résistivité : Notions et caractéristiques

La résistivité électrique d'une formation géologique est un paramètre de base qui reflète son contenu en fluides (eau ou hydrocarbures).

La résistivité d'une roche dépend de la qualité de l'électrolyte (résistivité de l'eau interstitielle), de sa quantité (**porosité**) dans la roche ainsi que de son mode de distribution (**Isotropie**).

La prospection n'atteint que des valeurs moyennes de la résistivité, relatives à des volumes de terrain en place. Les valeurs de la résistivité sont très différentes des mesures obtenues sur échantillon à cause des hétérogénéités locales que peuvent présenter les formations. Les valeurs de la résistivité des eaux ou des roches varient de 0,2 (l'eau de mer) à 10000 Ohm*m (sable et gravier sec et calcaire) d'un milieu à un autre (Tab. 1).

Tableau 1 : Intervalle de variation des valeurs de résistivité de différents milieux.

Eaux ou roches	Résistivité (en Ohm.m)
Eau de mer	0.2
Eau de nappes alluviales	10 – 30
Eau de source	50 – 100
Sables et graviers secs	1000 – 10 000
Sables et graviers imbibés d'eau douce	50 – 500
Sables et graviers imbibés d'eau salée	0.5 – 5
Argiles	2- 20
Marnes	20 – 100
Calcaires	300 – 10 000
Grès argileux	50 – 300
Grès, Quartzites	300 – 10 000

 Réservoirs résistants

 Roches conductrices

- Relation entre la Résistivité/Roche

La relation entre la résistivité et la nature du terrain est très étroite. Cependant toute variation de faciès va influencer directement sur la variation de résistivité. Mais la valeur de résistivité ne permet jamais la détermination du faciès ou l'âge de la couche.

La résistivité mesurée (moyenne) ne montre pas les variations lithologiques dans le cas d'une couche mince empilée dans une formation de grande épaisseur (Fig. 2).

R ? →

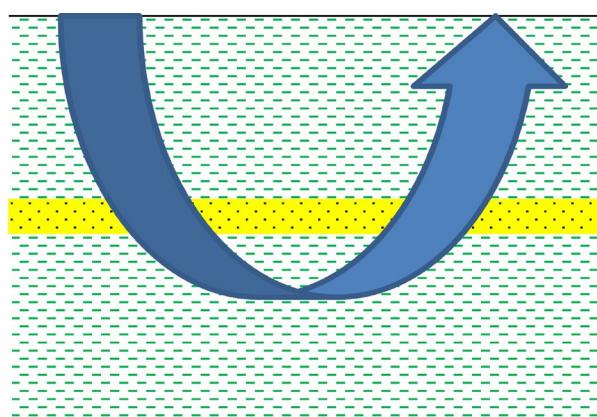


Figure 2: illustration schématique qui illustre la négligence électrique d'une intercalation de mince couche de sable dans une couche d'argile d'épaisseur importante.

- Anisotropie de terrain

Les **résistivités** des roches **varient** en fonction de la **direction** du courant qui les traverse, on dit qu'elles sont **anisotropes**. Cette anisotropie est due à la structure-même des roches. Cependant, les terrains sédimentaires sont généralement plus résistants dans la direction perpendiculaire au plan de stratification, il s'agit alors de micro-anisotropie (Fig. 3).

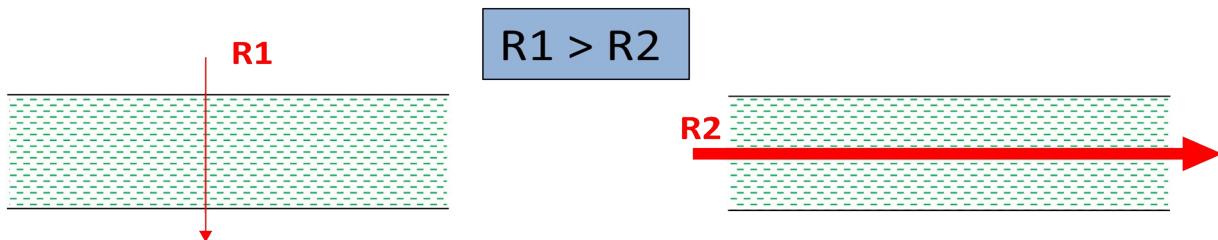


Figure 3 : Illustration schématique de l'anisotropie de la résistivité d'une couche en relation avec le plan de stratification.

III. Principe des méthodes électriques

Le principe de la méthode électrique repose essentiellement sur l'interprétation de la résistance électrique du terrain. C'est par la mesure d'une différence de potentiel (méthodes des potentiels), d'une part, et surtout d'une intensité, d'autre part, que l'on accède à la valeur de la résistance.

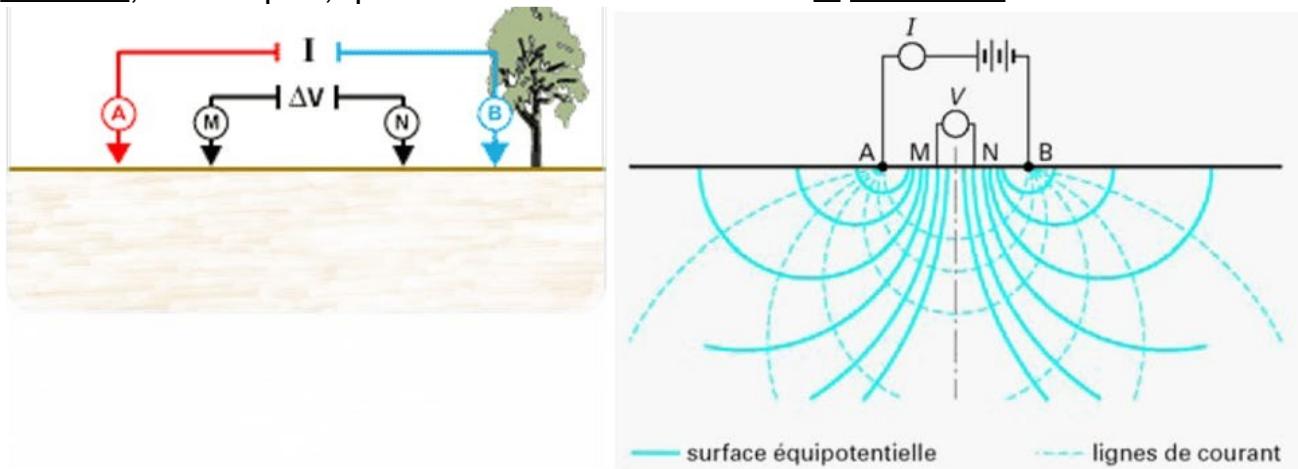


Figure 4 : Schéma de la mise en œuvre par un quadripôle

Dans un milieu homogène de résistivité \times et avec deux pôles **A** et **B**, l'action conjuguée de ces derniers donnera :

- **Le potentiel en M** : $V_M = V_M(A) - V_M(B) = \times I/2 \cdot (1/MA - 1/MB)$
- **Le potentiel en N** : $V_N = V_N(A) - V_N(B) = \times I/2 \cdot (1/NA - 1/NB)$

Avec: \times : résistivité (Ohm.m); V : potentiel (mV); I : intensité de courant (mA); MA, MB, NA et NB : distances entre les électrodes (m).

La différence de potentiel entre M et N est :

- $V_M - V_N = \times I/2 \cdot (1/MA - 1/MB - 1/NA + 1/NB)$

- **La résistivité $\chi = 2 \cdot \frac{\Delta V}{I} \cdot (1/MA - 1/MB - 1/NA + 1/NB)$**

- ✓ Si le sous-sol est homogène et isotrope, lors d'une prospection avec ce type de dispositif (quadripôle AMNB), on obtiendra la **résistivité vraie**.
- ✓ Si par contre le sous-sol est hétérogène, on mesurera la **résistivité apparente**.
- ✓ Si on considère un sous-sol constitué de **n couches planes**, homogènes et isotropes, un tel modèle où la résistivité est fonction de la profondeur uniquement, correspond au modèle tabulaire ou modèle à une dimension (1D).

La résistivité $\chi = 2 \cdot \frac{\Delta V}{I} \cdot (1/MA - 1/MB - 1/NA + 1/NB)$; Que l'on peut écrire $\chi = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$

-1

Avec : $K = 2 \cdot (1/MA - 1/MB - 1/NA + 1/NB)$; Où K est le facteur géométrique. Pour un dispositif symétrique par rapport à O (milieu d'AB) le facteur géométrique K vaut :

- $K = \frac{1}{2} \cdot MA \cdot NA / MN$

Le coefficient géométrique K est tributaire de la configuration géométrique des électrodes. Selon leurs dispositions on peut distinguer plusieurs dispositifs dont les plus utilisés sont le quadripôle de Schlumberger et le quadripôle de Wenner.

➤ Dispositif Schlumberger

Il s'agit d'un dispositif symétrique dont A, M, N et B sont alignées, O représente le centre de symétrie (Fig. 5).



Figure 5 : Représentation schématique de la configuration Schlumberger.

On pose $OA = OB = a$ $OM = ON = b$

$$\text{Par } \rho = \frac{2}{a} \sqrt{a^2 - b^2} / 4b \cdot \Delta V / I \quad \rho \approx \frac{2/2b \cdot \Delta V / I}{a a}$$

2

2 <<1]

Le coefficient géométrique vaut donc : $2b / 2b$ [si $b / a = \pi$]

Les résultats de calcul **pour les structures 1D** ont conduit à la construction d'abaques, très utilisés autre fois pour l'interprétation manuelle des sondages électriques (Fig. 6). Actuellement, l'interprétation se fait systématiquement, à l'aide de programmes sur ordinateurs.

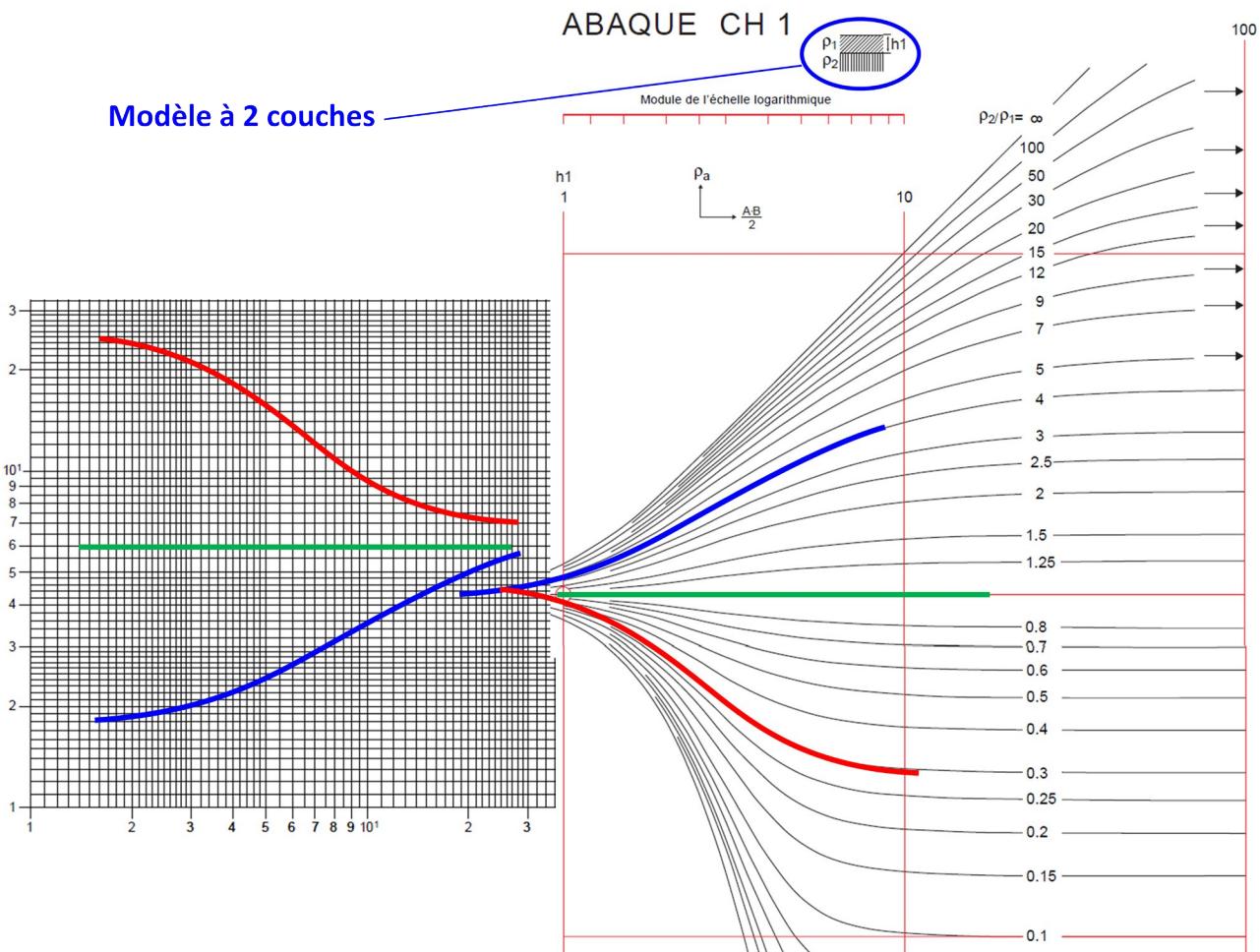


Figure 6 : Explication du mode d'utilisation des abaques pour l'interprétation manuelle des sondages électriques.

➤ Dispositif Wenner

Il s'agit d'un dispositif dont les électrodes sont aussi alignées et réparties d'une manière équidistante ($AM=MN=NB=a$) (Fig. 7). Avec K le coefficient géométrique est égal : $K = 2 \pi a$.

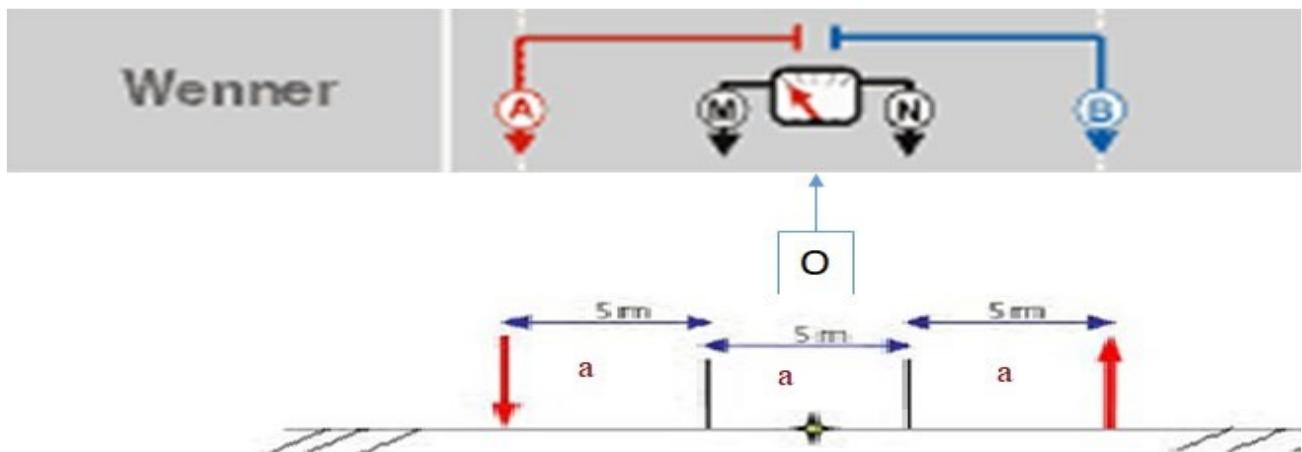


Figure 7 : Représentation schématique de la configuration Wenner.

➤ Dispositif dipôle-dipôle axiale

Ce dispositif est un peu différent des deux premiers (Schlumberger et Wenner) puisque les électrodes M et N sont en dehors de A et B mais toujours dans la même ligne (Fig. 8). Chaque paire d'électrode à une constante mutuelle de séparation égale à **a**.

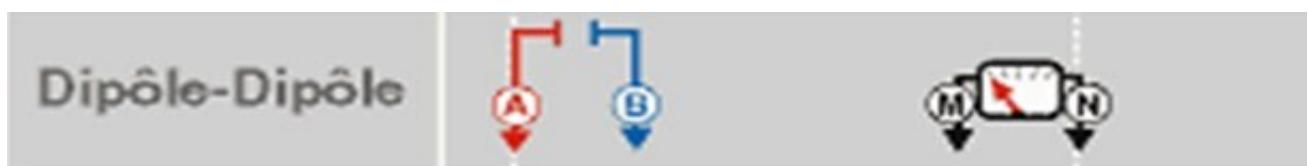


Figure 8 : Représentation schématique de la configuration dipôle-dipôle axiale

Si la distance entre les deux électrodes internes B et N est un multiple de **a** (soit $n \times a$), la résistivité apparente sera égale à :

$$\rho = \frac{\pi n a (n+1) (n+2) \Delta V / I}{a}.$$

Le coefficient géométrique **K** est alors : $K = \pi n a (n+1) (n+2)$.

Les profondeurs d'investigations sont variables d'un dispositif à un autre (Roy, 1971 et Barker, 1989) ainsi que le pouvoir de résolution (Fig.9). De ce fait, le choix de dispositif est fonction de l'objectif de prospection.

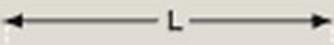
Dispositifs		Prof. d'investigation		Pouvoir de résolution
		Roy (1971)	Barker (1989)	
Wenner		0.11L	0.17L	1/2.25
Schlumberger		0.125L	0.19L	1/2.45
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L	1/3.45
Pôle-Pôle		0.35L		1/8.4

Figure 9: Récapitulation et caractérisations des profondeurs d'investigation et du pouvoir de résolution de différents dispositifs de prospection électrique.

IV. Dispositifs de mesure de résistivité

Les propriétés électriques d'un terrain peuvent être exploitées de manières différentes. Pour ce la c'est en fonction de l'objectif d'investigation il y a une multitude de technique et de dispositifs.

IV.1) Trainée électrique

Il s'agit de **déplacer tout le dispositif en gardant fixes ses dimensions** sur le site à explorer ; à chaque station on mesure une résistivité apparente (Fig.10). Le but est de mettre en évidence les **variations latérales** de résistivités dues aux changements de faciès, la présence de failles ou des filons...etc.

Le dispositif le mieux utilisé en **traînées électriques** est celui de **Wenner**.

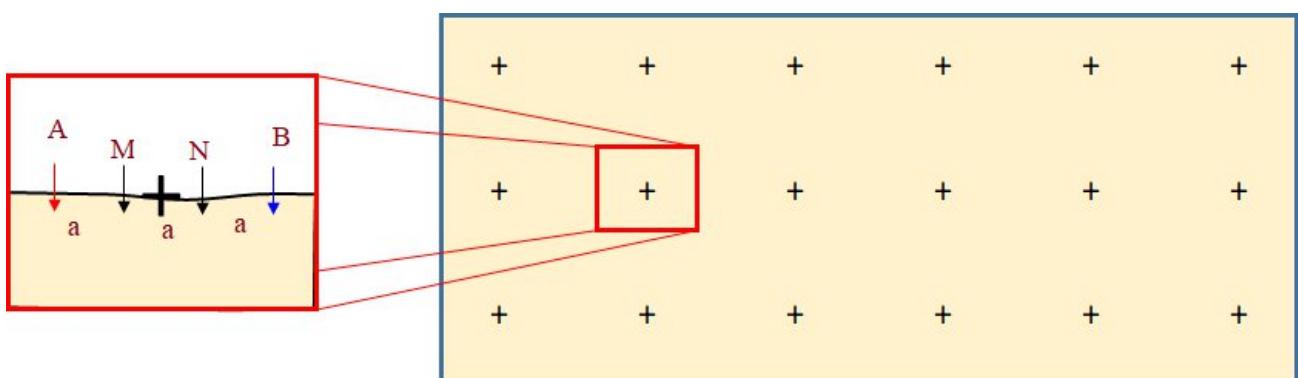


Figure 10 : principe d'investigation d'une zone par trainée électrique en utilisant le dispositif Wenner.

IV.2) Sondage électrique vertical "SE ou SEV"

L'objectif de ce dispositif est de reconstituer le profil vertical du domaine prospecter en profondeur (+/- AB/4), en déterminant le nombre de couches à partir de leurs résistivités et leurs épaisseurs respectives (Fig. 11).

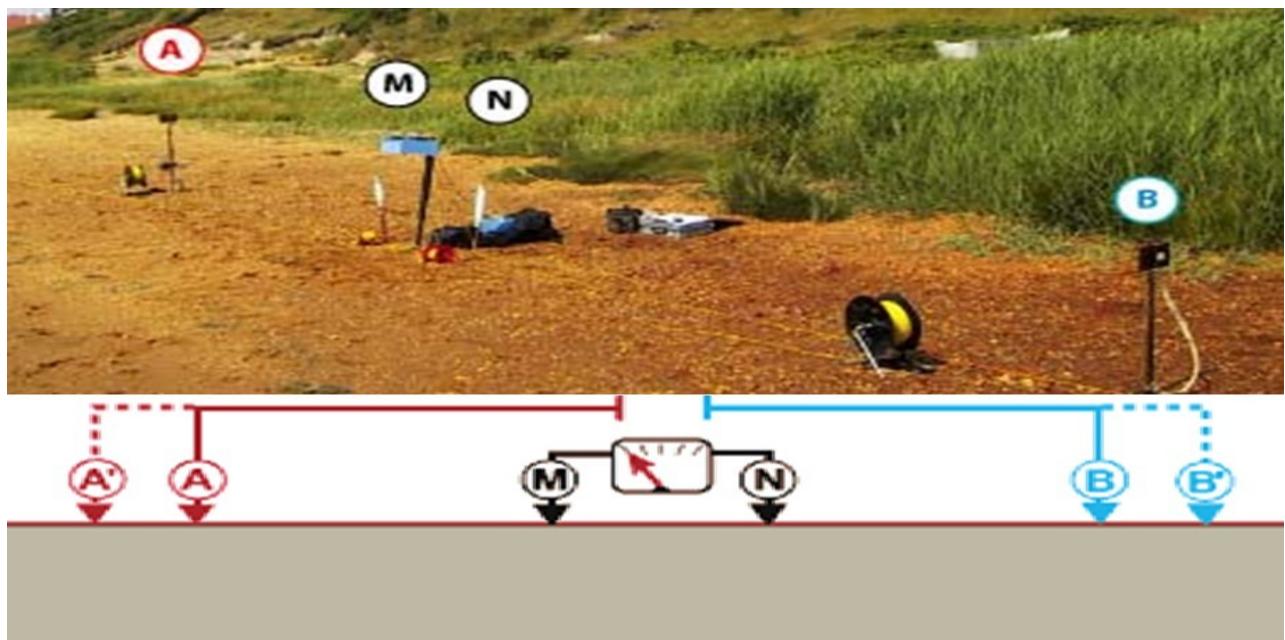


Figure 11 : Mise en œuvre du sondage électrique vertical

L'exécution d'un **SEV** sert à caractériser la variation de la résistivité du sous-sol à la verticale en un point donné de la surface. Cette **variation** dépend de la **profondeur** pour les structures **1D**. On exécute, au même endroit, une succession de mesures en augmentant à chaque fois la distance **AB** (en laissant **fixe** le point **O** : centre de AB et MN) : On augmente ainsi la profondeur d'investigation qui est proportionnelle à la longueur AB (Fig. 11, Fig. 12). On considère que les couches sont parallèle et isotrope (Fig. 12).

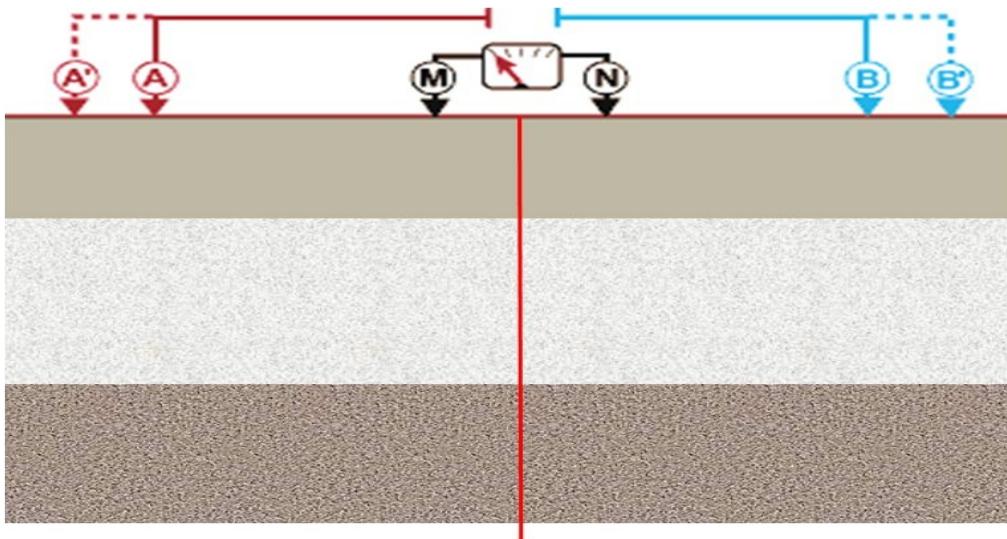


Figure 12 : Mise en œuvre du sondage électrique vertical, la profondeur d'investigation augmente proportionnellement fonction de la longueur AB. On considère que les couches sont parallèles et isotrope.

En principe, tous les dispositifs (**dipôles**, **tripôles**, **quadripôles**, ... etc) peuvent être utilisés pour exécuter des **sondages électriques**. Mais dans la pratique on n'utilise que les **quadripôles symétriques**, et le plus souvent le dispositif **Schlumberger**.

$$X = 2 \cdot \frac{V}{I} \cdot (1/MA - 1/MB - 1/NA + 1/NB)^{-1}$$

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 ».

Mais à un certain moment, le voltage entre M et N devient faible et de l'ordre de la précision du resistivimeter. Dans ce cas, il faut augmenter la distance **MN** en respectant la condition $MN \ll AB$ (généralement $MN \leq AB/5$). Cette dernière étape effectuée est appelée **débrayage** ou aussi **embrayage** (Fig. 13).

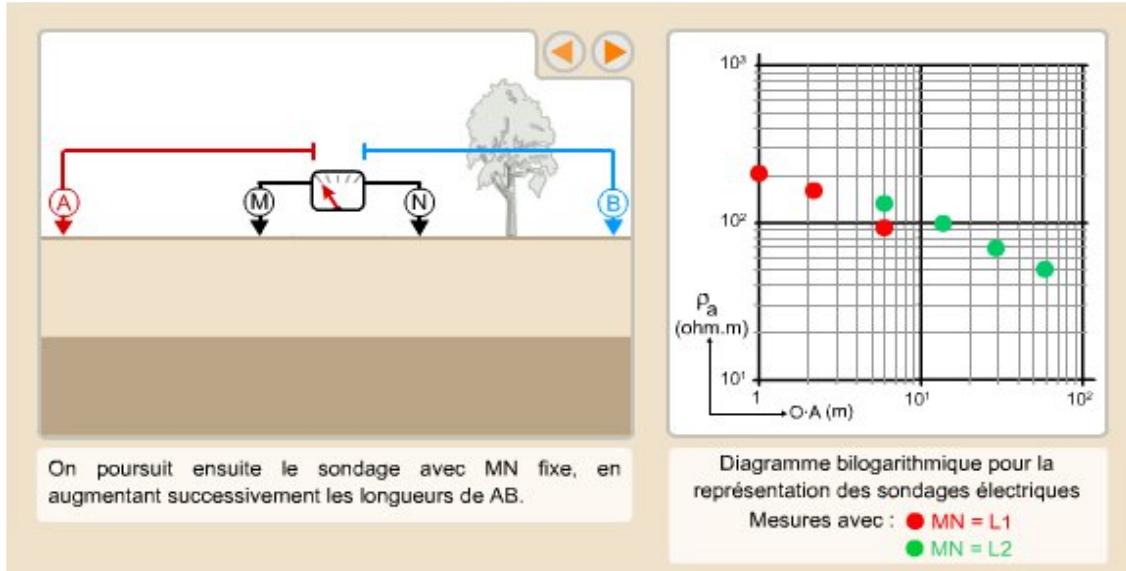


Figure 13 : Explication de débrayage (embrayage) et leurs représentations.

IV.3) **Tomographie de résistivité électrique**

C'est une acquisition directe d'une surface en **2D** effectuée en utilisant un équipement multi électrodes (Fig. 14). Avec ce dispositif on peu cartographier les variations de résistivité en fonction de profondeur (Fig. 14).

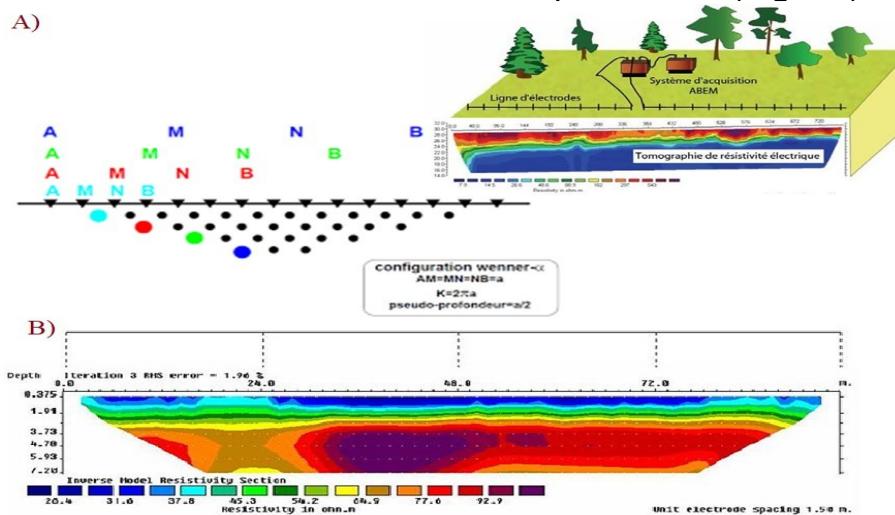


Figure 14 : A) Mise en œuvre du dispositif de tomographie électrique. **B)** exemple d'une section de tomographie électrique (Résistivité vs. Profondeur).

V. Interprétation des données

L'interprétation des données se fait en suivant deux manières successives et complémentaires à savoir interprétation Qualitative et Quantitative.

Quantitative.

V.1) **Interprétation qualitative**

L'analyse qualitative peut nous fournir des indications sur la nature des terrains à explorer. C'est pour cette raison qu'on doit avoir recours à une approche qui peut nous indiquer sur les zones d'anomalies tout en précisant leur nature et leur géométrie.

D'abord, après avoir recueilli les **données brutes** (SEV ou TE), on doit avoir recours à une interprétation **qualitative** en vue d'isoler les **zones d'anomalies**.

Ensuite, l'établissement **des cartes d'iso-résistivités apparentes** pour des AB/2 croissantes.

Enfin, des indications sur l'évolution verticale et latérale des résistivités peuvent être fournies.

L'interprétation qualitative est fiable dans le cas de terrains homogènes et subhorizontaux

La tranche de sol concernée par cette interprétation est généralement comprise entre **AB/10** et **AB/4**. De telles approximations doivent être considérées avec prudence car la résistivité apparente dépend de plusieurs facteurs tels que le quadripôle utilisé (le dispositif) et la nature de terrains.

Cette interprétation peut se faire également en dressant les pseudo-coupes

suivant un profil donné : à l'aplomb d'un SE, les valeurs de résistivités apparentes correspondant aux différentes longueurs de AB sont portées et des courbes d'égales valeurs sont ensuite tracées. Cette manière d'interprétation peut nous renseigner sur les **variations** latérales et verticales. Les changements latéraux de faciès et les accidents sont facilement détectés (Fig. 15).

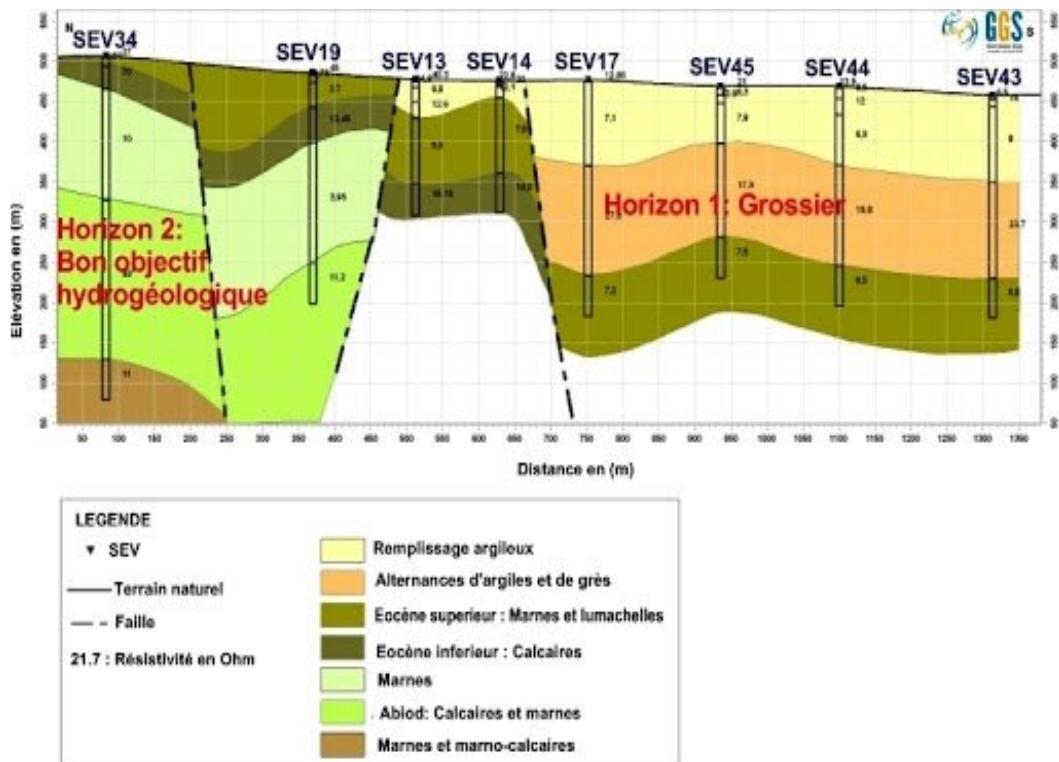


Figure 15 : Exemple d'interprétation qualitative et corrélation géo-électrique entre les différents SEV.

V.2) Interprétation quantitative

Le but de l'interprétation quantitative est de déterminer les résistivités vraies des différents terrains traversés par le courant. Les résultats d'un **SEV** sont portés sous forme d'un diagramme où l'on porte en abscisses les de **AB/2** et en ordonnées les valeurs des résistivités apparentes X_a correspondantes, avec une échelle bilogarithmique (Fig. 16).

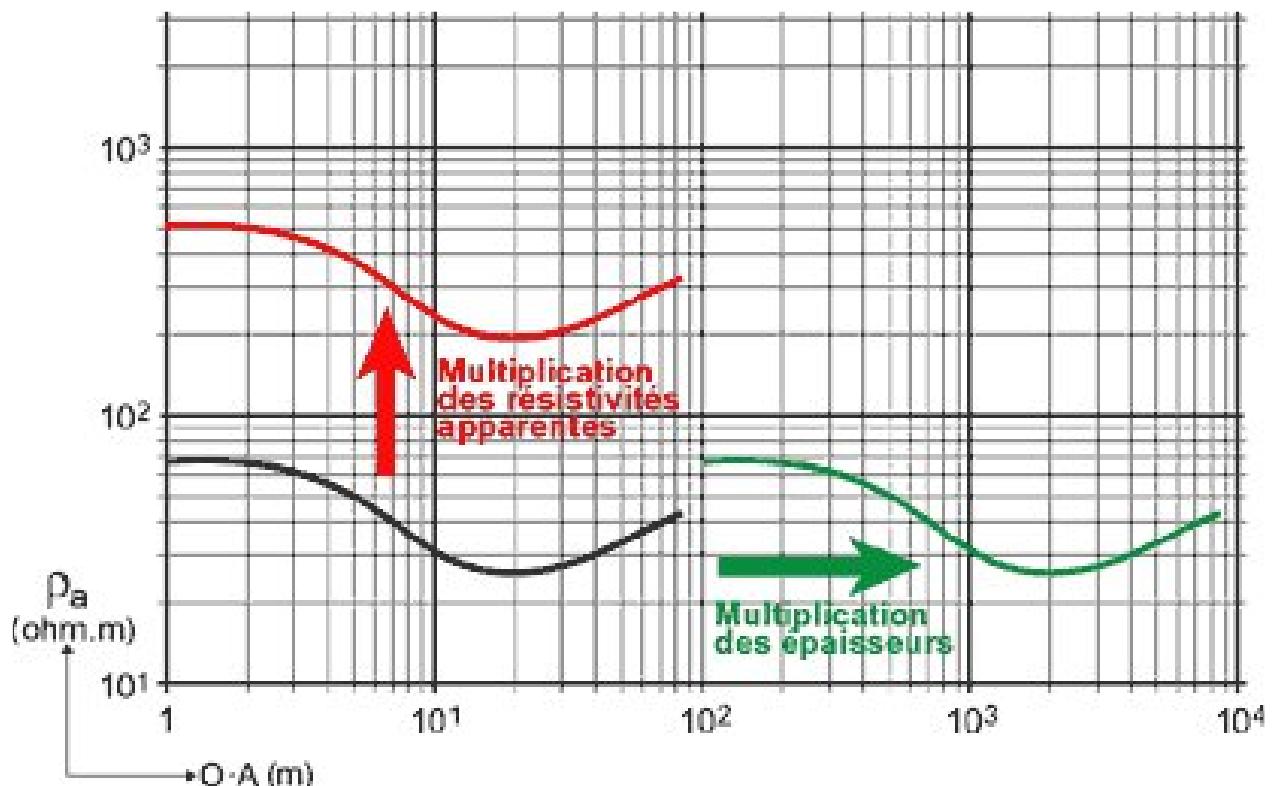
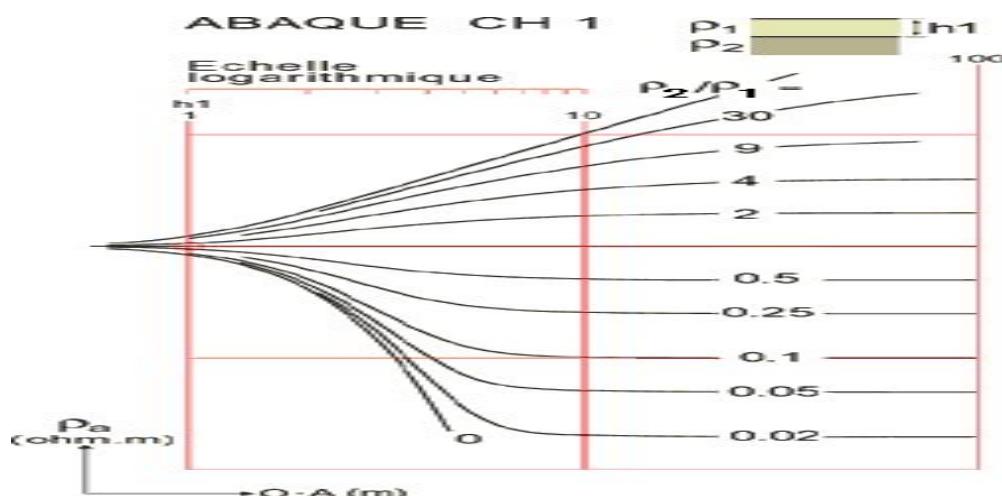


Figure 16 : Diagramme bi-logarithmique pour la représentation des sondages électriques.

➤ **Cas de deux couches:**

- 1- On superpose le sondage effectué aux abaques à deux couches disponibles, les axes doivent être de même dimension (Fig. 17).
- 2- On déplace la courbe sur les abaques jusqu'à ce qu'elle se superpose à une des courbes des abaques (ou à une courbe imaginaire puisque tous les $\times 2/\times 1$ ne sont pas indiquées) (Fig. 1).

NB: Il faut garder les axes des deux graphiques bien parallèles.



Exemple 1: Calcul manuelle

Figure 17: Abaque utilisé pour calculer manuellement

la résistivité vraie des couches dans le cas de deux couches.

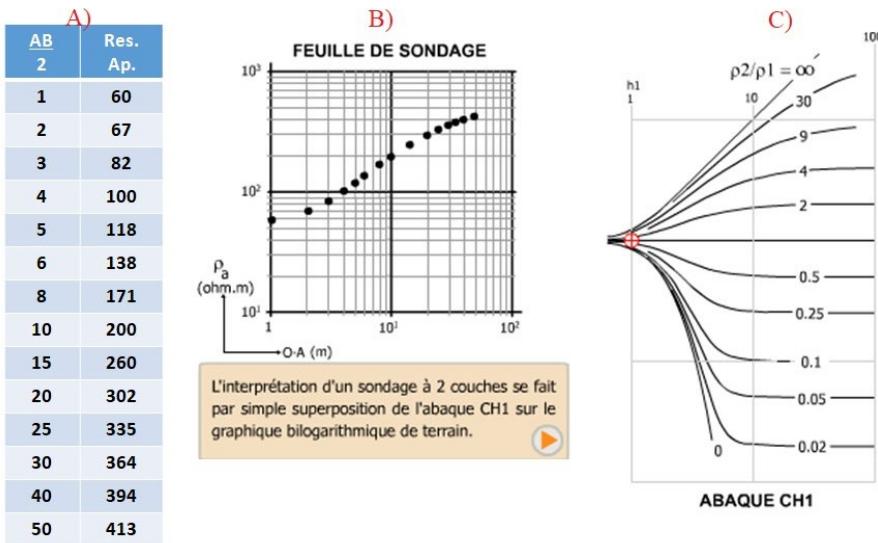


Figure 18: **A)** tableaux des valeurs de résistivité apparentes. **B)** Représentation des valeurs de la résistivité vs. AB/2 sur une courbe bi-logarithmique. **C)** Abaque utilisé pour l'interprétation.

Les étapes à suivre pourachever l'interprétation quantitative manuelle des données brutes du cas d'étude sont un nombre de cinq (les étapes sont illustrées dans les figures 19A, B, C, D et E).

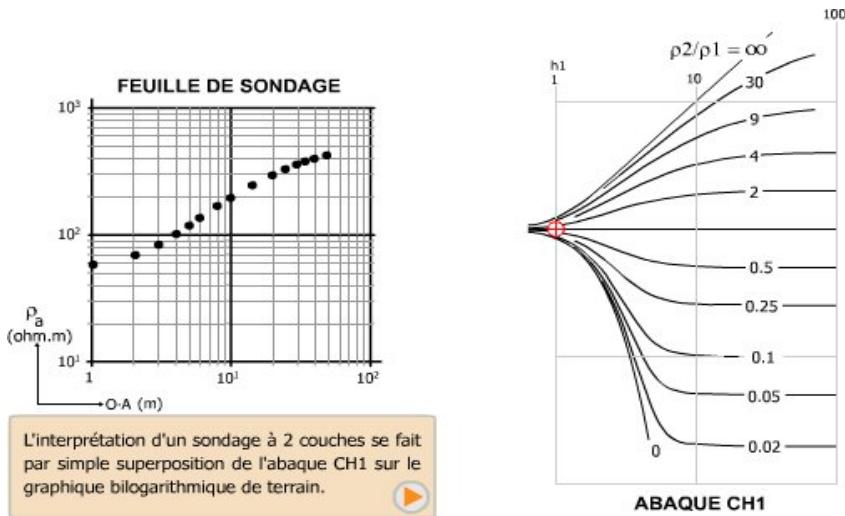


Figure 19 A :1ère étape, Représentation des données brutes sur la feuille bilogarithmique.

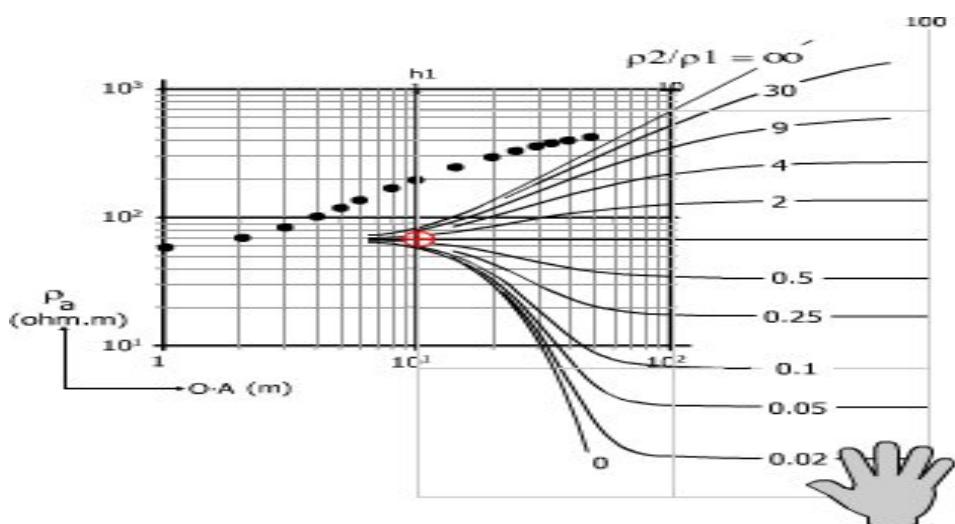


Figure 19B : 2ème étape, On place le calque de l'abaque sur la courbe bi-logarithmique, en cherchant la meilleure superposition.

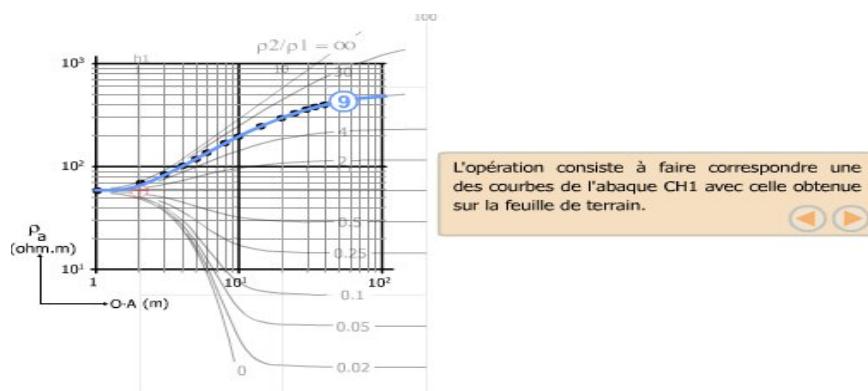


Figure 19C : 3ème étape, En choisissant la meilleure superposition entre la courbe établie sur la feuille bilogarithmique et celle de l'abaque.

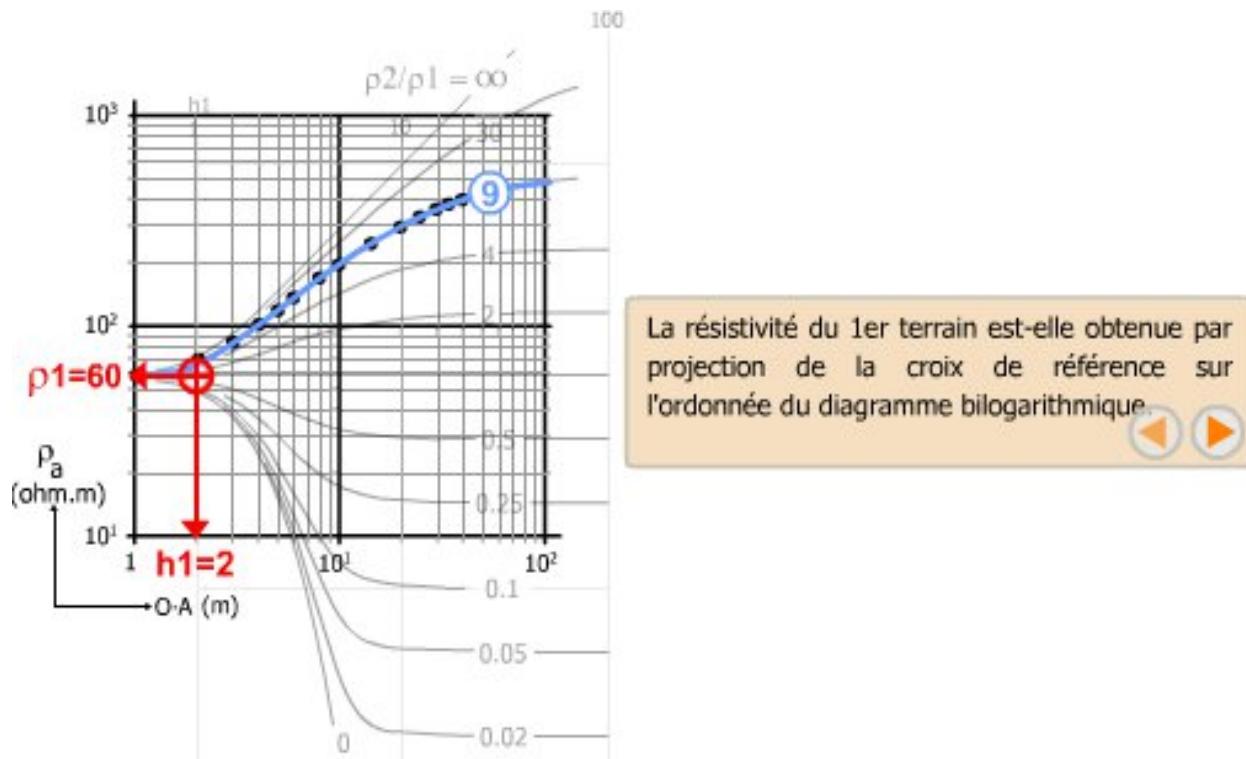


Figure 19D : 4ème étape, On va projeter de la croix de référence sur l'axe d'ordonnée du diagramme bi- logarithmique pour déterminer la résistivité réelle de la première couche. Projection de la croix de référence sur l'axe des abscisses pour déterminer l'épaisseur de la première couche.

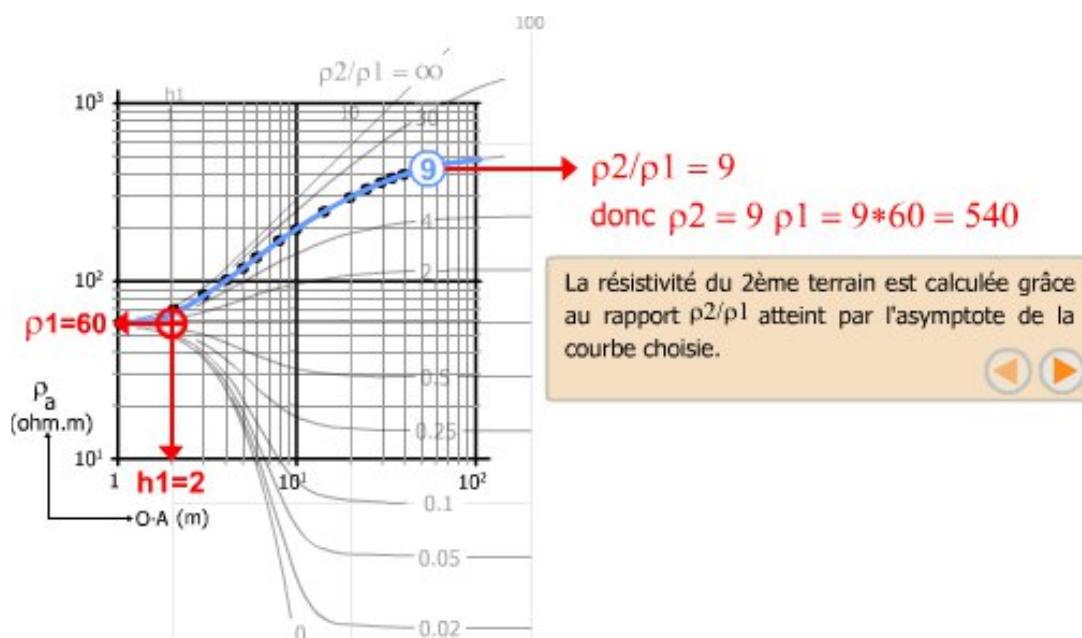


Figure 19 E : 5ème étape, On détermine la résistivité réelle du deuxième terrain suivant au rapport atteint par l'asymptote de la courbe.

Actuellement le traitement des données et l'interprétation se fait par des logicielles appropriés.

Exemple 1 : Application par logiciel (IP2WIN)

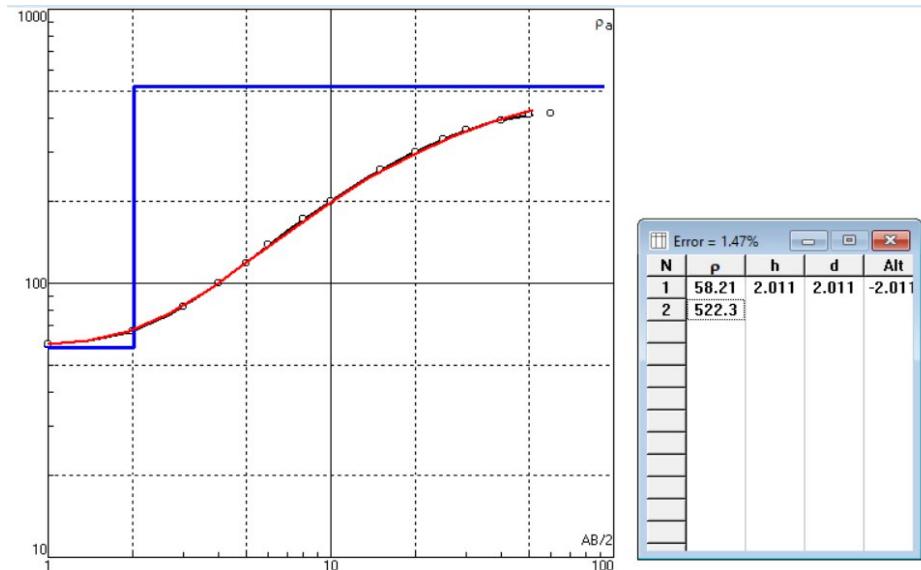


Figure 20 : Exemple d'un model établi suit à une application du programme IP2WIN du cas de la figure 18A.

Il suffit de faire entrer les données brutes (Fig. 18A) dans le logiciel IP2WIN (input). Le programme va faire les inversions nécessaires et les interprétations et il va donner le modèle fini (output) Fig.20.

NB. : L'ingénieur géologue doit contrôler la qualité de données et bien évidemment contrôler et interpréter le modèle donné par le logiciel en fonction du contexte géologique de la zone

➤ **Cas de trois couches:**

L'interprétation devient un peu plus compliquée, puisque aux deux courbes possibles qu'on aurait dans le cas de deux couches, on passe à quatre cas possibles (Fig.21).

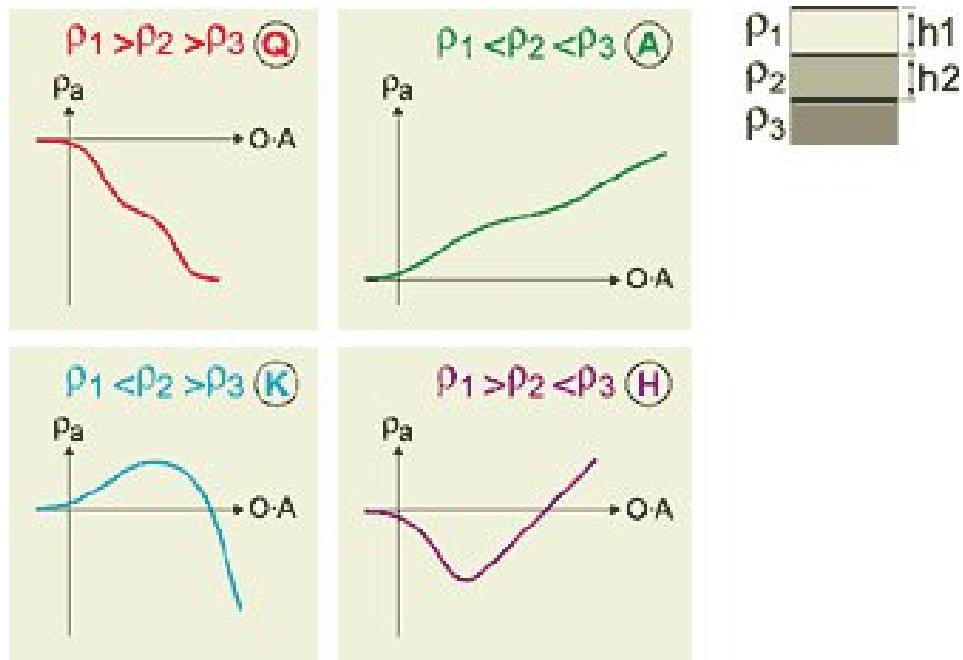


Figure 21 : Les différents cas possibles dans le cas d'un modèle de trois couches.

Les abaques à deux couches ne dépendaient que de trois paramètres **x1**, **x2/x1** et **e1**

(Fig.19).

Dans le cas à trois couches, il y a 5 paramètres **x1**, **x2/x1**, **x3/x2**, **e1** et **e2/e1**. Les abaques sont donc plus compliqués et plus nombreuses (Fig.21).

On présente les abaques selon les contrastes de résistivité et on trace les courbes pour différents **e2/e1**.

L'interprétation se fait en ajustant la courbe expérimentale avec les abaques. On interprète la partie gauche (AB/2 petit) de la courbe à partir de l'abaque à deux couches et on obtient ainsi **e1**,

x1 et **x2/x1**. On note alors le point (**e1**, **x1**) sur la courbe expérimentale.

Exemple 2: Calcul manuelle

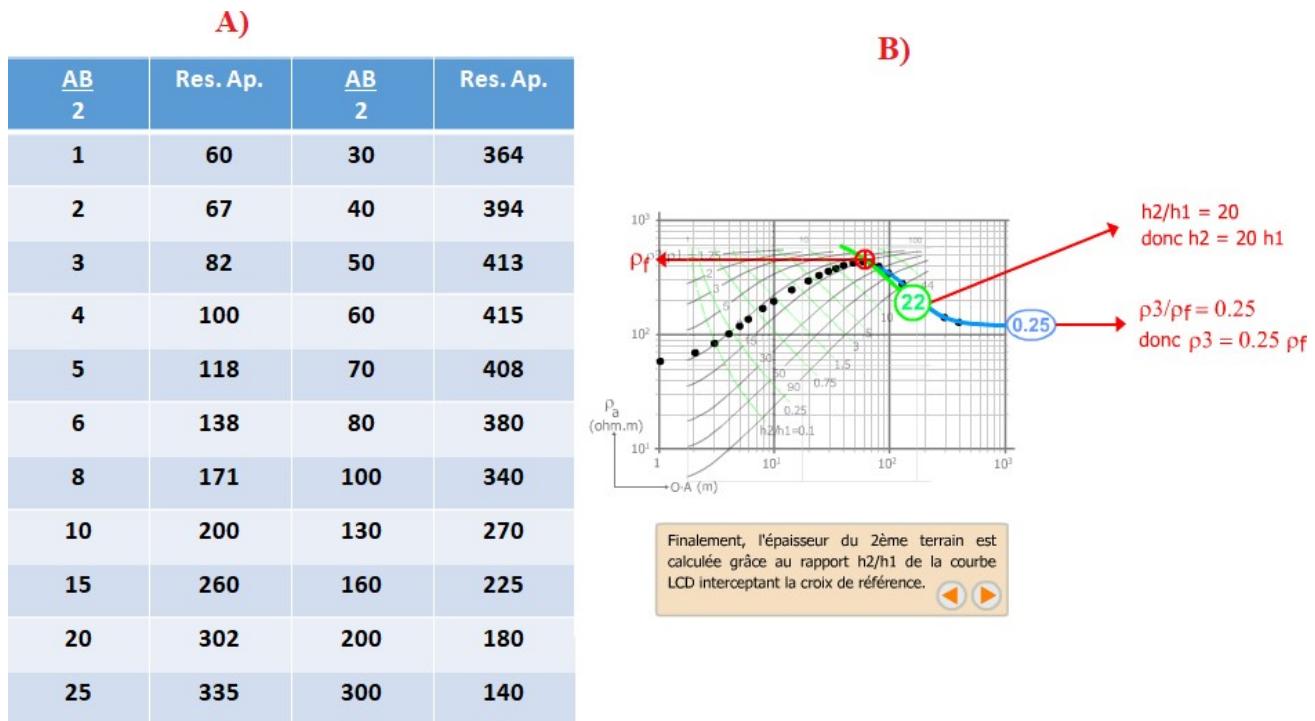


Figure 22: A) tableaux des valeurs de résistivité apparentes. B) Représentation des valeurs de la résistivité vs. $AB/2$ sur une courbe bi-logarithmique.

Exemple 2: Application par logiciel IP2WIN

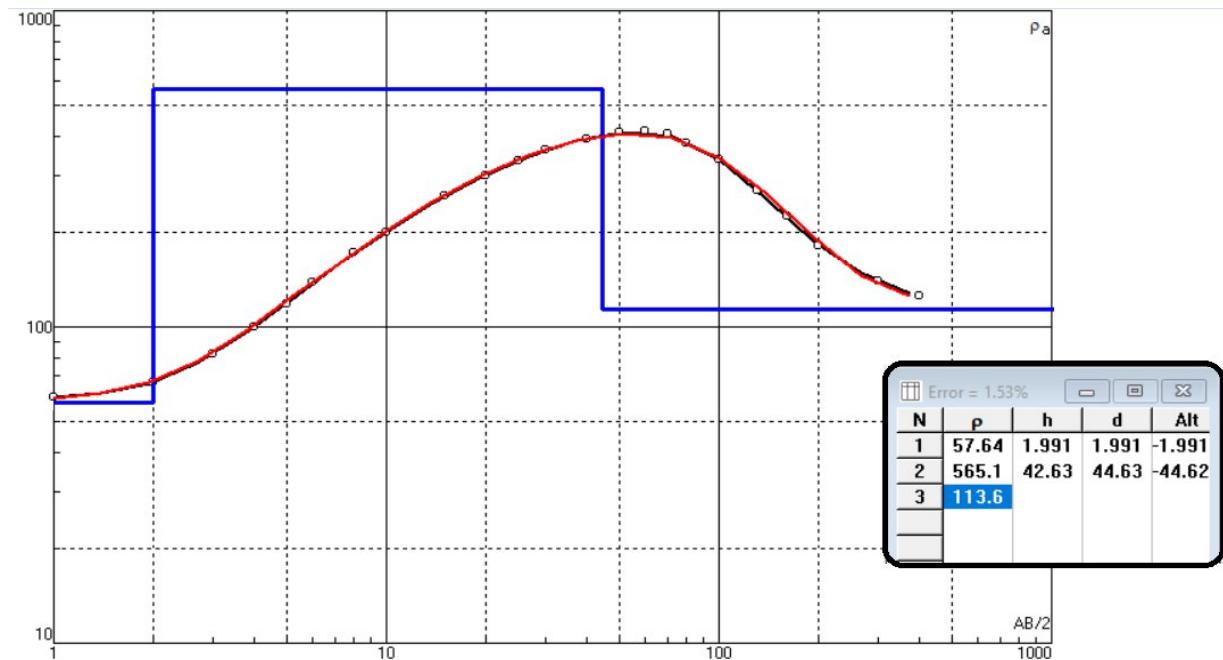
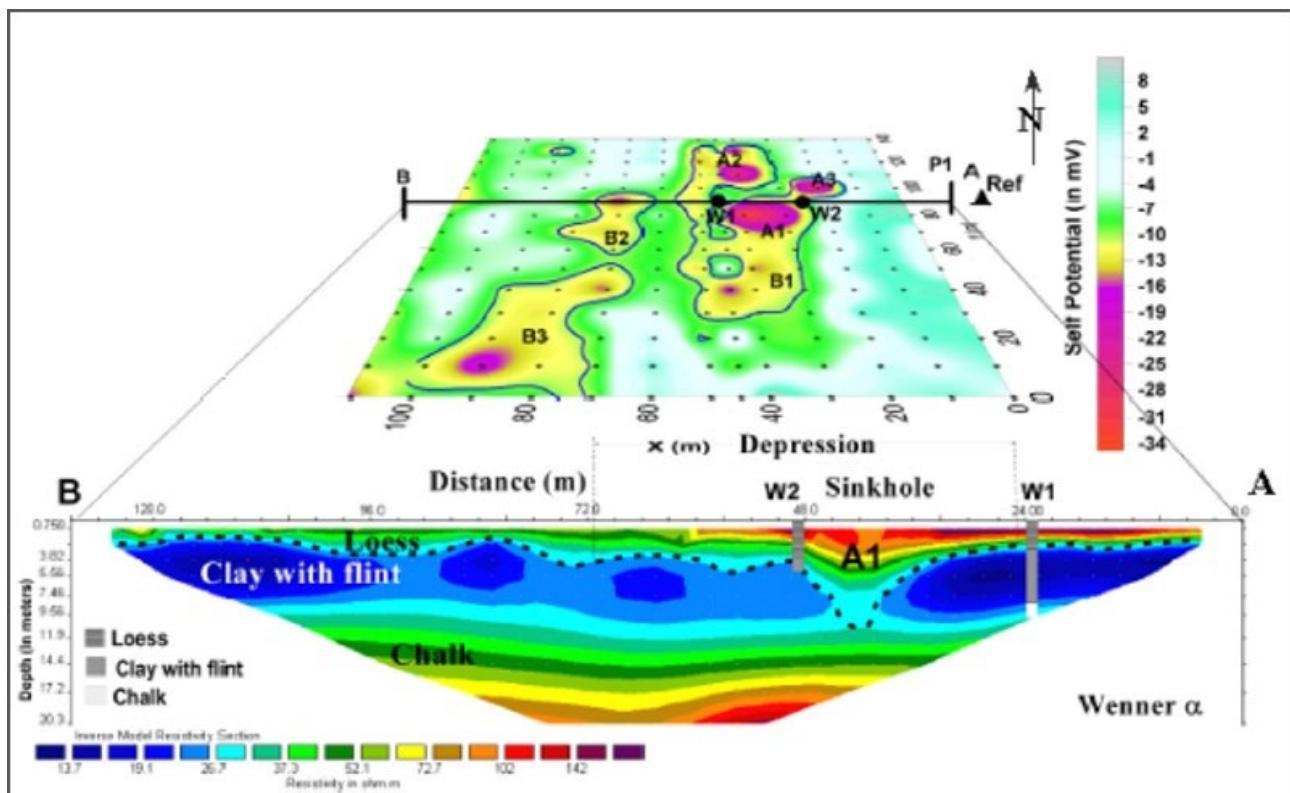


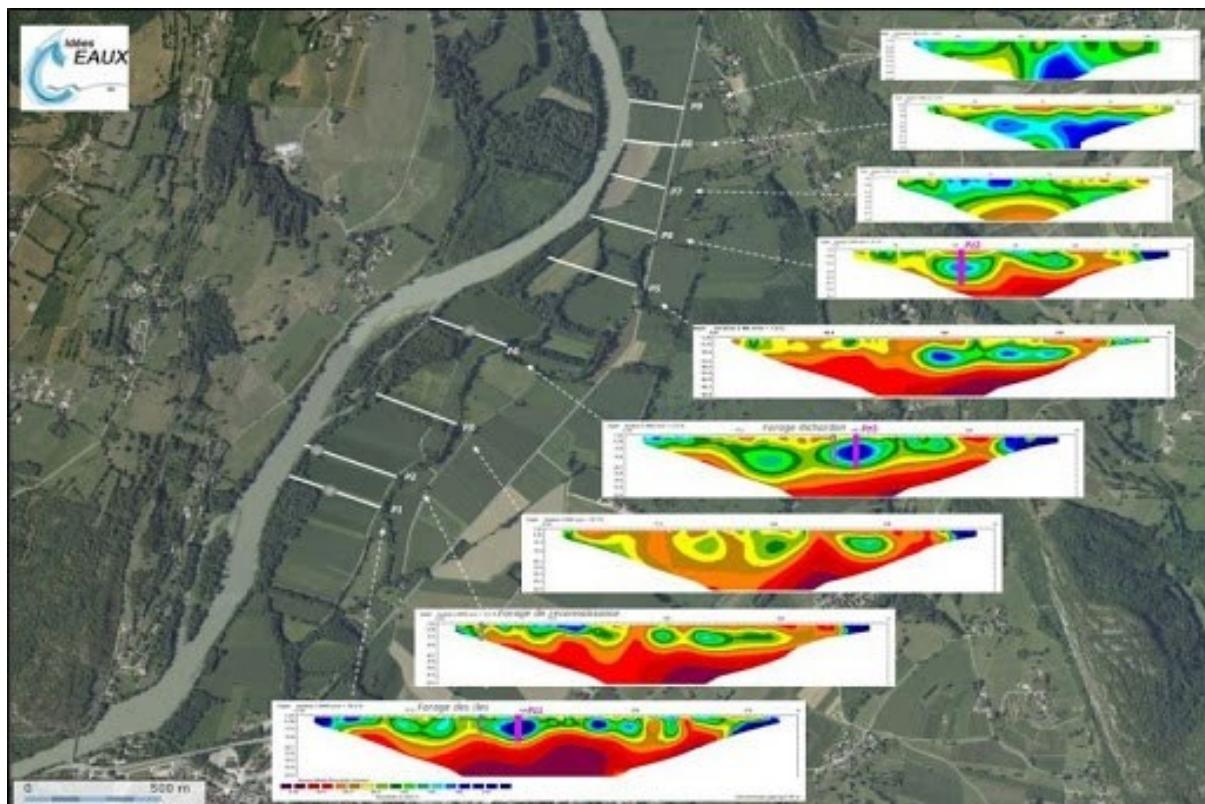
Figure 23 : Exemple d'un modèle établi suit à une application du programme IP2WIN du cas de la figure 22A.

VI. Exemple et étude de cas

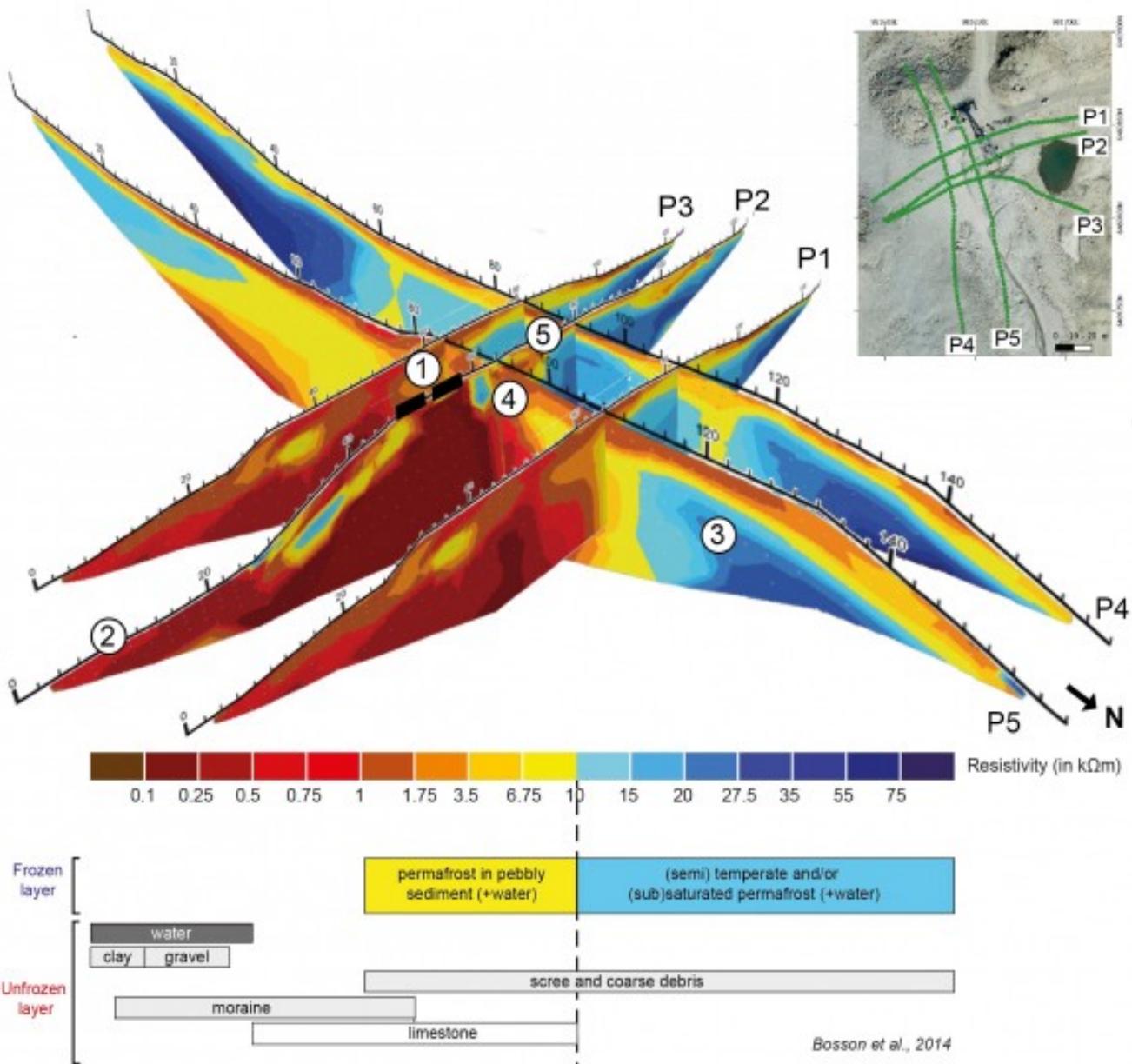
- 1^{er} cas : Tomographie de résistivité électrique et Trainée électrique.



- 2^{ème} cas : Coupes séries de Tomographie de rés. électrique sur des alluvions fluviaux.



➤ **3^{ème} cas** : Passage de 2 à 3 D sur des coupes orthogonaux de Tomographie électrique.



VII. Exercices et TP (abaques et logiciels) TD- 1 (Trainé électrique)

Dans une région donnée, nous avons mené une campagne électrique avec $AB =$ constante ($AB = 100$ m) répartie sur une maille orthogonale équidistante (50 m). La maille est orientée N-S et E-

= 100 m) répartie sur une maille orthogonale équidistante (50 m). La maille est orientée N-S et E-

W. Les mesures enregistrées sont représentées sur le tableau ci-dessous:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
I	14,6	13,5	12,6	11,8	10,4	11,5	16,5	17,3	19,2	20,5
II	14,3	12,9	12,4	11,9	10,6	15,7	17,0	18,1	19,7	21,1
III	14,2	13,8	12,8	10,9	15,3	15,6	17,2	18,6	19,9	21,5
IV	14,8	14,2	13,4	16,2	15,4	17,1	18,3	19,1	20,5	21,9
V	14,8	13,1	16,5	15,4	14,8	16,3	18,2	19,3	20,9	21,7
VI	14,9	18,3	17,4	16,2	14,0	16,7	18,5	20,0	22,5	21,5
VII	19,2	18,5	17,2	16,0	14,9	15,8	18,3	24,5	26,8	23,2
VIII	20,1	19,1	18,4	17,0	15,2	16,7	17,7	23,0	24,3	22,3

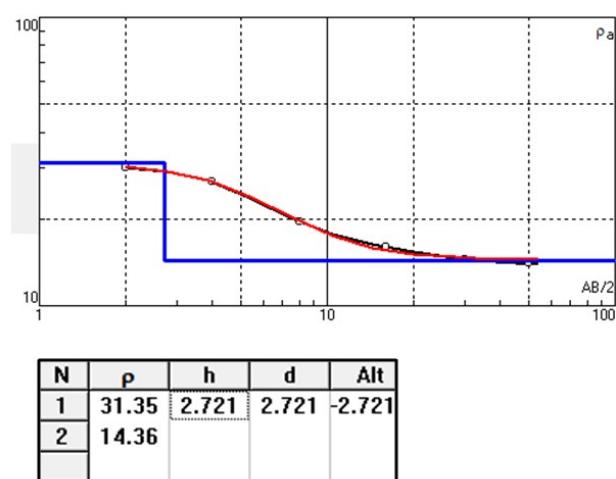
- 1) Dressez les points selon leur coordonnées relatives et projeter les valeurs sur chaque point.
- 2) Pour permettre l'évaluation spatiale de la répartition des résistivités de surface, dessiner la carte d'iso-valeurs de résistivité avec une équirésistivité adéquate.
- 3) Interpréter les mesures observées.

TD- 2 (SEV, Analyse quantitative)

En considérant les données d'un SEV ci-contre :

- 1) Dessiner la courbe correspondante sur papier bi-logarithmique
- 2) Identifier le nombre de couches
- 3) Déterminer les résistivités et épaisseurs de chaque couche.

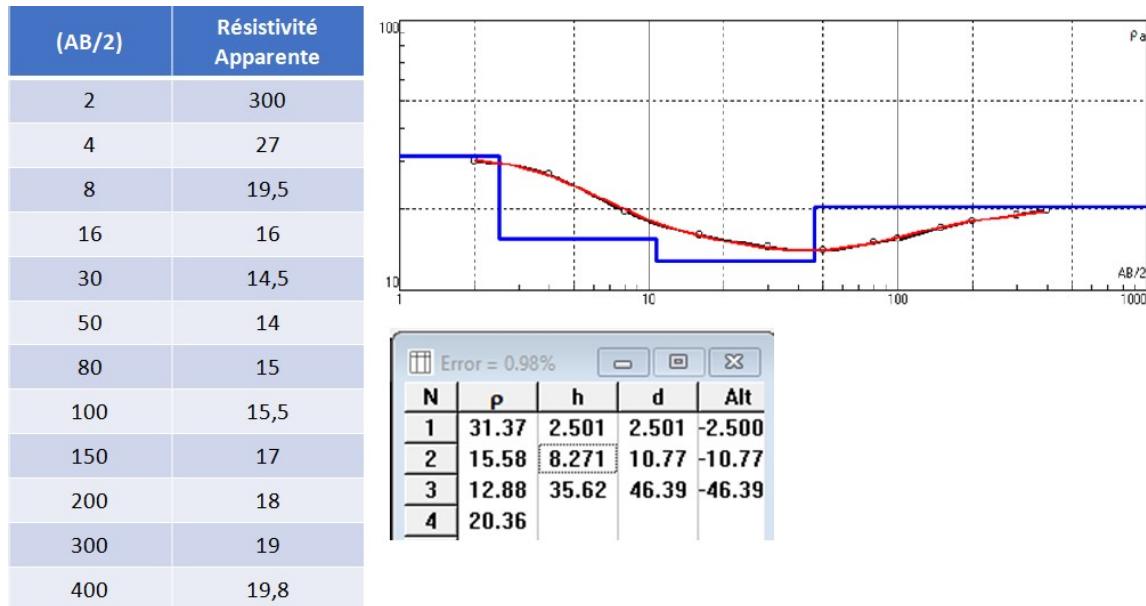
(AB/2)	Résistivité Apparente
2	30
4	27
8	19,5
16	160
30	14,5
50	14
80	15
100	15,5
150	17
200	18
300	19
400	19,8



TD- 3 (SEV, Analyse quantitative)

On considérant les données d'un SEV ci-contre :

- 1) Dessiner la courbe correspondante sur papier bi-logarithmique
- 2) Identifier le nombre de couches
- 3) Déterminer les résistivités et épaisseurs de chaque couche.



TD- 4 (SEV, Analyse quantitative)

Un sondage électrique vertical réalisé, au cours de l'été, dans une région à couches tabulaires et selon le dispositif Schlumberger, on a enregistré les données suivantes :

Res.	12	12.04	12.65	13.83	18.15	20.41	21.2	18.8	16.9
AB/2	2	6	10	15	42	80	130	200	260
Res.	13.15	9.5	7.82	6.55	6.01	6.02	6.01	6.02	6.01
AB/2	400	600	800	1100	1600	2500	3150	4050	5000

- Dessiner la courbe représentative de ces mesures sur le papier bi-logarithmique.
- Conclure le nombre de couches et leurs résistivités relatives.
- Calculer les épaisseurs et les résistivités de chaque couche

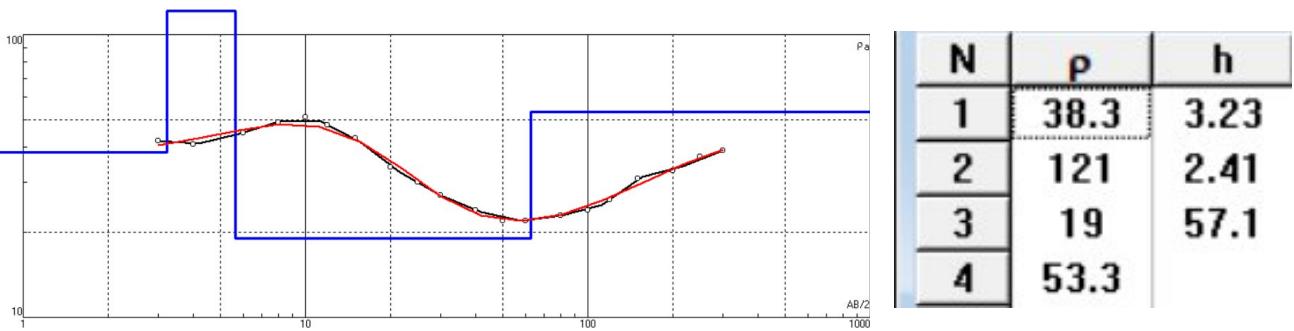
Le même point, mesuré avec le même dispositif, le même équipement et les mêmes espacements AB, mais en période hivernale, a donné les mesures suivantes :

Res.	10	10.04	10.55	11.43	15.95	18.01	19.0	17.48	15.8
AB/2	2	6	10	15	42	80	130	200	260
Res.	12.35	9.0	7.52	6.51	6.05	6.02	6.01	6.02	6.01
AB/2	400	600	800	1100	1600	2500	3150	4050	5000

- Juste en observant la variation de la résistivité par rapport à la 1ère mesure, qu'est-ce qui a changé ? et que pouvez-vous conclure ?

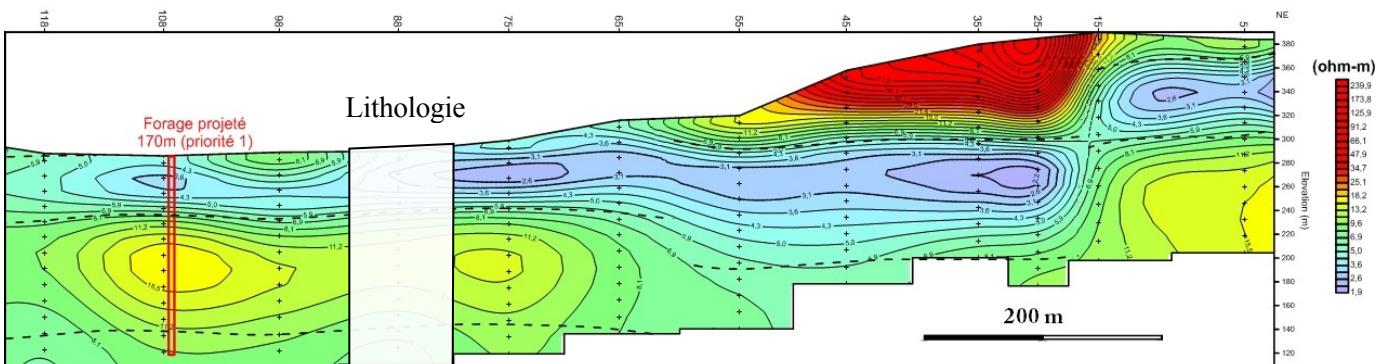
Dans une région agricole à structure géologique sub-tabulaire, on cherche à explorer un aquifère gréseux situé à environ 50 m de profondeur. La prospection électrique par SEV a donné les résultats suivants (voir les figures) :

- 1) Evaluer, en une seule phrase, la qualité du modèle et des résultats obtenues ?
- 2) Identifier le nombre de couches, leurs résistivités et leurs épaisseurs relatives.
- 3) Identifier la profondeur de l'aquifère gréseux prospecté.
- 4) Proposer une profondeur raisonnable pour exploiter cet aquifère par un forage.



Sur un terrain constitué de 3 couches : sol argileux à la surface, suivit par une couche à dominance gréseuse et à potentialité aquifère, et enfin des argiles silteuses comme substratum, on a exécuté la coupe tomographique suivante :

- 1) Identifié, en argumentant par une phrase, les couches géologiques (remplir la colonne lithologie sur la figure) et conclure : leurs épaisseur respectives au niveau du forage projeté.
- 2) Décrire l'aspect structural de cette coupe.
- 3) Que représente le corps triangulaire à forte résistivité (rouge) sur cette coupe ?



Références bibliographiques

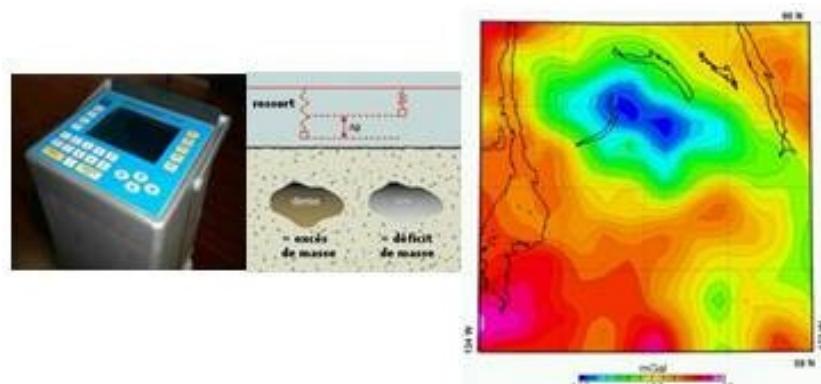
- Barker R. D. (2001). Principles of electrical imaging.
- Ahmed Srdah AL-Zubedi (2015). Principles of Electrical Resistivity Techniques. Publisher: LAP LAMBERT Academic PublishingEditor: Olga PomogaibogISBN: 978-3-659-78918-2.
- Chapellier, D. (1987). Diagraphie appliquée à l'hydrologie. Techniques et documentation. Edition LAVOISIER.
- Chapellier D. (2000). Prospection électrique de surface. Cours en ligne de Géophysique. Université de Lausane. Institut Français du Pétrole. https://www-ig.unil.ch/pdf/doc_pro/pro_f.pdf. <https://www-ig.unil.ch/acc5f.htm>
- Torleif Dahlin (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. Computers & Geosciences 27 (2001) 1019–1029.
- Keller,G.V. and F.C. Frischknecht (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Edition.

1) Méthodes géophysiques :

Comme l'exploration en surface est impuissante à déceler tous les secrets de l'écorce terrestre, le géologue pétrolier va donc utiliser les techniques de la géophysique pour mesurer certaines caractéristiques physiques du sous-sol. Ces techniques sont aussi variées que peuvent l'être les grandeurs physiques que l'on cherche à mesurer: intensité de la pesanteur, magnétisme ou trajet des ondes de choc, qui varient selon la nature des terrains. C'est cette dernière méthode, la sismique, qui est la plus utilisée par les pétroliers lors de l'exploration, car elle révèle le mieux la disposition des couches dans le sous-sol, donc les pièges potentiels.

Les principales méthodes de la géophysique sont :

- **La gravimétrie** : basée sur les contrastes de densité des roches, apporte d'utiles informations sur la répartition des anomalies gravimétriques d'où informations sur la structure des terrains.



- **Le magnétisme** : basé sur les différences de susceptibilités magnétiques des roches, est employé pour l'étude préliminaire de la profondeur du socle cristallin «magnétique».
- **La sismique** : basée sur l'étude des vitesses de propagation des ondes sonores dans le sous-sol et l'analyse des temps de propagation et le mode de réflexion de ces ondes.

3

Ces méthodes géophysiques consistent à effectuer depuis la surface du sol, des mesures de paramètres physiques dont l'interprétation permet d'imaginer la nature, la structure et les caractéristiques du sous-sol.

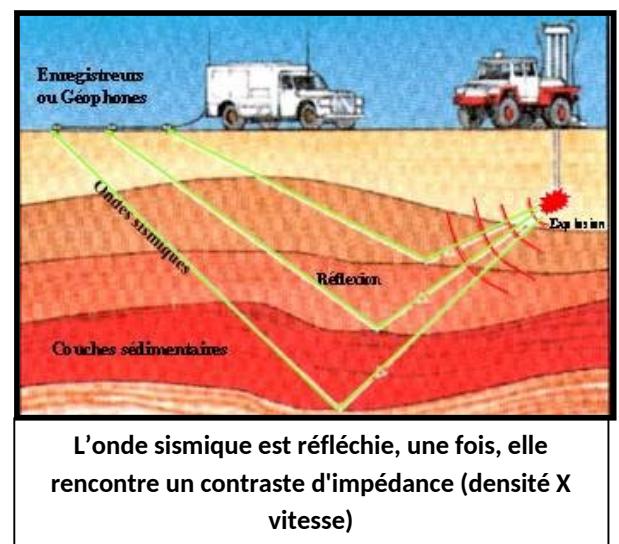
Les informations recherchées par ces méthodes sont :

- l'épaisseur et la nature du recouvrement
- la présence et la nature des zones fissurées
- l'existence des fractures
- la profondeur du substratum
- la localisation et les caractéristiques de

l'aquifère- prospection sismique:

Le principe de la sismique de réfraction est qu'un ébranlement à la surface de sol, se propage dans le sol en s'amortissant à la façon d'une onde sonore. La sismique de réfraction consiste à étudier la propagation des ondes élastiques (ondes longitudinales). Leurs temps d'arrivée, mesurés en différents sismographes ou géophones (récepteurs des ondes sonores) disposés le long d'un profil, sont par la suite portées en graphique en fonction des distances de ces géophones. Si au point d'explosion E (point d'ébranlement : point d'impact).

Principe sismique

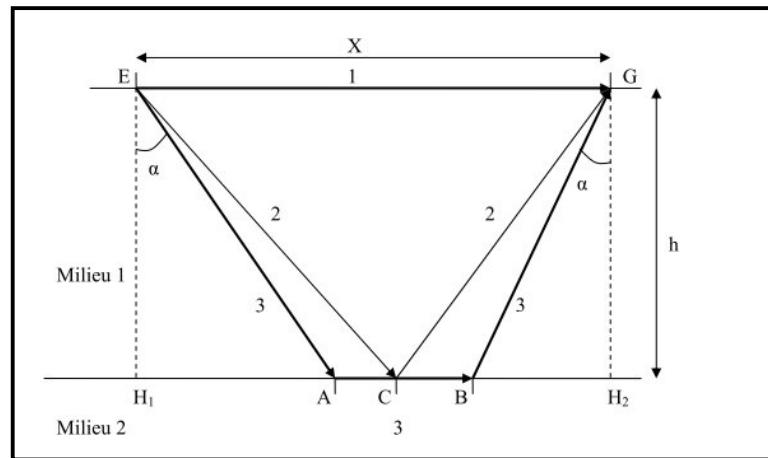
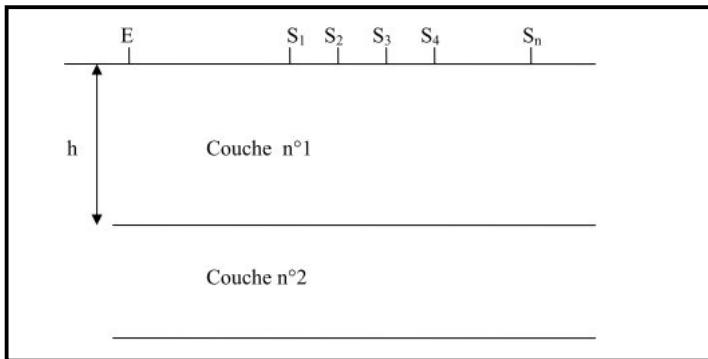


On obtient généralement une ligne brisée ou dromochronique d'où se déduisent les vitesses de propagation des ondes dans les couches et les épaisseurs respectives de ces dernières. On réalise classiquement un tir direct et un tir inverse (on permute l'emplacement des géophones et du point d'impact).

La forme des dromochroniques obtenues, permet de préjuger l'allure du substratum (pente, décrochements) et de la présence d'accidents (failles, cavités...etc.). En plus de

5

l'évaluation des profondeurs, la sismique de réfraction donne aussi des indications sur les caractéristiques mécaniques du sol, grâce à l'évaluation des vitesses de propagation de l'onde.



a- Analyse :

Trois ondes peuvent se propager :

a- une onde directe (n°1 sur la figure) : se propage dans le premier milieu avec la vitesse V_1 ; dont le temps de propagation est : $t = EG /V_1 = X/V_1$

b- une onde réfléchie (n°2 sur la figure) : se propage toujours dans le premier milieu avec la vitesse V_1 ; dont le temps de propagation est :

$$t = (EC + CG) /V_1$$

$$\text{Et puisque } EC = CG = ((X/2)^2 + h^2)^{0.5}$$

$$\rightarrow EC + CG = 2. ((X/2)^2 + h^2)^{0.5} = 2. ((X^2/4 + h^2)^{0.5} = 2. ((X^2 + 4.h^2)/4)^{0.5} = (X^2 + 4.h^2)^{0.5}$$

$$\rightarrow t = (X^2 + 4.h^2)^{0.5} /V_1$$

c- une onde réfractée (n°3 sur la figure) : se propage dans le deuxième milieu à la vitesse V_2 ; dont le temps de propagation est :

$$t = (EA + BG) / V_1 + AB / V_2$$

$$\text{Et puisque } AB = X - AH_1 - BH_2$$

$$\text{Avec } AH_1 = BH_2 = h \cdot \tan(\alpha)$$

$$\rightarrow AB = X - 2 \cdot h \cdot \tan(\alpha)$$

et :

$$EA = BG = h / \cos(\alpha)$$

$$\rightarrow t = 2 \cdot h / [V_1 \cdot \cos(\alpha)] + X / V_2 - 2 \cdot h \cdot \tan(\alpha) / V_2 = X / V_2 + 2 \cdot h / \cos(\alpha) \cdot [1 / V_1 - \sin(\alpha) / V_2]$$

Et puisque :

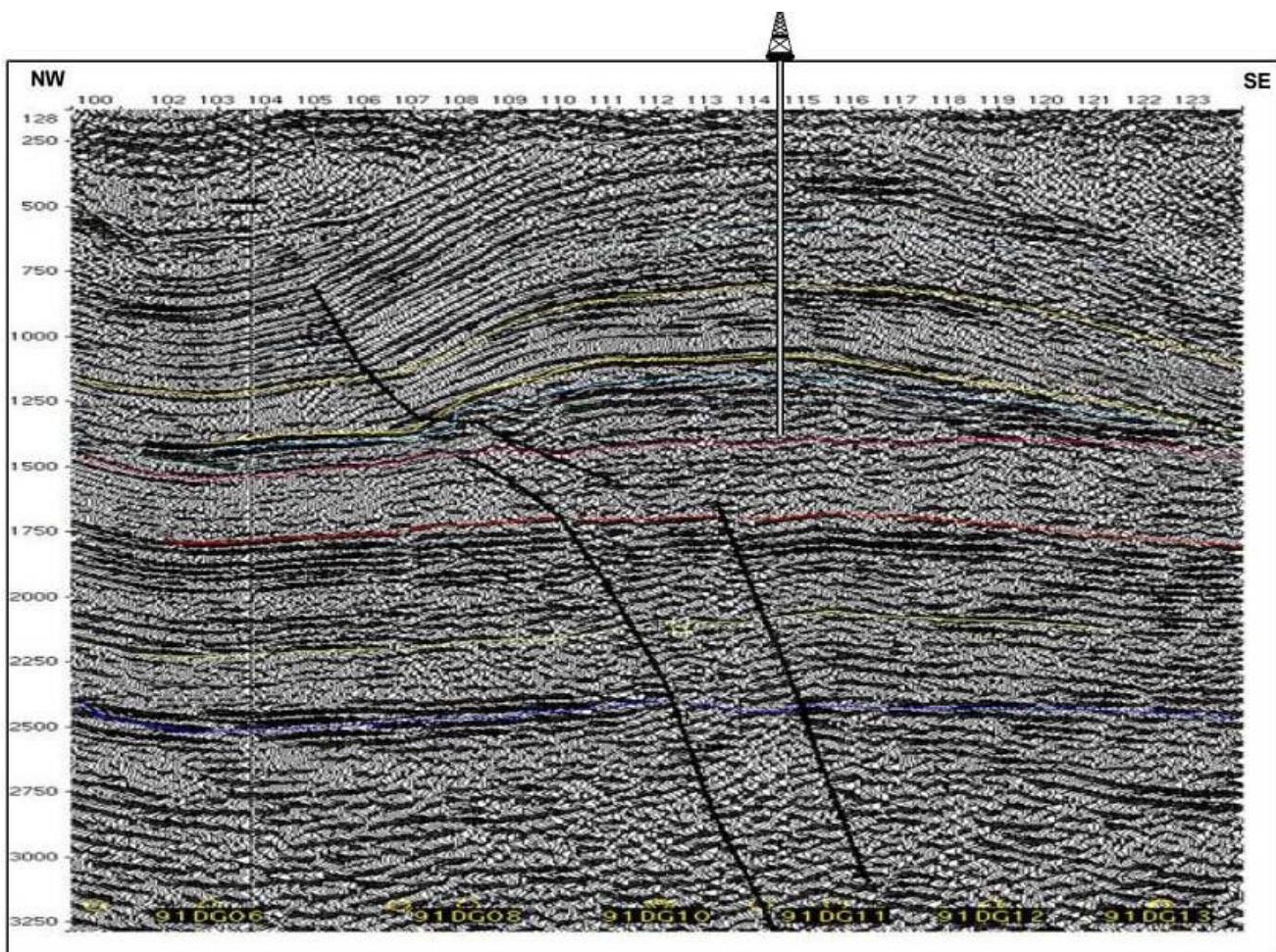
$$\sin(\alpha) = V_1 / V_2$$

$$\text{Et } \cos(\alpha) = (V_2^2 - V_1^2)^{0.5} / V_2$$

$$\rightarrow t = X / V_2 + 2 \cdot h \cdot (V_2^2 - V_1^2)^{0.5} / (V_2 \cdot V_1)$$

Coupe sismique

Exemple de section sismique interprétée montrant une structure anticlinale



EXERCICE :

Pendant la prospection géophysique d'un site, nous avons utilisé la technique de sismique de réfraction avec l'utilisation de dix (10) géophones, dont les mesures de temps d'arrivée de l'onde sont données par le tableau suivant :

<i>N° du géophone</i>	<i>Distance du point d'impact (m)</i>	<i>Temps (ms : 10^{-3} s)</i>
1	5	6.25
2	10	12.5
3	15	18.75
4	20	25
5	25	31.25
6	30	37.5
7	35	47.66
8	40	49.33
9	45	51.00
10	50	52.66

On demande de :

Tracer la courbe $t = f(D)$: temps d'arrivée en fonction de la distance des différents géophones.

a-Déterminer le nombre de couches explorées.

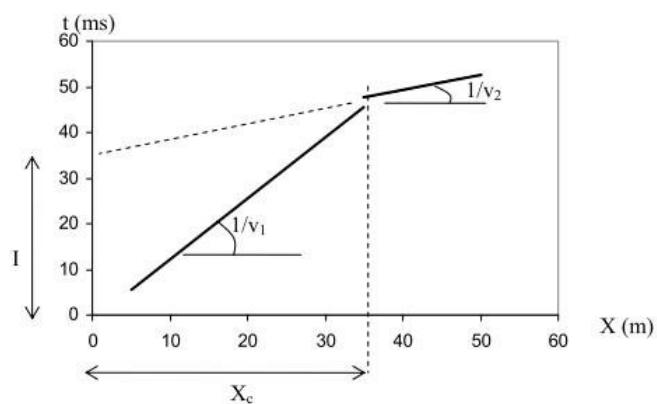
b-Déterminer la vitesse de propagation de l'onde dans chaque

couche.

d-Déterminer l'épaisseur de la première couche.

SOLUTION :

a-



- le nombre de couches explorées c'est le nombre de droites de la courbe : $t = f(D)$; D'après le graph il s'agit de deux (02) couches.

3- d'après le graph toujours :

$$b \quad 1/V_1 = i_1 = 0.00125$$

où i_1 c'est la pente de la première droite.

$$\rightarrow V_1 = 800 \text{ m/s}$$

et $I/V_2 = i_2 = 0.000333$

$\rightarrow V_2 = 3000 \text{ m/s}$

c - la distance critique :

$$X_c = 39.43 \text{ m}$$

d 5- l'épaisseur de la première couche :

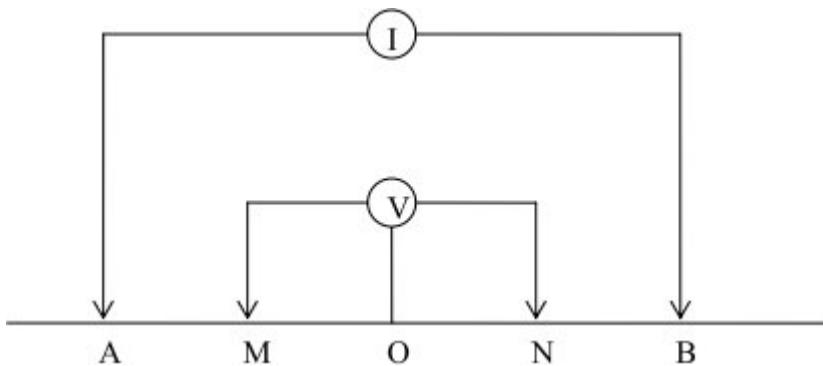
$$\text{nous avons : } I = 2.h.(V_2^2 - V_1^2)^{0.5} / (V_1 \cdot V_2)$$

$$\rightarrow h = I \cdot V_1 \cdot V_2 / [2.(V_2^2 - V_1^2)^{0.5}] = 15 \text{ m.}$$

$$\text{ou bien : } X_c = 2.h.[(V_2 + V_1) / (V_2 - V_1)]^{0.5}$$

b- Prospection électrique :

La prospection électrique permet de d'étudier les variations latérales et verticales de la résistivité apparente du sous sol ρ_a . Pour cela, on envoie dans le sol, grâce à des électrodes A et B, un courant d'intensité I , puis on mesure la différence de potentiel ΔV , produit par l'effet d'Ohm, entre deux électrodes de référence M et N (dispositif quadripôle).



Dispositif de mesure de la résistivité

électrique En appliquant la loi d'Ohm, on calcule la résistivité apparente

par :

$\rho_a = k \cdot \Delta V / I$ dont k : coefficient linéaire qui dépend des positions relatives des électrodes MN et AB on donne :

$$k = 2\pi / [1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN]$$

* Cas de dispositif de Wenner: $AM = MN = NB = a$

$$\rightarrow k = 2\pi a$$

* Cas de dispositif pole-pole : $k = 2\pi AM$

* Cas de dispositif carré : $k = (2 + 2^{0.5})\pi a$

* Cas de dispositifs quadripôles alignés (de Schlumberger ou de Wenner) : la profondeur d'investigation est reliée à l'écartement des électrodes par la relation empirique de Barker :

$$Z = 0,17 \cdot AB$$

$$Et \ k = \pi \cdot AB^2 / (4 \cdot MN)$$

Pour une formation donnée, la profondeur d'investigation dépend de l'écartement des électrodes AB. On estime l'épaisseur de cette tranche de terrain comprise entre AB/2 et AB/5 : plus les formations sont argileuses, plus elles sont conductrices, et plus l'épaisseur de terrain concerné est faible.

Tableau : résistivités des différents sols

Type de sol	Résistivité	Résistivité du sol saturé
argile	3 à 5	5 à 10
sable	40 à 150	50 à 400
gravier	200 à 500	150 à 500
Schiste cristallin	-	100 à 10.000
Gneiss sain	1000 à 10.000	-
Gneiss altéré sec	300 à 600	-
Gneiss altéré en eau	120 à 200	-
Granites	1000 à 10.000	100 à 50.000
calcaire	-	100 à 10.000

Pour bien explorer un sous sol, on réalise deux types d'opérations :

➤ profil de résistivité : effectué pour la reconnaissance latérale d'un terrain où la profondeur d'investigation sera constante. On déplace le long d'un profil, le même dispositif AMNB (écartinvariant) : la profondeur d'investigation reste la même, et on explore une tranche du sous sol d'épaisseur sensiblement constante. On peut donc déceler des hétérogénéités induisant des variations de résistivité (changement de nature ou de faciès de roches, failles, fractures, grottes...etc.).

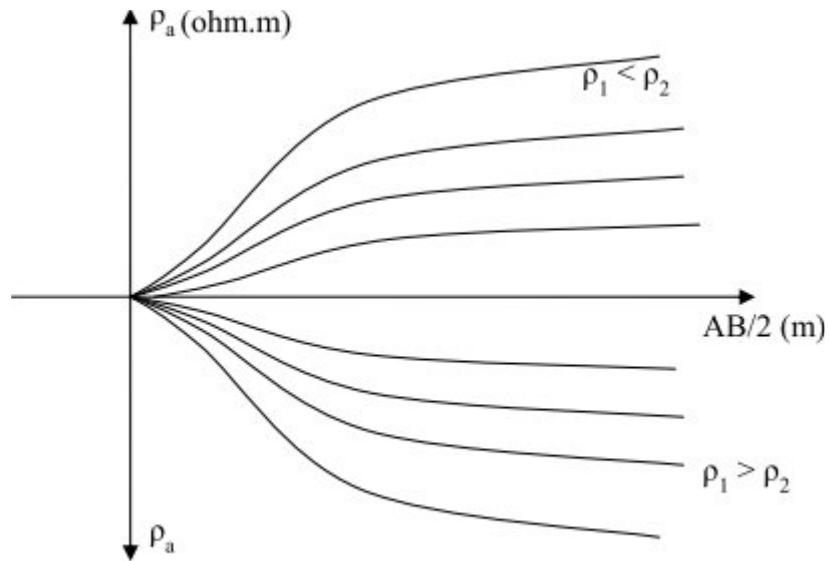
Sondage électrique : on effectue en même station, une série de mesures, en augmentant à chaque fois la longueur de la ligne AB qui régit la profondeur d'investigation. Les valeurs de ρ_a ainsi obtenues correspondent à des tranches de sol à chaque fois plus épaisses.

Le diagramme du sondage électrique s'établit en reportant, sur papier logarithmique, en abscisse ; les demi longueurs de AB (en m) et en ordonnées, les résistivités apparentes (en Ohm.m).

L'interprétation de ces courbes est réalisée par leur comparaison entre elles ou avec des abaques théoriques pré calculés, ou par leur décomposition par modélisation inverse et optimisation aux moyens de logiciels.

Les différentes couches se caractérisent chacune par, une valeur de résistivité très

sensible à la teneur en eau des roches, à la qualité des sels dissous, au pourcentage en argile, à la porosité et au degré de fissuration.



Abaques d'interprétation des sondages électriques

On utilise des fois pour l'interprétation des résultats, certaines formules empiriques comme :
La formule de Archie (1942) : $\rho = b \cdot n^{-c} \cdot f^{-d} \cdot \rho_w$

Avec

ρ : résistivité de la

couchen : porosité

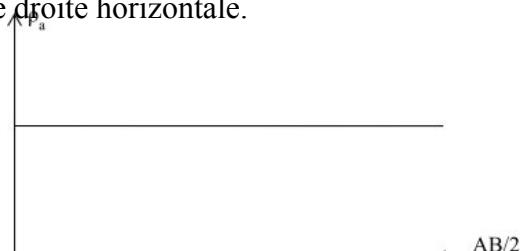
f : fraction de pores contenant l'eau

ρ_w : résistivité de l'eau

b , c et d : paramètres d'ajustement : $0,5 < b < 2,5$; $c = 2$; $1,3 < d < 2,5$

➤ Interprétation des sondages électriques:

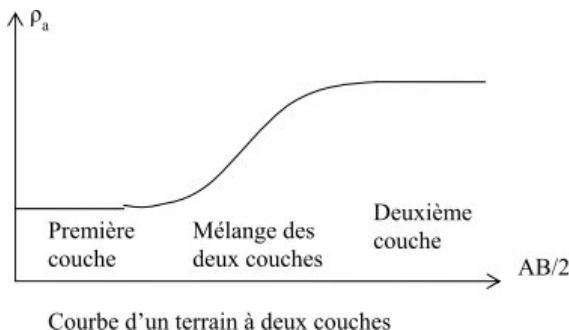
On reporte sur papier bi logarithmique les valeurs la résistivité apparente (en ordonnées) en fonction des valeurs de $AB/2$ (en abscisse) ; on obtient ainsi la courbe expérimentale du sondage. Un sondage électrique réalisé dans un terrain à une seule couche isotrope donne une courbe expérimentale sous forme de droite horizontale.



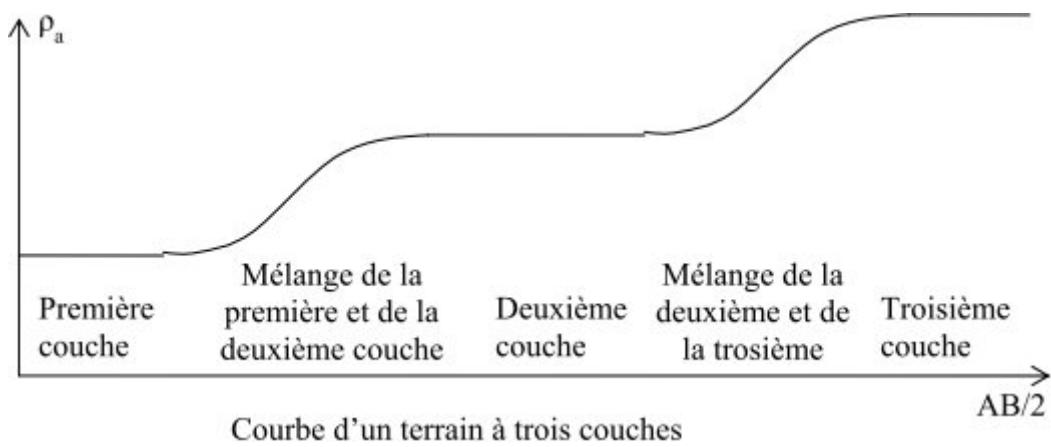
Courbe d'un terrain à une seule couche

Un sondage électrique réalisé dans un terrain à deux couches donne une courbe à deux paliers ; et la pente de la zone d'influence des deux couches est donnée par le rapport ρ_1/ρ_2

. Lorsque $\rho_1 < \rho_2$; la courbe est ascendante, si $\rho_1 > \rho_2$; la courbe est descendante.



Un sondage réalisé dans un terrain à trois couches donne une courbe à trois paliers.



c) Limites des méthodes géophysiques

Dans le domaine de l'hydrogéologie, l'utilisation de la géophysique est généralement limitée à la méthode électrique des résistivités et à la méthode sismique réfraction. La détermination expérimentale des valeurs du paramètre physique étudié et de ses variations peut généralement traduire différentes situations, et seule une bonne connaissance initiale du contexte naturel permet de choisir la meilleure interprétation géologique. L'étude géophysique ne peut donc pas fournir de renseignements très détaillés, mais donne une bonne vue d'ensemble du site prospecté. Elle permet de lever certaines indéterminations, en particulier de vérifier si le sous-sol est homogène ou non et de permettre de façon optimale des vérifications et des étalonnages par forages. L'interprétation géophysique nécessite évidemment de disposer d'un plan topographique suffisamment précis. Chaque méthode géophysique a son domaine d'application et ses limites. Elle ne doit donc pas être utilisée pour des prospections systématiques, mais rester adaptée au problème posé pour répondre à des interrogations précises, en fonction de la topographie des lieux et de la nature et des caractéristiques des terrains reconnus ou envisageables. Dans certains cas, plusieurs méthodes

peuvent être couplées pour faciliter les interprétations finales. L'intérêt de la prospection géophysique réside dans sa facilité de mise en œuvre sur le terrain, sans nécessiter la création d'accès spécifique et sans induire de destructions, ainsi que dans son coût relativement réduit.

La Diagraphie :

diagraphie = à travers des lignes (graphe) ou des enregistrement

On appelle diagraphie tout enregistrement continu en fonction de la profondeur des variations d'une caractéristique donnée des formations traversées par un sondage.

L'enregistrement se fait depuis la surface grâce à une sonde descendue au bout d'un câble muni de conducteurs électriques.

Les diagraphies se font en trou nu et plein de boue ou de fluide de forage. Celles-ci consistent à enregistrer sur toute la profondeur du forage et à l'aide de sondes spécifiques des paramètres caractéristiques des terrains. Les principales méthodes utilisées sont les suivantes : sondes à rayons gamma (mesure de la radioactivité naturelle), diagraphies électriques (mesure de la résistivité), diagraphies soniques (mesure de la propagation des ondes longitudinales).

➤ **Mise en œuvre:**

Les éléments principaux dans l'exécution des enregistrements de diagraphies sont:

- Un camion
- Un câble
- Des sondes

* Le camion contient :

- Un treuil capable d'emmagasiner plusieurs kilomètres de câble
- Des appareils d'enregistrement;
- Des organes de génération de courant;
- Des circuits de contrôle;
- Une chambre de développement de films;

* Le câble : Il comporte 6 ou 7 conducteurs en cuivre ; sa solidité est assurée par 2 couches de fil d'acier. Son diamètre est de 12 mm.

* Les sondes: Ce sont les instruments d'enregistrement qu'on descend à bout de câble dans lessondages.

Types de diagraphies:

On étudie les principes d'application et d'interprétation des diagraphies utilisés dans ledomaine de la recherches des eaux souterraines :

- Les diagraphies électriques:
 - * La polarisation spontanée
 - * Les diagraphies classiques de résistivité;
 - * L'induction;
- Les diagraphies nucléaires:

* La diagraphie du rayon gamma naturel (mesure de la radioactivité naturelle),

- Les diographies acoustiques:

➤ Applications des diographies:

L'étude des diographies nous permet d'agir dans les différentes étapes de l'exploration et de l'exploitation des gisements pétroliers; notamment concernant:

* Les conditions de trou : (Diamètre ; température ; caves ...)

- La pose des tubages ;

- Le contrôle de la cimentation et de l'état technique du tubage.

* La reconstitution précise de la lithologie des différentes formations traversées;

- La localisation des roches réservoirs ;

- Le type de roches réservoirs;

- L'approche des problèmes stratigraphiques et sédimentologiques ;

* L'évaluation des caractéristiques pétrophysiques ;

- La porosité ;

- La perméabilité ;

- Les saturations ;

* La compléction : (Délimitation et contrôle des

perforations ...).

d- Paramètres physiques des principales roches :

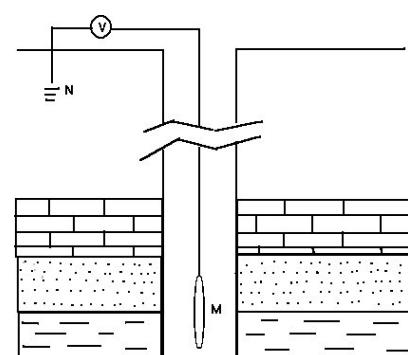
ROCHE	COMPOSITI ON	r ma	f N	dt ma	GRAP I
Sables et Grès	Quartz : SiO ₂	2,65	0-1,5	51-56	0 - 15
Calcaire	Calcite : CaCO ₃	2,71	0	47,5	0 - 15
Dolomie	Dolomite:CaMg	2,87	1,9-3	43,5	0 - 15
Argile		0,5 2,7	50	70-100	100400
Anhydrite		2,98	0-1	50	0 - 5
Sels	NaCl ;KCl	2,16	élevé	67	-

rma : La densité de la matrice fN : L'indice d'hydrogène

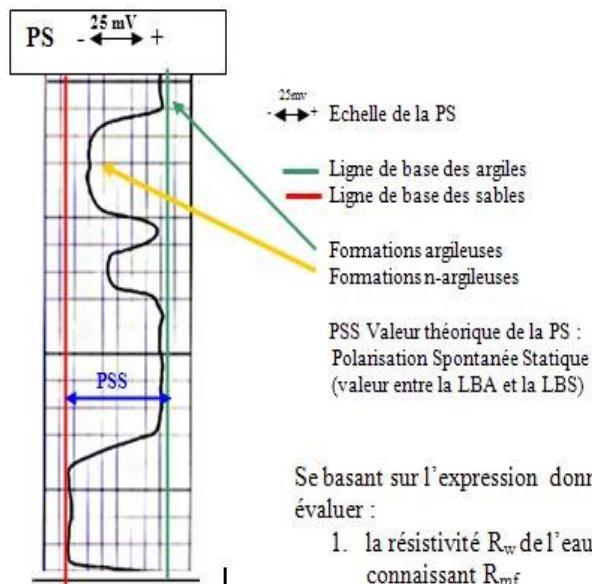
dt : La vitesse de propagation de l'onde acoustique en $\mu\text{s}/\text{ft}$

La polarisation spontanée (Ps)

La courbe de polarisation spontanée ou P.S correspond à l'enregistrement des potentiels qui s'établissent naturellement dans un trou de sondage. La mesure de la P.S nécessite un circuit très simple : Deux électrodes M et N, un câble mono conducteur isolé, un circuit potentiométrique pour équilibrer une éventuelle différence de potentiel entre les deux électrodes et un millivoltmètre.



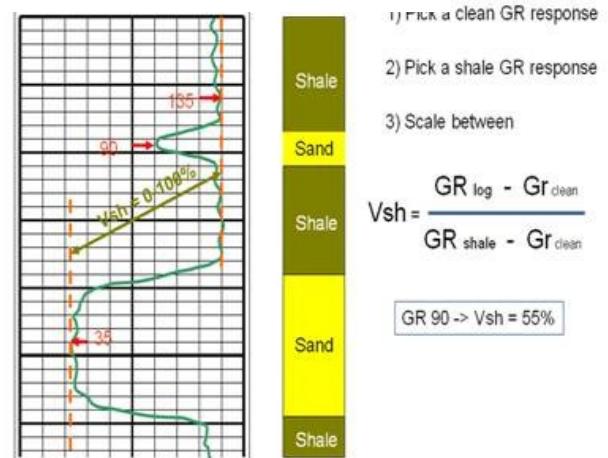
Les couches argileuses ou marneuses d'un sondage ont en général le même potentiel naturel. Sur la diagraphie P.S, elles permettent de définir une ligne de base ou de zéro relatif à partir de laquelle est déterminée la P.S des formations perméables. Sauf indication contraire, la P.S est positive à droite de la ligne de base, négative à gauche.



-
-
-
-

Se basant sur l'expression donnant la PS, on peut évaluer :

1. la résistivité R_w de l'eau de formation connaissant R_{mf}
2. le pourcentage (%) d'argile ayant la PSS corrigée



Les diagraphies nucléaires :

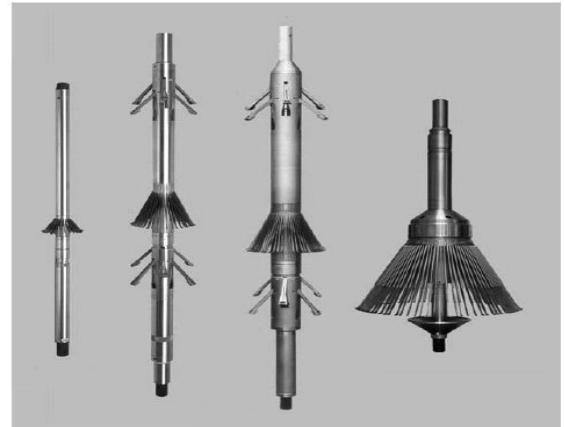
Les diagraphies nucléaires mesurent la radioactivité, naturelle ou

provoquée des couches traversées par un sondage. Les plus utilisés sont :

- Mesure de la radioactivité naturelle : mma ray.
- Mesure de la radioactivité provoquée : neutron et gamma - gamma (ou de densité).

Le principal avantage du carottage nucléaire est qu'ils peuvent être exécutés aussi bien dans des sondages vides ou tubés que dans les forages non tubés pleins de boue.

Les laves, sables, grès, calcaires, dolomies et autres formations perméables sont beaucoup moins radio - actifs que les argiles. La diagraphie gamma est principalement sensible aux variations de la teneur en argile des couches.



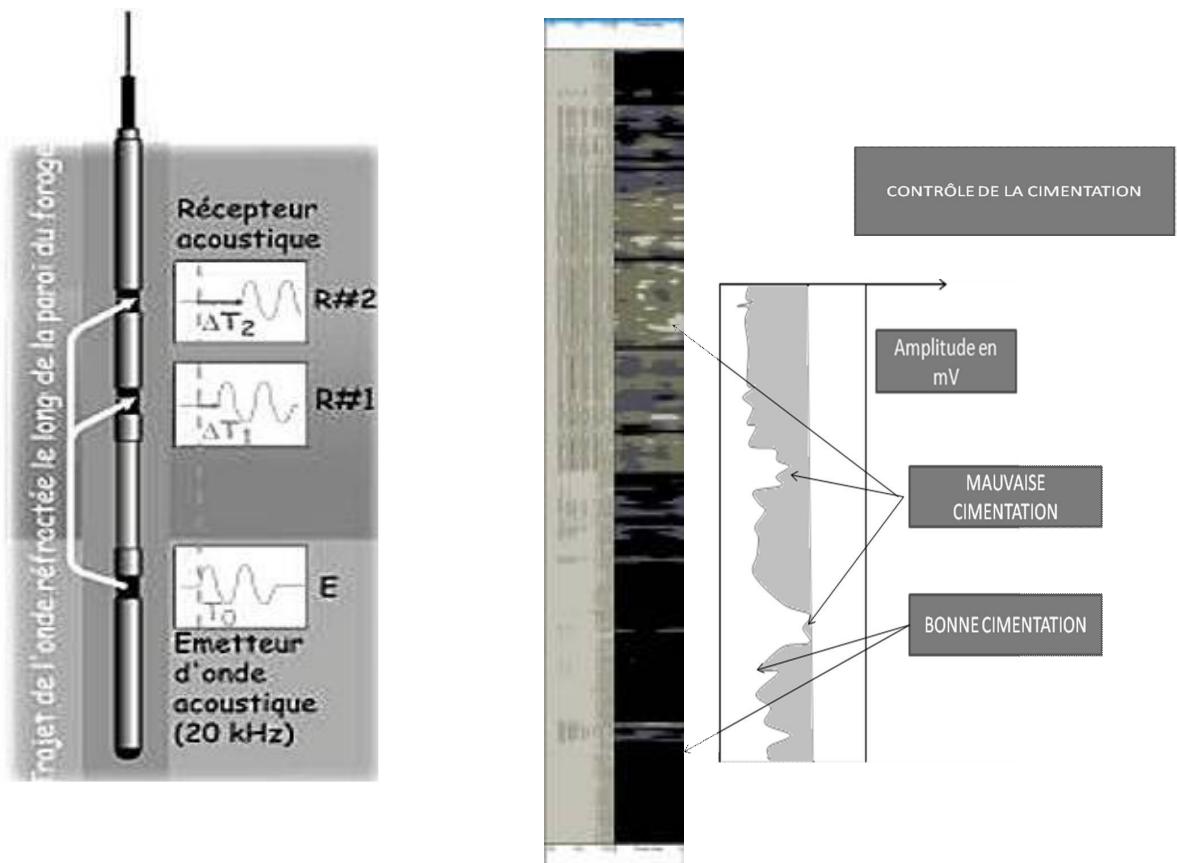
Le diamètre :

Il donne la variation du diamètre du trou et permet donc la localisation des cavités

g) Les diagraphies acoustiques:

C'est une sonde qui permet :

- La détection des joints de tubages métalliques
- L'indication de la côte des crépines
- L'estimation de l'état de corrosion du tubage
- La localisation les zone sans cimentation entre le tubage et l'espace annulaire (free pipe).



Outil de diagraphie acoustique

CHAPITRE :2

I. ORGANISATION ET INSTALLATION DU CHANTIER DE FORAGE

II. CHOIX DE LA TECHNIQUE DE FORAGE

III) STABILITE ET SECURITE DU FORAGE

VI. PRELEVEMENT ET PREPARATION DES ECHANTILLONS:

V.BUT ET TECHNIQUE D'ANAYSE DES ECHANTILLONS:

1. ORGANISATION ET INSTALLATION DU CHANTIER DE FORAGE

Afin d'avoir un bon déroulement des opérations de forage, le chantier doit procurer un milieu qui permettra au foreur d'intervenir rapidement en cas de problème. Pour cela le chantier doit assurer:

- ✓ un périmètre de sécurité autour du chantier.
- ✓ un accès facile pour les véhicules.
- ✓ un approvisionnement en eau.
- ✓ un accès facile pour le remplissage des fosses.
- ✓ un endroit pour l'installation des bureaux.
- ✓ une fosse pour les rejets des déblais (bourbier).
- ✓ un terrain aménagé pour l'installation de l'appareil de forage et aux équipements (outils de forages, tubages et tiges ect,...). Notons que (l'outil, comprimés et équipements d'électricité), doivent être à l'abri des facteurs climatiques (poussières, précipitations, vents).

Après avoir installé l'appareil de forage, l'exécution des opérations fait appel à différentes compétences que le maître d'œuvre doit les maîtriser parfaitement, et doit aussi s'adapter avec toutes situations imprévues qui surgissent au cours de la réalisation de l'ouvrage. Doit aussi avoir une parfaite connaissance; en matière d'équipement et de complémentation, des précautions à prendre pour éviter toute dégradation de cette ouvrage.

Pour cela le maître d'œuvre doit avoir une parfaite connaissance:

- Sur la dureté et la tenue d'un terrain, les causes d'altération d'un fluide de circulation.
- Sur les solutions à prendre lors d'apparition des problèmes de remontée des échantillons.
- Sur les démarches à suivre lors de la rupture qui surgit sur un train de tiges ou sur le tubage.
- Sur les solutions envisagées lors d'apparition des pertes de boue ou de colmatage des orifices de l'outil.
 - les conditions d'une bonne cimentation, d'un bon gravillonnage, etc.
 - sur les causes qui influencent les paramètres prescrits lors du forage (ex: changement brusque de pression ou le volume de boue, changement de la rhéologie de la boue, coincement, rupture de la garniture).
- Avoir une parfaite conscience sur les risques qui peuvent se rencontrer au cours du forage pour cela le maître d'œuvre doit avoir une vigilance permanente jusqu'à l'achèvement total du forage.

Cette maîtrise de ces connaissances peuvent assurer un bon déroulement des travaux de forage.

Pour ces raisons le maître d'œuvre doit procurer à son équipe une formation continue sur la maîtrise des opérations de forage, une sensibilisation permanente sur les risques qui peuvent survenir au cours de sa réalisation (ex: Les accidents de travail, les endommagements d'ouvrage et leurs conséquences sur l'entreprise, l'environnement et

sur la population).

Aussi avant d'entamé les opérations de forage, un rapport d'implantation doit être réalisé par le maître d'ouvrage. Ce rapport doit éclaircir la profondeur, l'architecture, les opérations envisagées pour le

forage, les problèmes et solutions probable (côte et nature du problème). Pour ces raisons l'hydrogéologue est mieux placé pour établir l'architecture de l'ouvrage en prenant en compte :

- la nature et la géométrie des aquifères.
- Les équipements adéquat pour ce genre de terrain.
- les horizons à capter ou à étancher.
- les procédés de captage et d'essais de nappes.
- Les rapports finaux des forages réalisées dans la région en question (problèmes rencontrés au cours du forage ou après l'achèvement, coupes litho-stratigraphiques, débits et niveaux statiques, nature des aquifères qu'abrite cette région, la nature et le potentiel hydrique des ressources en eau de la région)

Aussi le maître d'ouvrage veillera à interdire l'utilisation de matériels périmés ou de modes d'exécutions inadaptées. Pour cela le rapport d'implantation doit préciser le profil du forage et le plan de tubage

- longueurs et diamètres des différentes parties du forage,
- position, profondeur, longueurs et diamètres de la crépine,
- pompes correspondant aux débits de pompage
- nature, débit et pressions du fluide de circulation, vitesses d'avancement prévisibles, etc.
- Volume envisagé pour le gravier additionnel

II. CHOIX DE LA TECHNIQUE DE FORAGE

Si la réalisation d'un forage hydraulique à pour but d'exploiter les eaux souterraines, le choix de la technique de forage employé doit:

- Assurer une performance de point de vue avancement, sécurité
- Assurer une satisfaction économique et scientifique.
- Etre prêt à riposter aux différentes difficultés rencontrées au cours de l'exécution du forage

Aussi le choix de la technique engagé est en fonction:

- ✓ de la nature lithologique des terrains traversés.
- ✓ de la profondeur de l'aquifère.
- ✓ de l'objectif du forage (forage d'exploitation ou de reconnaissance)
- ✓ de l'endroit du forage
- ✓ nature et les caractéristiques du milieu.
- ✓ de nature d'eau à exploitée.

III) STABILITE ET SECURITE DU FORAGE

La garantie de qualité et de pérennité de l'ouvrage est conditionnée par:

- ✓ Le choix d'équipements appropriés : cuvelages, tubages, crépines, drains...
- ✓ Les caractéristiques des matériaux tubulaires adaptées à l'ouvrage, aux milieux traversés (épaisseur, résistance à la pression et à la corrosion)
- ✓ La qualité des eaux souterraines:
- ✓ La nature du fluide utilisé (ex: nappe à forte potentiel hydrique impose l'utilisation des fluides à forte densité, un forage qui pourra traverser une formation salifère impose l'utilisation des boues salées saturées.

a). Tubages :

A fin d'assurer une longévité de l'ouvrage le maître d'œuvre doit doter ce dernier par une architecture qui sera en fonction de la nature du terrain, la profondeur de la nappe. En général les forages sont conçus sous trois formes . (Fig.01)

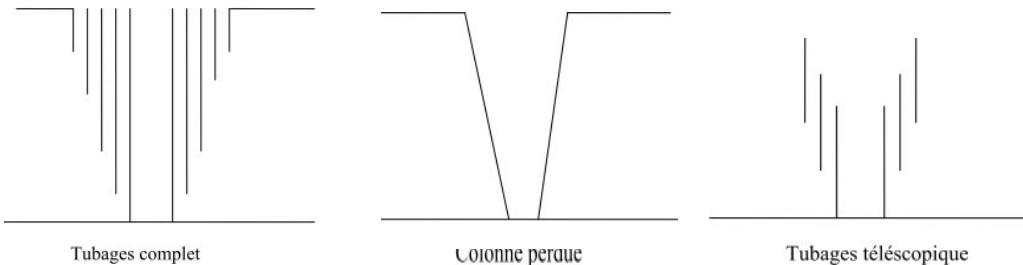


Fig:01.Différents types de tubages

b) Contrôle de la rectitude et de la verticalité :

Le contrôle périodique de la verticalité au cours du forage est obligatoire, et cela pour éviter les déviations qui pourra entraîner des difficultés pour la mise en place du tubage ou même pour le rendement de la pompe. On mesure la verticalité par les appareils suivants : l'inclinomètre thermique, l'inclinomètre mécanique et l'inclinomètre optique.

VI. PRELEVEMENT ET PREPARATION DES ECHANTILLONS:

La méthode de prélèvement est déterminée par la technique de forage:

Un forage par battage nécessite des interruptions de l'avancement, et cela pour sortir le trépan en surface et l'extraction des déblais. Tandis que le forage rotary les déblais sort en surface avec la remontée de la boue, soit par l'espace annulaire (circulation directe) ou par l'intérieur des tiges (circulation inverse). La fréquence d'échantillonnage sera en fonction de l'intérêt de la côte en question (côte tubage, formation aquifères, changement de faciès).

En forage rotary l'échantillonnage s'effectue au niveau des tamis vibrants, suivant des intervalles qui doit être déterminé par le géologue. Cependant, il est nécessaire de connaître exactement le temps

de remonté de l'échantillon qui correspond pour chaque profondeur "lag time" . Ensuite ils seront lavés puis séchés. En exploration, des déblais non lavés et d'autres lavé et séché sont prélevés chaque 10m ou 05, et mis dans des sachets numérotés puis envoyé au laboratoire pour des études approfondies.

Le lavage des déblais est suivant la boue utilisée dans le forage rotary. On utilise

- De l'eau claire pour une boue bentonitique.
- De l'eau claire pour une boue bentonitique.
- De l'eau salée saturée pour une boue salée.
- De gaz-oil pour une à l'huile (pour forage pétrolier).

L'échantillonnage par carottage impose de découper dans la formation, un cylindre appelé carotte, et de la remonter à la surface. L'examen des carottes permet d'apprécier les caractéristiques pétro-physiques de la carotte (granulométrie; nature du ciment des grains, porosité, fissuration, nature et l'épaisseur des couches traversées par le carottier).

V. BUT ET TECHNIQUE D'ANALYSE DES ECHANTILLONS:

Les déblais de forage procure aux maîtres d'ouvrage:

- ✓ Des informations précieuses sur la nature lithologique des formations traversées.
- ✓ L'établissement de la courbe granulométrique et par la suite définir les caractéristiques des crêpines et du gravier additionnel pour le forage.

L'examen s'effectue à l'aide d'un microscope binoculaire (Fig.03) dont la description géologique comporte huit données principales :

- ✓ type de formation : sable, argile, calcaire, etc.
- ✓ pourcentage du mélange
- ✓ Couleur
- ✓ structure granulaire
- ✓ Forme (arrondi, sub-arrondi, sub-anguleux, anguleux, bien classés, moyennement classés, mal classés)
- ✓ Taille (très grossier, grossier, moyen, fin, très fin)
- ✓ cimentation inter granulaire (argileux, carbonaté, siliceux, quartzitique)
- ✓ dureté (dur, compacte, tendre, indurée, feuilletée, plastique, pulvérulente, friable)

IV. LES FLUIDES DE CIRCULATION

Appelé ainsi car le fluide utilisé initialement était de l'eau, mais avec le développement des différentes techniques de forage qui sont en relation avec la croissance de la profondeur. Cela a induit à l'apparition des types de fluides qui sont choisis en fonction de la technique de

forage et la nature du terrain.

Exemple: On utilise:

- ✓ De l'Air pour des terrains de bonne tenue homogènes, terrains secs ou faiblement aquifères, dans les zones à perte non aquifères.
- ✓ Des agents déshydratants (Silicagel) ou des agents moussants (savons) pour les zones légèrement aquifères.
- ✓ L'Eau pour les terrains consolidés, formations argileuses ou zones à pertes.
- ✓ L'eau salée pour les formations salifères.
- ✓ De la Boue ou bien Suspension colloïdales (généralement benthonique) pour les terrains hétérogènes et non consolidés et hautement perméables.

a) *rôles des fluides de forage .*

Le fluide de forage qui peut-être soit de l'air (gazeux) ou bien du liquide (eau claire, boue spéciale, boue naturel) peut assurer les fonctions suivantes:

- 1) Nettoyage du puits: La boue doit débarrasser le puits des particules de formation forées qui se présentent sous forme de débris de roche appelés « déblais ».
- 2) La boue permettre le maintien des déblais en suspension: Le fluide de forage doit non seulement débarrasser le puits des déblais de forage durant les périodes de circulation, mais il doit également les maintenir en suspension pendant les arrêts de circulation.
- 3) La prévention au cavage et des resserrements des parois du puits: La boue doit posséder des caractéristiques physiques et chimiques telles, que le trou conserve un diamètre voisin du diamètre nominal de l'outil. Le cavage est causé par des éboulements, par la dissolution du sel, par la dispersion des argiles, par une érosion due à la circulation de la boue au droit des formations fragiles, etc. Les resserrements ont souvent pour cause une insuffisance de la pression hydrostatique de la colonne de boue qui ne peut équilibrer la pression des roches.
- 4) Consolidation des parois des puits par le dépôt du filtrat: La filtration de la boue dans les formations perméables permis l'apparition d'un filtrat, ce qui permet la consolidation des parois du forage
- 5) Prévention aux venus (eau, de gaz, ou d'huile): Afin d'éviter ces éruptions, le fluide de forage doit exercer une pression hydrostatique légèrement supérieur à celle du gisement, et cela pour éviter toute éruption mais aussi d'éviter l'apparition des partés (lorsque la pression hydrostatique sera largement supérieur à celle du gisement)
- 6) Entraînement de l'outil: Dans le cas du turboforage la boue entraîne la turbine en rotation, et par la suite l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil.
- 7) Apport des renseignements sur la nature lithologique et les fluides des formations traversées: La boue permet d'obtenir des renseignements permanents sur l'évolution des formations et fluides rencontrés.

Ces informations sont obtenues :

- Par les déblais remontés avec la circulation du fluide,
 - L'évolution des caractéristiques physiques et/ou chimiques de la boue,
 - La détection de gaz ou autres fluides mélangés à la boue.
- 8) Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde: Du fait de son passage en surface, la boue en circulation se trouve à une température inférieure à celle des formations ce qui lui permet de réduire efficacement l'échauffement de la garniture de forage et de l'outil. Cet échauffement est dû à la transformation d'une partie de l'énergie mécanique en énergie calorifique.
- 9) Contamination des formations productrices: La présence d'un fluide au droit de formations poreuses et perméables peut exercer une pression hydrostatique supérieure à la pression de gisement. Cela peut nuire à la future mise en production de cette zone.
- 10) Corrosion et usure du matériel: Le fluide peut accélérer l'usure du matériel de sondage, par une action mécanique, si elle contient des matériaux abrasifs. Elle peut aussi être corrosive par une action électrolytique (présence d'ions) due à un déséquilibre chimique.
- 11) Diminution du poids apparent du matériel de sondage: Bien que ce soit beaucoup plus une conséquence qu'une fonction, la présence d'un fluide d'une certaine densité dans le puits permet de diminuer le poids apparent du matériel de sondage, garniture de forage et tubages, ceci qui permet de réduire la puissance exercée lors du levage.

b) Les différents types de boue :

✓ Boue à la bentonite : la bentonite c'est une variété d'argile très fine : la dimension des particules est inférieure à $1\mu\text{m}$ et de densité de 2,6. A l'hydratation, le volume devient 12 à 15 fois et parfois 30 fois plus grandes. Un gramme de bentonite dispersé dans l'eau offre 4 à 5 m² de surface de contact. On ajoute parfois à la boue de bentonite des additifs pour la rendre compatible avec le terrain, ou avec la pression de la nappe, ou pour redonner à la boue ses propriétés initiales. On distingue deux catégories de bentonite : les bentonites calciques naturelles et les bentonites sodiques naturelles qui sont les plus utilisées pour les boues de forage.

Une bentonite peut se définir par :

- ses limites de liquidité
- ses limites de plasticité
- et son indice de plasticité constituant les limites d'Atterberg.

✓ Boue polymère : C'est une substance formée par l'union bout à bout de deux molécules ou plus de la même qualité de chaîne dans un autre composant d'éléments et de proportions analogues, mais à plus haut poids moléculaire et à propriétés physiques différentes. Les polymères peuvent être utilisés directement en tant que boue ou comme additif aux boues bentonitiques,

et sont subdivisés en polymères naturels et polymères artificiels (synthétiques).

Avantage :

Les boues polymères possèdent les avantages suivants :

- forage avec une pression réduite au fond du trou.
- frottements réduits (usure minimum)
- les carottes et échantillons ne sont pas masqués par le fluide (échantillonnage facile à faire).

Inconvénient:

Pour les polymères naturels : le risque de la prolifération (développement) des bactéries dans un temps très court (3 à 15 jours suivant les produits). Ces bactéries sont parfois toxiques et difficile à éliminer.

Pour les polymères artificiels : Risque d'instabilité des parois , et colmatage des parois. Le lavage des polymères se fait par action chimique, ce qui provoque parfois le risque de pollution de l'aquifère.

Air comprimé: L'emploi de l'air comprimé comme fluide de forage procure les avantages suivants :

- Plus grande vitesse de pénétration dans la roche dure et consolidée.
- Réduction du poids sur l'outil.
- Grande capacité de dégagement des déblais.
- Facilite le forage dans les formations gonflantes.
- Faibles besoins d'eau.

L'utilisation de l'Air comprimé au forage rotary sert à évacuer efficacement les déblais, on utilise une grande vitesse de remontée de l'air (915 à 1520 m/min), ce qui permet d'avoir un forage bien dégagé et propre. Le volume d'air sera ajusté pour maintenir une vitesse annulaire nécessaire à la bonne remontée des déblais. L'augmentation de la vitesse de l'air dans l'espace provoque une érosion des parois (provoquant l'augmentation du volume du trou). Aussi en présence de venues d'eau dans le forage, une boue se forme, par le mélange d'eau avec les déblais, ce qui réduit l'espace annulaire, et augmente la pression engendrant la fracturation des formations tendres.

L'utilisation de l'Air comprimé pour marteau fond de trou : Plus la pression de service d'air comprimé est élevée avec un marteau fond de trou, moins on aura de risques de coincement. La plus grande partie des marteaux fond de trou peuvent travailler à des pressions comprises entre 4 et 18 bars. Le choix de la puissance du compresseur dépend de la consommation d'air comprimé estimée pendant le forage

et pendant le soufflage.

.....

Plan

1. Introduction
2. Généralités sur la géophysique
 - 2.1. Etymologie et Définition
 - 2.2. Différents Domaines de La Géophysique
 - 2.3. Différentes méthodes de géophysique appliquée
 - 2.4. Domaines d'application
3. Prospection géophysique
4. Géophysique pour les recherches hydrogéologique
 - 4.1. géophysique de surface
 - 4.1. 1. Méthodes électriques
 - 4.1. 2. dispositif de Schlumberger
 - 4.1. 3. dispositif de Wenner
 - 4.1. sondage électrique (SEV)
 - 4.2. les diagraphies
 - 4.2.1.étyologie et définitions
 - 4.2.2.Mise en œuvre:
 - 4.2.3. Types de diagraphies:
5. conclusion

1. Introduction

Les méthodes de reconnaissance indirectes consistent en une application de la géophysique, en se basant essentiellement par mesurer à l'aide des appareils un paramètre physique de roches, ou envoyer un signal et enregistrer les réponses des roches. Les valeurs mesurer par les appareils sont à les traduire en terme de roches et des formation géologique, d'où vient la notion d'interprétation, qui exigent une longue expérience professionnelle et une maitrise des lois physiques.

schéma appareils grandeur physique interprétation

appareils utilisés en géophysique

Un gravimètre est en fait un [accélémètre](#), car selon le [principe d'équivalence](#), il mesure la même chose. Cependant un gravimètre est spécialisé dans la mesure d'une accélération verticale proche de la pesanteur terrestre dite [normale](#), et avec une grande précision autour de cette valeur.



2. Généralités sur la géophysique

2.1. Définition et Etymologie

La **géophysique**, comme l'indique l'[étymologie](#), se définit comme la discipline qui permet l'étude du globe terrestre à toutes les échelles spatiales et temporelles, par des méthodes dérivées de la physique.

Le Terme de « **Géophysique** » fut utilisé pour la première fois en Allemagne, où il apparaît dans les écrits scientifiques de Friedrich fröbel¹ en 1834. Cependant Les Frères Schlumberger Qui, dans les années 1920, connurent les premiers succès commerciaux.

La **Géophysique** est donc une discipline importante des Sciences de la Terre.

Elle vise l'étude des Caractéristiques Physiques de la Terre, Ou d'autres planètes, utilisant des Techniques de mesures Indirectes.

(Gravimétrie, Géomagnétisme, Sismologie, Radar Géologique, Résistivité Apparente, Etc.)

La **géophysique** utilise toutes les méthodes de la physique pour obtenir des informations sur les zones difficiles d'accès du globe.

Par exemple, seule la géophysique permet d'avoir des connaissances concernant le noyau terrestre, le fond des océans ou les confins de l'atmosphère, là où des mesures physiques directes sont pour ainsi dire impossibles.

2.2. Différents domaines de la Géophysique

On distingue classiquement, selon l'échelle spatiale et selon la finalité d'application, deux domaines professionnels, que l'on peut intituler de manière pragmatique.

2.2.1. La physique du globe

divisée en deux domaines, (i) **la géophysique interne**, dont l'objet d'étude s'étend de la surface terrestre jusqu'au centre de la Terre et (ii) **la géophysique externe**, qui s'intéresse à ce que l'homme a au dessus de la

tête ; la limite externe étant mal définie, du fait des interactions entre les

2.2.2. La géophysique appliquée concerne plus directement tous les domaines de l'activité humaine et de la société, qui ont des relations avec le sous-sol. Les métiers couvrent en particulier l'exploration et la production des ressources naturelles ou anthropiques – ressources minérales, eau, agriculture – l'environnement, l'aménagement, la protection et la valorisation du territoire, etc. La composante

« Recherche et Enseignement » est, elle aussi bien entendu, présente et importante en géophysique appliquée.

La géophysique appliquée est la partie de la géophysique dont nous attendons des informations pour les activités humaines dans différents domaines. Dans le sens originel du mot, la géophysique appliquée correspond à la prospection géophysique, par exemple, la recherche de substances utiles dans le sous-sol ou d'objets posés sur le fond de l'océan, pour les cas qui nous concernent.

Elle se pratique soit à la surface de la terre, soit dans les forages

Géophysique de surface, ou

dans un forage au moyen d'une sonde portant les instruments de mesure: Géophysique de forage.

2.3. Différentes méthodes de géophysique appliquée est la partie de la géophysique dont nous attendons des informations pour les activités humaines dans différents domaines. Dans le sens originel du mot, la géophysique appliquée correspond à la prospection géophysique, par exemple, la recherche de substances utiles dans le sous-sol ou d'objets posés sur le fond de l'océan, pour les cas qui nous concernent.

Cette diversité d'objectifs et d'échelles implique l'existence de nombreuses méthodes :

- La gravimétrie
- La méthode magnétique
- La méthode tellurique
- La scintillométrie
- Les méthodes acoustiques et sismiques
- La méthode électrique
- Les méthodes électromagnétiques

2.4. Domaines d'application

Elles sont toutes des outils essentiels utilisés dans des domaines tels que : La recherche scientifique La prospection pétrolière et le domaine parapétrolier

Le génie civil

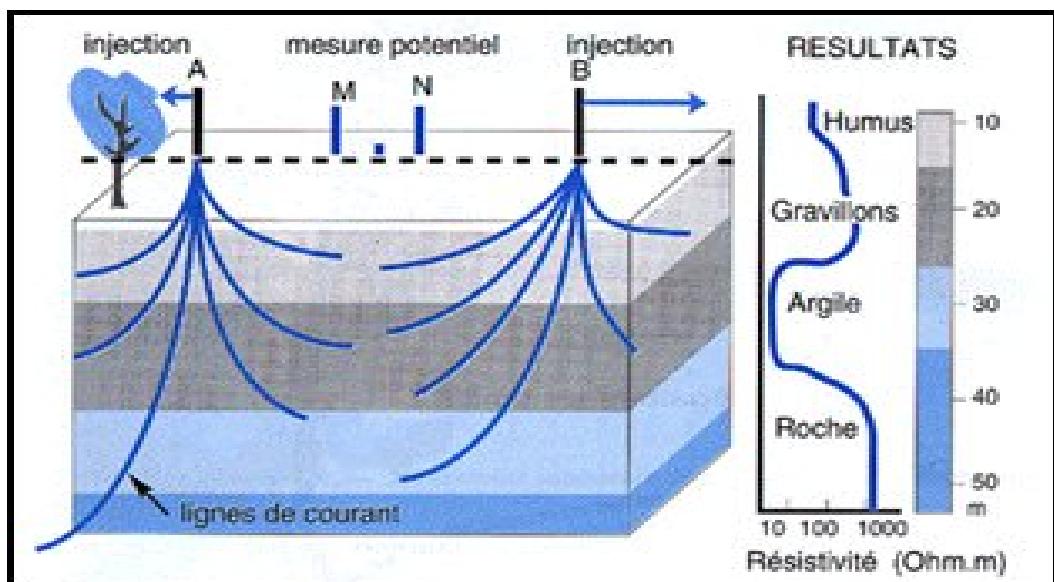
La prospection minière

L'hydrogéologie

La pédologie
La géothermie
L'hydrogéologie
L'archéologie

3. Prospection Géophysique

La prospection géophysique concerne presque exclusivement la recherche d'hydrocarbures et c'est là qu'elle trouve le moteur de son développement. L'objectif du géophysicien pétrolier est d'éviter les forages inutiles, le coût d'un puits étant extrêmement élevé. La prospection pétrolière ne peut donc se concevoir sans un usage intensif de levés géophysiques préalables aux forages eux-mêmes



INTRODUCTION A LA RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE

La reconnaissance géophysique d'un site consiste à déterminer:

- la nature,
- la répartition;
- les propriétés des matériaux dont il est composé ;
- l'existence ou pas d'anomalies.

La reconnaissance se traduit par l'élaboration d'un modèle géologique.

Ces représentations prennent matériellement la forme de cartes, de coupes, de blocs diagrammes, de coupes de sondages, de textes ou même de maquettes.

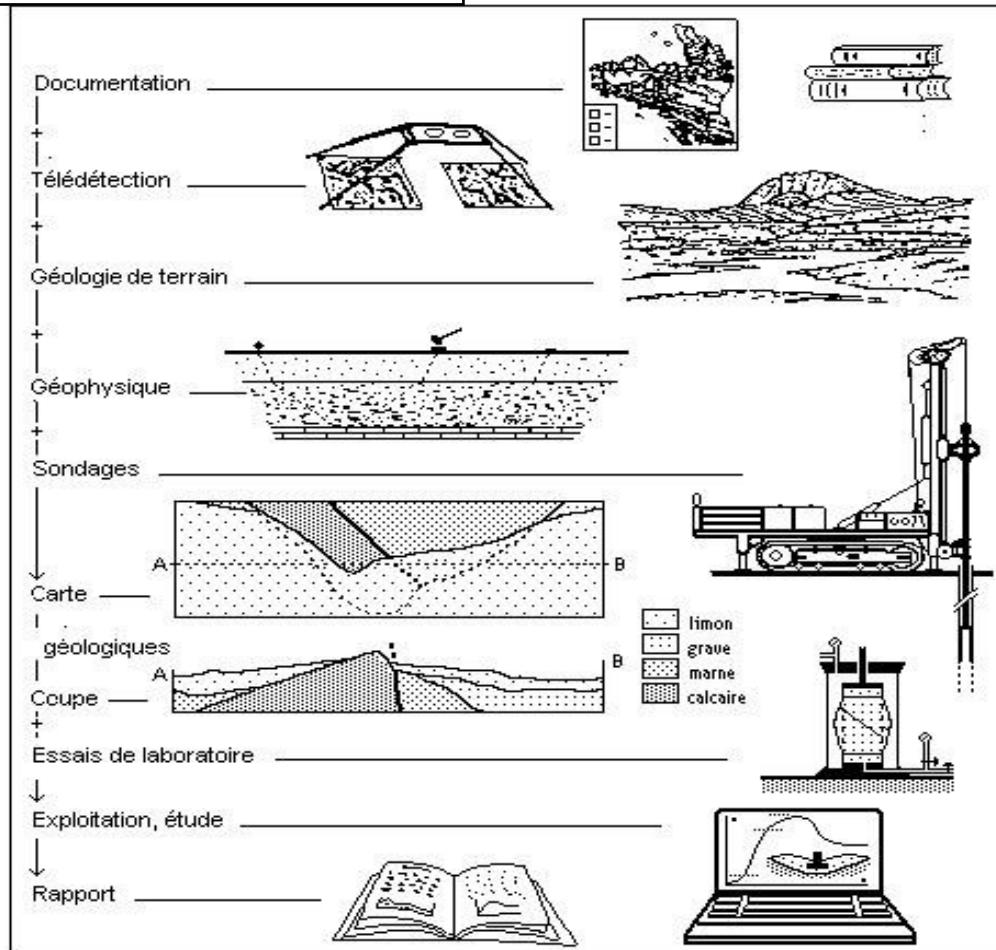
Le but de la reconnaissance est de l'améliorer, de le rendre fiable, précis, le plus complet possible afin de permettre une conception qui repose sur les données dont on a besoin et qui soient les plus sûres possible.

Méthodes directes

- Sondages carottés
- Forages
- Puits
- Tarières

Méthodes indirectes

- Contrôle non destructibles ou méthodes indirectes:
- investigation géophysique



Place de la géophysique dans les étapes d'étude d'un projet

1. Définitions

La géophysique applique les moyens de la physique à l'étude de la structure des terrains.

La géophysique est née de l'interaction de ces phénomènes physiques avec les paramètres physiques liés à la roche ou caractéristiques des roches.

- 1- la méthode **gravimétrique** construite à partir de la relation « densité des roches » et « force de gravitation »
- 2- La méthode **magnétique** construite à partir de la relation « susceptibilité magnétique »
- 3- La méthode **sismique** construite à partir de la relation « paramètre élastique » et « vitesse de propagation de l'onde »
- 4- La méthode **électromagnétique** construite à partir de la relation « permittivité électrique ou diélectrique, perméabilité magnétique » et « intensité du champ électromagnétique »
- 5- La méthode **électrique** construite à partir de la relation « résistivité » et « champ électrique »
- 6- La méthode **radioactive** construite à partir de la relation « éléments radioactifs présents dans la roche Uranium, Thorium » et champ radioactif « α , β , γ »

2. Choix des méthodes Géophysiques

Du fait que les mesures géophysiques s'effectuent en surface, la profondeur d'investigation et la profondeur de pénétration des champs physiques appliqués conditionnent le choix de la méthode géophysique à utiliser.

Lors des études de **reconnaissances de bassins sédimentaires ou de zones vierges** (non explorées), le choix repose sur **la gravimétrie, le magnétisme, la radiométrie et la magnétotellurique**.

Par contre dans des **études détaillées et semi détaillées**, les méthodes qui s'appliquent mieux sont la **sismique réfraction réflexion haute résolution**; la méthode électrique sondage électrique et les méthodes de polarisation.

3. Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation varie avec les diverses méthodes.

Sism réfraction peupénétrante, dite de surface, quelques dizaines à quelques centaines de mètres

Sism réflexion très pénétrante recherche pétrolière
Electrique: profondeur d'investigation qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres.L'interprétation nécessite des étalonnages

4. Profondeur de pénétration

La profondeur de pénétration est liée aux possibilités d'un champ physique donné, depénétrer aisément a l'aide d'un système d'acquisition adéquat

5. Systèmes d'acquisition des données géophysiques.

La mise en œuvre d'un système d'acquisition de données géophysiques:

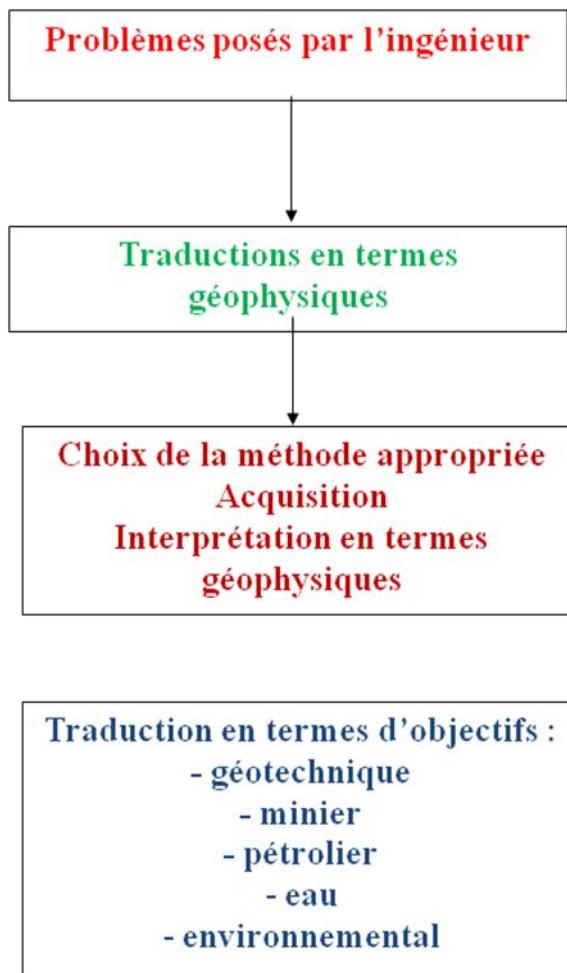
- est fonction des conditions naturelles du milieu :
- est efficace, s'il peut nous assurer d'une part une bonne acquisition de données et d'autre part un bon rapport signal sur bruit:

6. Traitement des données géophysiques.

Le traitement des données géophysique consiste à résoudre le problème inverse, c'est la confrontation des données expérimentales (image virtuelle du modèle réel de terrain) avec un modèle théorique, ou les paramètres de ce dernier sont prédéfinis a priori.

7. Stratégie de prospection géophysique

Lorsqu'on envisage une étude géophysique dans une région donnée, on commence par préciser les problèmes qu'on désire résoudre



8. Conditions pour qu'une technique géophysique soit efficace :

- faire la prévision;
- réaliser au bon moment ;
- connaître ses limites
- savoir que son efficacité peut être liée à une autre technique
- savoir que sa performance peut être accrue par une autre méthode.

9. Classification des méthodes Géophysiques

Il existe plusieurs classements possibles des méthodes géophysiques.

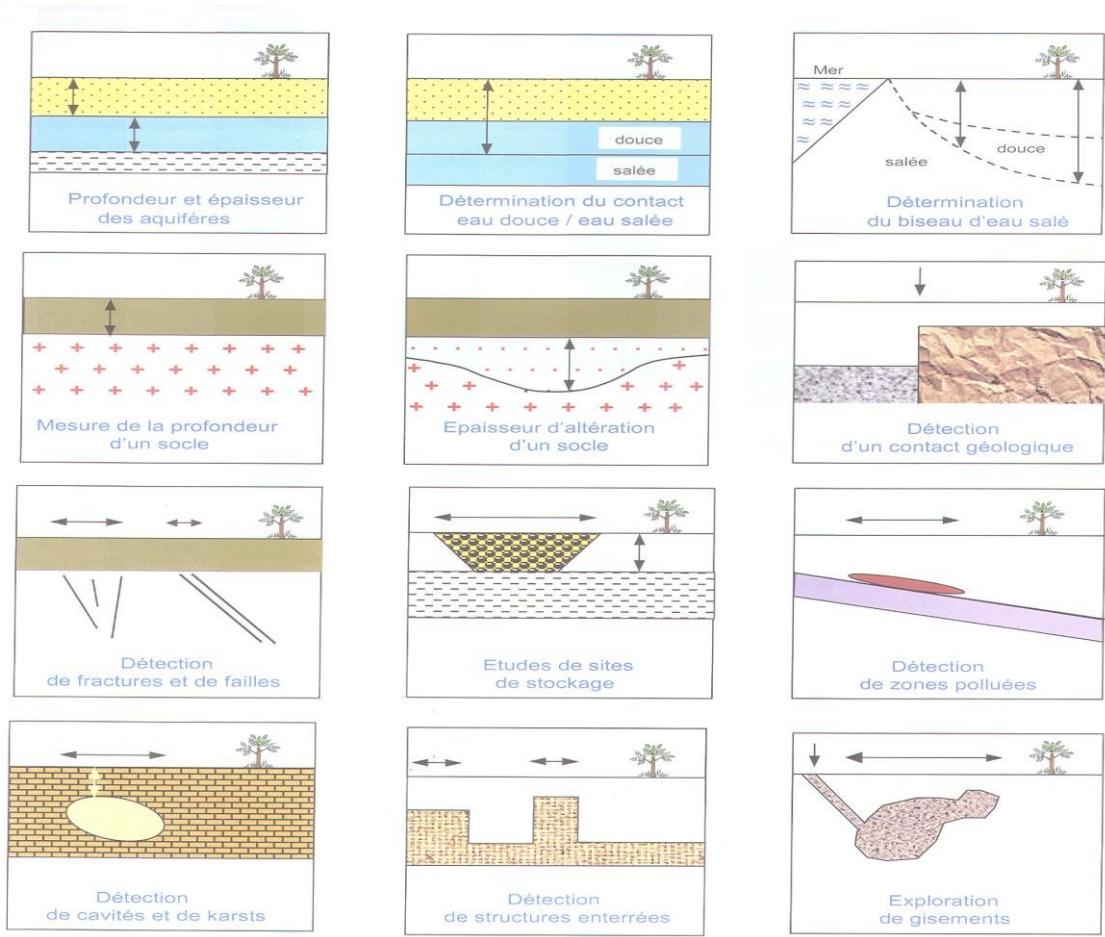
- Classement basé sur leur finalité: (pétrolière, minière, géotechniques, ...)
- Classement basé sur la nature physique du phénomène mesuré (potentielle par exemple sion mesure une quantité dérivant d'un potentiel).

* les méthodes naturelles, appelées aussi passives, qui mesure un phénomène naturel (sismologie, gravimétrie, magnétométrie, tellurique et magnétotellurique, polarisation spontanée, radiométrie, géothermie)

* les méthodes provoquées, appelées aussi actives, qui créent un phénomène pour en mesurer les effets (sismique, électrique, polarisation provoquée, électromagnétisme).

- Classement basé sur la profondeur d'investigation :

- * La géophysique des grandes profondeurs
- * La géophysique des moyennes profondeurs
- * La géophysique de subsurface
- * La géophysique spatiale.
- * La géophysique interne "Mesures dans les puits de forage"



Les domaines d'application de la géophysique

4. prospection géophysique en hydrogéologie

4.1. de surface

4.2. dans les forages

La prospection géoélectrique.

I. Les méthodes de résistivité à DC

Elles sont basées sur la mesure du potentiel électrique généré par l'injection d'un courant *continu* (DC) dans le sol. Elles se distinguent de la P.S. où on mesure le potentiel généré naturellement, et de la Polarisation Provoquée où on injecte un courant *alternatif* (AC).

1. Notion de résistivité électrique

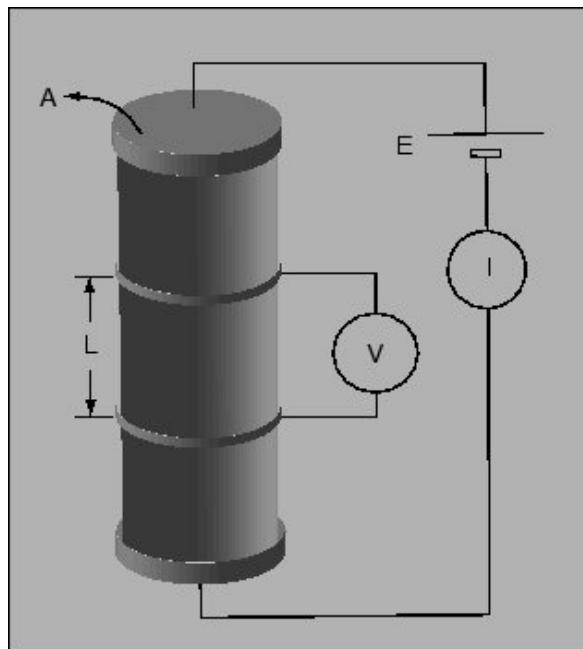


Figure .1: Mesure de la résistivité en laboratoire.

La *résistance* mesure l'opposition au passage d'un courant électrique, et peut permettre de caractériser un matériau. La loi d'Ohm stipule que la résistance électrique est donnée par le quotient du potentiel **V** appliqué aux bornes d'un matériau par le courant **I** qui circule, soit

$$R = V/I \text{ exprimée en ohm} \quad (1)$$

La *résistivité électrique* **ρ** et est reliée à la résistance par :

$$R = \rho L/A \text{ exprimée en ohm.m} \quad (2)$$

pour un prisme rectangulaire de longueur **L** et de section **A** (figure 1).

L'inverse de la résistivité est appelée la conductivité électrique ($\sigma = 1/\rho$) et ses unités des mho/m ou siemens/m.

2. Deux électrodes à la surface

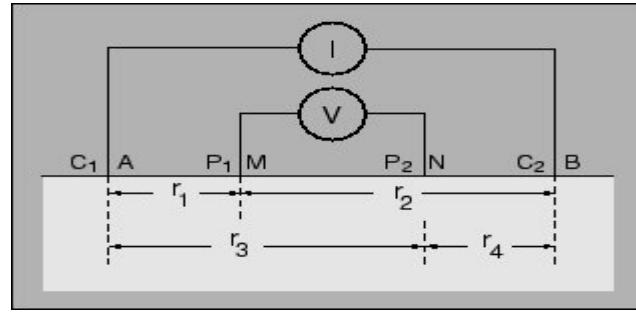


Figure .2: Dispositif à quatre électrodes en surface.

Lorsque la distance entre deux électrodes du courant est finie, le potentiel en un point P_1 est affecté par ces deux électrodes (figure 4). Le potentiel au point P_1 dû à l'électrode C_1 est :

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{I} \rho / 2\pi r_1, \text{ et le potentiel au point } P_1 \text{ dû à l'électrode } C_2 \text{ est : } \mathbf{V}_2 = -\mathbf{I} \rho / 2\pi r_2,$$

Puisque le courant qui sort par une électrode est égal au courant qui entre par l'autre électrode, on peut écrire que $\mathbf{I}_1 = -\mathbf{I}_2$. Le voltage total à P_1 est :

$$\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 = (\mathbf{I} \rho / 2\pi) * (1/r_1 - 1/r_2)$$

Ainsi, la différence de potentiel ΔV entre deux électrodes de potentiel sera

$$\Delta V = (V_1 + V_2) - (V_3 + V_4), \text{ ou encore } \Delta V = (\mathbf{I} \rho / 2\pi) * (1/r_1 - 1/r_2) - (1/r_3 - 1/r_4)$$

3. L'exploration verticale du sol: les sondages

On a vu que pour un sous-sol homogène et isotrope, il est possible de trouver la résistivité du milieu en injectant du courant et en mesurant le ΔV ainsi créé. Pour un dispositif comme celui de la figure 4, la résistivité ρ se trouve par la relation

$$\rho = \Delta V \underbrace{\left[\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \right]}_K \quad (17)$$

où K est un facteur géométrique du dispositif d'électrode, et où les unités sont :

$$I = \text{mA}, \Delta V = \text{mV}, \rho = \Omega \text{m}, \text{distances} = \text{m}.$$

Jusqu'ici, nos calculs de la résistivité du sol se sont basés sur l'hypothèse d'un sous-sol homogène et isotrope. Or, il n'en est rien en réalité. Le but de la prospection électrique est

justement de permettre au géophysicien de se faire une image de la structure et deshétérogénéités du sol. L'exploration par méthode à courant continu se fait de deux façons:

- sondages électriques: exploration verticale;
- profilage (traînés électriques): exploration horizontale.

L'examen de sous-sols hétérogènes va nous amener à définir la notion de résistivité apparente (ρ_a). Si dans un sous-sol hétérogène quelconque on injecte un courant I à l'aide d'un dipôle AB et qu'on mesure une différence de potentiel ΔV à l'aide d'un dipôle MN , chacune de ces quatre électrodes étant placée n'importe où, alors la résistivité apparente ρ_a est donnée par :

$$\rho_a = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right]} \quad (18)$$

et correspond à la résistivité d'un sous-sol homogène pour lequel on mesurerait les mêmes valeurs ΔV et I pour le même dispositif d'électrodes. La résistivité apparente a donc la dimension d'une résistivité et est exprimée en Ωm .

La résistivité apparente n'est pas caractéristique d'un site donné car elle dépend du dispositif d'électrodes employé. La valeur de ρ_a n'a par conséquent aucune signification en soi (mesure relative). On peut lui donner un sens en la comparant à d'autres valeurs

- quantitativement: sondages électriques sur terrains tabulaires;
- qualitativement: cas des traînés électriques.

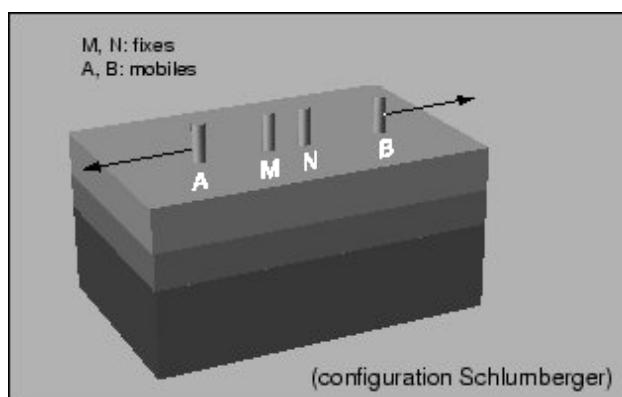


Figure .3: Illustration du principe de mise en oeuvre d'un sondage.

Lorsqu'on injecte un courant dans le sol, les filets de courant pénètrent à une profondeur théoriquement infinie. On a cependant démontré que pour une longueur de ligne AB constante, la densité de courant diminue avec la profondeur. Un corps produit une distorsion des lignes équipotentielles d'autant plus importante que la densité de courant est forte. Donc,

si le corps est profond, la ligne AB est grande. C'est le principe des sondages électriques: disposant d'un quadripôle $AMNB$, on fait varier la longueur AB en laissant le point O , centre de AB et de MN , fixe (figure .11). On peut alors tracer la courbe représentative de ρ_a en fonction de $L = AB/2$.

L'interprétation de ces courbes n'est pratiquement possible que si: (1) les résistivités des différentes couches sont bien contrastées; (2) les couches ont une extension verticale et horizontale assez importante; et (3) les terrains sont stratifiés horizontalement ou sub- horizontalement.

Au-dessus de terrain H ou A, ces courbes de sondages sont équivalentes si la *conductance longitudinale* (S ou $Cl = h/\rho$) reste la même (exprimée en $\text{ohm} \cdot \text{m}^{-1}$). Dans le cas des terrains de type K ou S, c'est la *résistance transversale* ($R = \rho^* h$) qui est importante (exprimée en $\text{ohm} \cdot \text{m}^2$).

4. L'exploration horizontale du sol: les traînés électriques

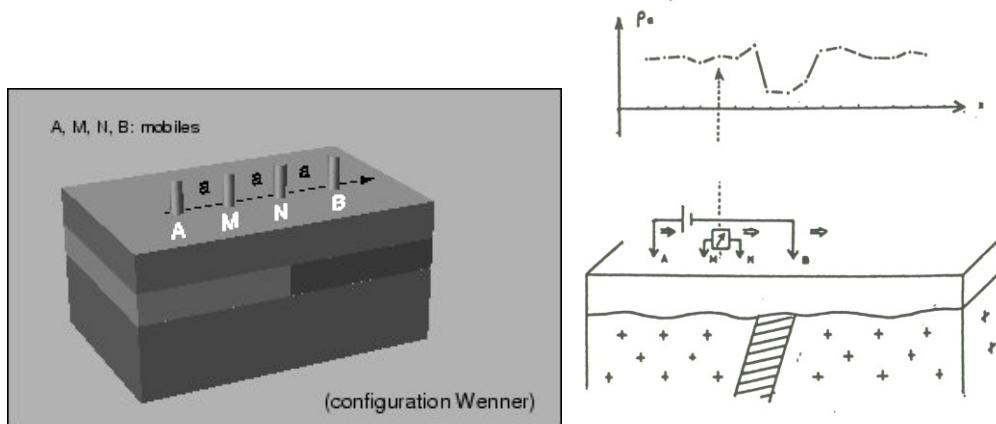


Figure .4: Illustration du principe de mise en œuvre d'un profil.

Il s'agit simplement de déplacer un quadripôle $AMNB$ de dimension fixe sur le site à explorer (figure .15). À chaque station, on fait une mesure de \mathbf{I} et de $\Delta\mathbf{V}$ qui permet de calculer ρ_a qu'on affecte au centre du dispositif.

Si les mesures se font sur une grande surface, on peut rapporter en plan les mesures et tracer des courbes d'équi-résistivité. Si les mesures se font sur une ligne, on établit un profil de résistivité. Si plusieurs séparations sont utilisées, on peut tracer des pseudo-sections (figure .16). On obtient ainsi une représentation *qualitative* de la variation de ρ_a latéralement et en profondeur. Ce n'est *pas* une vraie section géoélectrique. Entre le sondage et les traînés électriques, il existe des solutions moyennes:

- traînés avec plusieurs longueurs de lignes;
- traînés avec, de place en place, un sondage soigné.

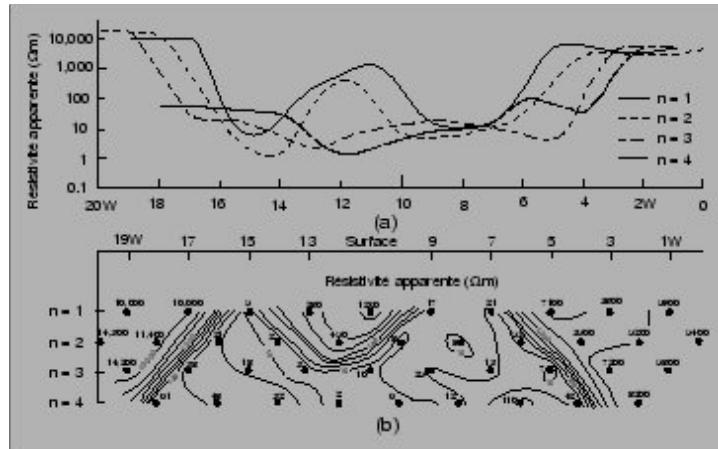


Figure. 5 : Construction d'une pseudo-section.

5. Les configurations d'électrode

Plusieurs configurations d'électrode ont été mises de l'avant. Elles permettent toutes de trouver la résistivité apparente du sous-sol à partir de mesures de ΔV et I . Toutes les configurations ne sont qu'une variation sur le thème du quadripôle $AMNB$ et l'expression de ρ_a pour chacune des configurations se dérive de l'équation de base (35).

Le choix d'un dispositif n'est souvent qu'une question de commodité du point de vue logistique et pratique (problèmes avec la topo, nombre de personnes requises, vitesse d'exécution, etc.). Les plus populaires sont:

- Dispositif Wenner

$$\rho_a = 2\delta a \mathbf{V}/\mathbf{I}$$

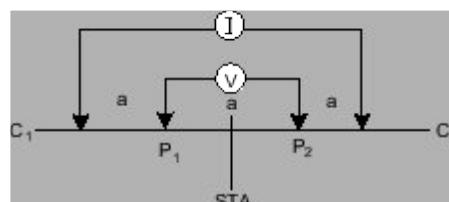


Figure. 6: Configuration de Wenner.

- Dispositif Schlumberger

$$L = AB/2 \text{ et } l = MN/2$$

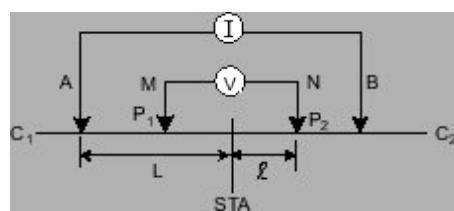


Figure.7 Configuration de Schlumberger.

En général, on utilise $L/2l > 1.5$ (jusqu'à 50, sous de bonnes conditions) et $\rho_a = \delta (L^2 - l^2)/2l * \mathbf{V}/\mathbf{I}$

Si $L/2l > 2.5$, $\rho_a = \delta L^2/2l * \mathbf{V}/\mathbf{I}$ est acceptable.

- Dispositif Dipôle - Dipôle

$$\rho_a = \delta a(n)(n+1)(n+2) * \mathbf{V}/\mathbf{I}$$

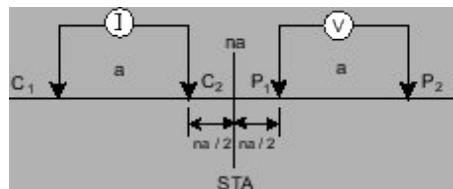


Figure .8:
Configuration
dipôle-dipôle.

Interprétation des données géophysiques

* **Interprétation qualitative.** Elle consiste à :

- décrire les anomalies constatées ;
- étudier la répartition des résistivités apparentes dans le sous-sol,
- donne des indications sur les grands traits de l'ensemble des structures géologiques.

Les conclusions ainsi obtenues permettront d'orienter les études de détail et ainsi fournir une interprétation pseudo quantitative, moyennant des hypothèses qui restent à vérifier.

PARTIE PRATIQUE.

Exemple : analyse des familles de sondages électriques par **WINSEV**; cartes de résistivités apparentes pour différentes longueurs de ligne d'envoi de courant AB correspondant à différentes tranches de terrain.

* **Interprétation quantitative.** Elle consiste à déterminer la profondeur des couches, leur épaisseur, les résistivités vraies, les anomalies; la géométrie des corps anomalies (épaisseur, forme, largeur..).

PARTIE PRATIQUE.

Exemple : Cartes thématiques en isopaches, isobathes, isohypsies, isorésistivités vraie, résistance transversale, conductance longitudinales. Coupes géoélectriques

transversales et longitudinales.

II. Prospection électrique pour la mise en évidence de l'agressivité des sols

1. Critères d'agressivité des sols

L'agressivité du sol est considérée comme la principale caractéristique qui contribue directement au processus de corrosion des structures enfouies.

Les facteurs déclenchant la corrosion des éléments enterrés (béton, acier, fer, cuivre, fonte....) :

- la nature du terrain (argiles, sables, marnes, ...) constitue un élément très important dans la corrosion
- les caractéristiques hydrogéologiques. (le taux d'humidité joue un rôle important sur le processus de corrosion par son incidence sur l'aération d'un sol et sur la résistivité du sol). Par ailleurs, les terrains aquifères présentent une corrosivité importante naturellement.
- le degré d'aération d'un sol indiqué par le potentiel Redox. Un faible potentiel Redox (faible oxygénation) caractérise des conditions propices à la corrosion bactérienne anaérobique.

En résumé, le caractère corrosif des sols est dépendant des paramètres suivants :

- perméabilité à l'air et à l'eau, qui dépend de leur porosité et de la granulométrie des sols ;
- taux d'humidité ;
- teneur en sels ;
- alcalinité ou acidité (pH) ;
- conductivité électrique ou résistivité.

Nous pouvons dire par exemple, qu'un sol acide, humide, peu aéré et dont la conductibilité est bonne (conductivité > 0.2 S/m (Siemens par mètre)) est très agressif.

L'étude de la résistivité du sol peut nous renseigner sur sa propriété d'électrolyte. Cette propriété pourra favoriser ou non le développement de mécanisme de corrosion. Nous pouvons évaluer la corrosivité du sol en fonction de sa résistivité.

Nous constatons par ailleurs que l'agressivité du sol diminue avec l'augmentation de la résistivité. Un sol résistant a un faible apport sur le processus de corrosion tandis qu'un sol de faible résistivité permet l'activation et la propagation rapide de la corrosion et, par conséquent, une apparition importante du nombre de bris sur les conduites du réseau.

La conduite en fonte ductile présente généralement une bonne résistance à la corrosion externe. Cependant, en présence des sols agressifs, les risques d'activité de corrosion sont élevés. À cet effet, la connaissance de la résistivité du sol entourant les conduites sert à estimer la corrosivité du sol, à déterminer les zones exposées à la corrosion et aussi à établir des plans d'intervention et de prévention en fonction des priorités.

2. Différents types d'agressivité

Tableau 1. Corrosivité du sol/fonte selon la résistivité électrique

Résistivité électrique du sol (en $\Omega \cdot \text{m}$)	Agressivité	Corrosion
$X \leq 2$	Très agressif	Corrosion certaine
$2 < X \leq 5$	Agressif	Corrosion possible
$5 < X \leq 10$	Faiblement agressif	Corrosion probable
$X > 10$	Non agressif	Pas de corrosion

Tableau 2. Corrosivité du sol/béton selon la résistivité électrique

Résistivité électrique du sol (en $\Omega \cdot m$)	Agressivité	Corrosion
$\mathbf{X} \leq 5$	Très agressif	Corrosion certaine
$5 \leq \mathbf{X} \leq 10$	Agressif	Corrosion possible
$10 \leq \mathbf{X} \leq 20$	Faiblement agressif	Corrosion probable
$\mathbf{X} \geq 20$	Non agressif	Pas de corrosion

Tableau 3. Corrosivité du sol/acier selon la résistivité électrique

Résistivité électrique du sol (en $\Omega \cdot m$)	Corrosion
$\mathbf{X} \leq 15$	Très corrosif
$15 \leq \mathbf{X} \leq 30$	Corrosif
$30 \leq \mathbf{X} \leq 50$	Moyennement corrosif
$50 \leq \mathbf{X} \leq 100$	Faiblement corrosif
$\mathbf{X} \geq 100$	Non corrosif

3. Mesure de la résistivité électrique

Les résistivités électriques peuvent être mesurées par un quadripôle d'électrodes type Wenner avec des distances AB de 3, 6, 9 et 12m et des distances MN de 1, 2 et 3m soit un espacement entre électrodes quelconques $a=1m, 2m, 3m$ et $4m$ correspondant à des profondeurs d'investigation respectivement de 1m, 2m, 3m et 4m

A partir des résultats de ces mesures, on a déterminé les résistivités moyennes relatives aux tranches des sols comprises entre 1m et 2m, entre 2m et 3m et entre 3 et 4m. Pour cela, on a utilisé les formules suivantes :



\mathbf{X}_1 : résistivité sur une profondeur de 1m. \mathbf{X}_2 : résistivité sur une profondeur de 2m.

\mathbf{X}_3 : résistivité sur une profondeur de 3m. \mathbf{X}_4 : résistivité sur une profondeur de 4m

\mathbf{X}_{1-2} : résistivité dans la tranche de terrain située entre 1m et 2m

\mathbf{X}_{2-3} : résistivité dans la tranche de terrain située entre 2m et 3m

\mathbf{X}_{3-4} : résistivité dans la tranche de terrain située entre 3m et 4m

PARTIE PRATIQUE

Traitement des données géoélectriques appliquées à l'étude de l'agressivité du sous-sol

III. Tomographie Électrique nouvelle génération : couplage desondages et traînés

Classiquement, afin de réaliser un panneau de tomographie de résistivité électrique, une série d'électrodes est implantée sur une ligne droite avec un espacement inter-électrodes constant.

De même que pour le sondage de résistivité électrique, en faisant appel à un quadripôle de mesure de plus en plus étiré, la profondeur d'investigation augmente. Cet allongement de la longueur du quadripôle associée à une translation latérale de celui-ci permet l'obtention d'une pseudo-section de résistivités électriques apparentes du sous-sol. La profondeur d'investigation maximale est atteinte lorsque le quadripôle se déploie sur la longueur maximale du dispositif installé.

A partir des pseudo-sections de résistivités apparentes, il est possible de calculer la matrice de sensibilité pour l'ensemble de la pseudo-section. Plus la valeur de sensibilité est grande, plus la valeur de résistivité du modèle obtenu après inversion sera fiable. La prise en compte de la sensibilité permet d'évaluer la fiabilité des résultats obtenus.

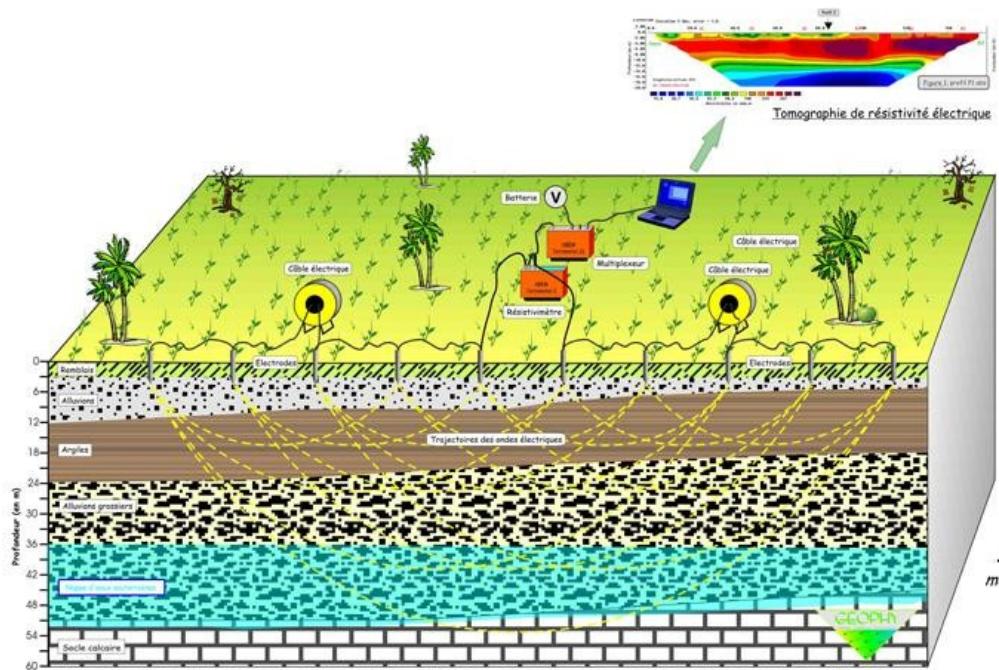


Fig. 1. Schéma de principe d'acquisition des mesures de résistivité électrique et de chargeabilité

		Numéro d'électrode																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Niveaux d'acquisition	-1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	-2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	-3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	-4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	-5	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	-6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	-7	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	-8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	-9	+																											

Fig. 2. Schéma des niveaux d'acquisition des mesures de résistivité électrique et de chargeabilité

La distance entre deux électrodes est notée a . En dispositif Wenner (Fig.2), la première mesure du fichier d'acquisition va se faire à l'aide des électrodes 1, 2, 3 et 4 ; les électrodes 1 et 4 serviront à l'injection du courant, les 2 et 3 à la mesure du potentiel. Tout le dispositif va ensuite se déplacer d'une distance « a ». Les électrodes 2 et 5 serviront alors d'injection du courant et les 3 et 4 de mesure du potentiel.

Le processus se répète jusqu'à l'électrode 28. On a donc, pour le premier niveau d'acquisition 24 possibilités (28-3). Comme la caractéristique du dispositif Wenner est de garder une distance constante entre toutes les électrodes, on va donc, pour le niveau suivant, prendre une distance égale à $2*a$. La première mesure du 2^{ème} niveau impliquera donc les électrodes 1 et 7 pour l'injection du courant et 3 et 5 pour la mesure du potentiel.

Le processus se répète à nouveau jusqu'à l'électrode 28. On effectue ainsi les mesures de chaque niveau d'acquisition (il en existe 9 pour 28 électrodes en Wenner). Il est évident que plus la distance inter-électrode augmente, plus le nombre de possibilités diminue.

Traitement des données

La phase de traitement comprend plusieurs étapes (fig.3) :

- Un premier processus de filtrage des données brutes récupérées du résistivimètre ;
- Exportation des données vers le Logiciel RES2DINV ;
- Inversion des résistivités par RES2DINV ;
- Présentation des résultats.

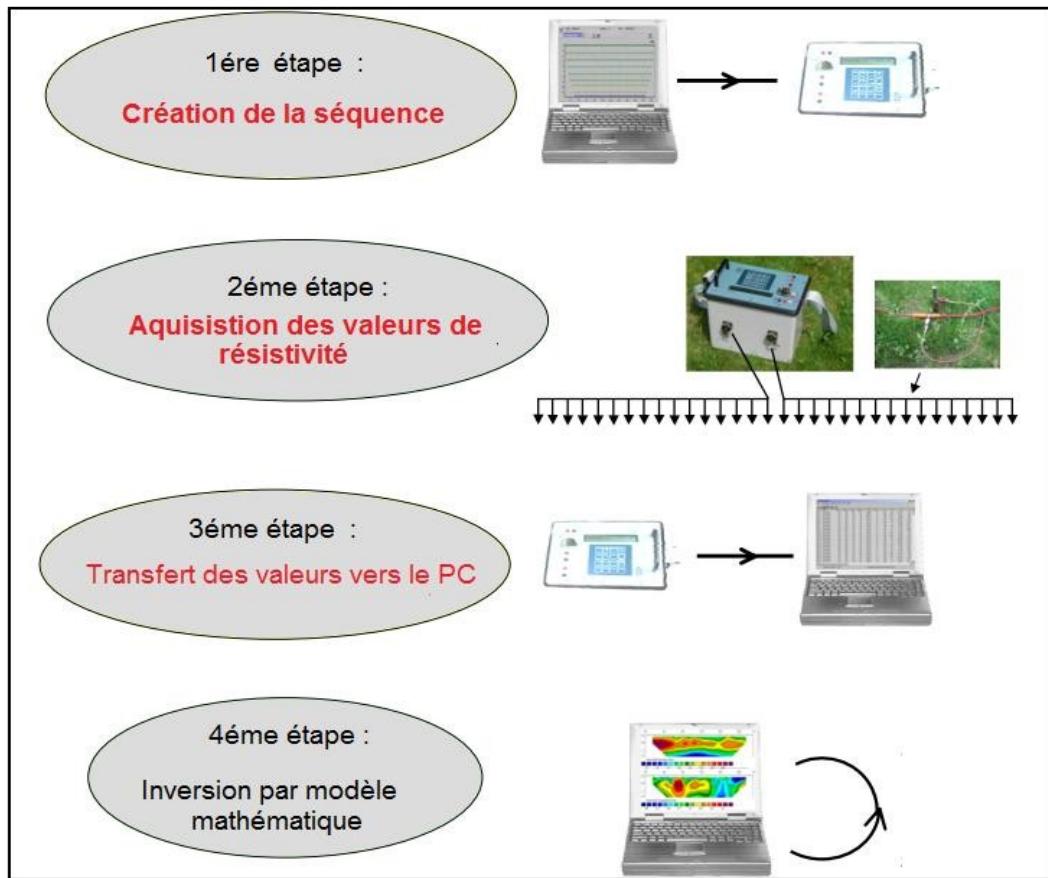


Figure .3. Les étapes de traitement

PARTIE PRATIQUE

- Application de la Géoélectrique au dégagement des ressources en eau. Exemple de cas dans le bassin de Saïss ;
- Application de la Géoélectrique à la détermination de l'agressivité des sols ;
- Application de la tomographie électrique au dégagement des ressources en eau : cas de l'aquifère alluvial de oued My Bouchta, région de Chaouen
- Application de la tomographie électrique à l'étude d'une carrière : cas de la carrière de calcaires du Lias, oued Beht

-

chapitre 3 CHAPITRE II EXPLORATION GEOPHYSIQUE GEOPHYSIQUE DE SURFACE

introduction

1. Introduction

Les essais géophysiques regroupent différentes méthodes mesurant les paramètres physiques des sols et des roches (vitesses de propagation d'ondes élastiques, densité, résistivité...). Les mesures peuvent se faire depuis la surface (au contact du sol ou de l'eau), dans l'air ou dans les forages. Traités, interprétés et combinés, les résultats de ces mesures permettent d'identifier la nature des sols et des roches et de leur contenu ainsi que la géométrie du sous-sol.

La géophysique est l'application des méthodes de la physique à l'étude de la terre; le mot *géophysique* a un caractère plus appliqué et localisé (Pétrole, Sciences de l'Ingénieur etc.) que le mot *physique du globe* où l'on s'intéresse à la terre dans son ensemble. Les méthodes utilisées sont très nombreuses; elles permettent une connaissance à distance de parties de la terre inaccessibles à l'observation directe. Certaines de ces méthodes sont mises en oeuvre par l'homme sous forme de

véritables expériences de physique à l'échelle de zones plus ou moins vastes de la terre; dans d'autres cas, on se contente de mesurer des champs physiques ou des effets non directement créés par l'homme. Ces méthodes ne donnent pas toujours des réponses uniques au sens mathématique: l'interprétation géophysique demande un dialogue constant avec les hypothèses géologiques. Enfin on remarquera que les campagnes de géophysique permettent d'acquérir un grand nombre d'informations et que d'importants domaines des mathématiques appliquées sont mis en oeuvre pour traiter les données.

On trouvera ci-après des fiches récapitulant les principales méthodes ainsi que des énoncés d'exercices discutés en classe; on donne à chaque fois le principe et les domaines d'application. On notera que l'auteur de ces feuilles n'est pas un praticien de la géophysique mais seulement un géologue intéressé par la physique.

A titre d'exemple :

Liste des sujets retenus pour l'année 2005 et annoncés pour la préparation de l'examen

gravimétrie: les différents termes de l'anomalie de Bouguer (influence de la latitude, de l'altitude, correction de plateau, de relief); calculs d'anomalies; ordres de grandeurs d'anomalies de l'échelle locale à l'échelle régionale; mise en oeuvre d'une campagne gravimétrique (influence de la dérive luni-solaire)

électricité: le quadripôle de Schlumberger: principe et mise en oeuvre théorique; résistivité des roches, influence de la teneur en eau

radar: principe; longueurs d'ondes, profondeur d'investigation, domaines d'application, mise en oeuvre de la méthode

sismique: les différents types d'onde; les différentes arrivées (onde directe, réfléchies, réfractées); interprétation de profils simples; ordres de grandeur des vitesses des ondes, domaines d'application, imagerie sismique, mise en oeuvre de la sismique réflexion

géothermie: petits calculs de flux de chaleur et anomalies thermiques; loi de diffusion de la chaleur, ordres de grandeur de paramètres thermiques (conductivité, diffusivité thermiques), flux de chaleur moyen, gradient géothermique moyen

magnétisme : les composantes du champ magnétique ; moment magnétique ; les propriétés magnétiques des matériaux ; exemples d'anomalies

Les méthodes géophysiques peuvent être classées en deux catégories : les méthodes actives utilisent une source artificielle, maîtrisée et contrôlée, qui génère son propre champ physique. Elles mettent en évidence les modifications de ce champ dans le sol (*Tab. 1.1*).

les méthodes passives utilisent une source naturelle ou artificielle qu'elles ne produisent pas elles-mêmes et observent les modifications du champ dans le sol (*Tab. 1.1*).

Méthodes Actives

Méthodes	Paramètre physique (unités)	Exemples de valeurs des paramètres	Paramètres environnementaux
Sismique	V_p ou V_s (m/s) : V_p est la vitesse des ondes de compression ; V_s est la vitesse des ondes de cisaillement (en mètre par seconde)	Terre Végétale : 250-350 m/s (V_p) 100-300 m/s (V_s) Sables hors nappe : 300-700 m/s (V_p) 100-400 m/s (V_s) Eau : 1 400-1 500 m/s (V_p) sans (V_s)	Les vitesses varient principalement avec la nature et le degré de consolidation des matériaux.
Électromagnétique basse fréquence	σ (S/m) : la conductivité (en siemens par mètre). C'est la capacité d'un matériau à laisser passer le courant électrique ($\sigma = 1/ \rho$). C'est l'inverse de la résistivité (m)	Argiles : 0,5-100 m Sables hors nappe : 10^3 - 10^6 m Sables saturés : 10 - 10^4 m Eau douce : 10^2 - 10^4 m Eau salée : 0,3 m	La conductivité augmente avec la teneur en argile, la teneur en eau ou la salinité. Les métaux sont très conducteurs. Les lixiviats de décharge sont généralement conducteurs.
Électromagnétique haute fréquence (radar)	ϵ_r (sans unité) : la permittivité diélectrique relative ($\epsilon_r =$ $V_{\text{radar}} = V_{\text{air}} / \sqrt{\epsilon_r}$	Argiles : 8 -12 Sables hors nappe : 4 - 6 Sables saturés : 30 Eau douce : 81 Eau salée : 77	$\epsilon_r = 1$ dans l'air, $\epsilon_r = 80$ dans l'eau, $4 < \epsilon_r < 9$ pour les roches. La vitesse de l'onde radar varie beaucoup avec la teneur en eau. Les ondes se réfléchissent sur les métaux mais sont absorbées par les argiles.
Électrique	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) : la résistivité (en ohm mètre). C'est la capacité d'un matériau à entraver le passage d'un courant électrique. C'est l'inverse de la conductivité ($\rho = 1/ \sigma$)	Cf Méthode électromagnétique basse fréquence	Cf Méthode électromagnétique basse fréquence



Méthodes Passives		
Méthodes	Observables (unités)	Paramètres environnementaux
Électrique	P.S. (V) : le potentiel spontané (en volt)	Mise en évidence de gradient de température, de concentration chimique, circulation d'eau souterraine, de front d'oxydo-réduction.
Magnétique	μ (nT) : le champ magnétique (en nanotesla), μ (nT/m) : le gradient magnétique (en nanotesla par mètre)	Fonction de la capacité d'un matériau à s'aimanter (susceptibilité magnétique) qui est élevée pour la plupart des matériaux ferromagnétiques.

Tableau 1.2 : Paramètres et observables associés aux méthodes passives.

Gravimétrie

Principe:

forces de gravité d'origine terrestre (loi de Newton)

$$f = Gmm'/r^2, G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ u. S.I.}$$

à extraire du champ de pesanteur (= gravité + force centrifuge + attraction luni-solaire)

modèles « a priori » comprenant diverses corrections définition d'anomalies (Air Libre, Bouguer ; voir exercices)

Appareils, unités mesurées, ordres de grandeur:

gravimètre (allongement d'un ressort); au sol, aéroporté, satellite mesure de g :

$$\text{m/s}^2, \text{gal} = \text{cm/s}^2$$

valeur moyenne $g = 981 \text{ gal}$

On mesure couramment le milligal; on atteint des précisions relatives de 10^{-7} à 10^{-9} sur la mesure de g

Paramètres terrestres auxquels on a accès

distribution des densités ou masses volumiques en profondeur
roches de la croûte: 1.6 à 3.2

jusqu'à 12 (ensemble de la terre: 5.51)

on peut en déduire les pressions (3639 kb au centre de la terre)
méthode intégrante

Domaines d'application

génie civil (cavités)

archéologie

géologie structurale (les grands ensembles géologiques de la croûte dans un secteur donné)

physique du globe, isostasie (croûte, manteau)

ballistique (fusées)

Gravimétrie : les différents termes intervenant dans la pesanteur et leurs ordres de grandeurs

0. Quelles sont les différentes forces qui s'exercent sur une particule liée à la terre ?
1. Donner un ordre de grandeur de l'attraction de la lune lorsqu'elle est au dessus de notre tête ?
2. Calculer le Δg créé par une cavité de dissolution karstique dans du gypse, que l'on assimilera à une sphère de 10 m de diamètre, dont le centre est situé à 15 m sous la surface. Quelle variation relative cela représente-t-il pour g ?
3. Quel est le rayon d'une cavité dont le centre est trois fois plus profond et qui provoque la même anomalie pour le g en surface ?
4. Donner l'expression de l'accélération axifuge en fonction de la latitude φ . Calcul à l'équateur. Quelle variation entre l'équateur et le pôle ? Calculer le Δg (projété sur la partie gravifique newtonienne, à justifier) pour 10 km de déplacement Nord-Sud, à $\varphi = 45^\circ$.
5. Quel est le gradient moyen de g au sol ? (« gradient à l'air libre »).
6. Application ; calcul de Δg entre la base et le sommet du Mont-Blanc, en gardant l'approximation linéaire.
7. Qu'a-t-on oublié ? Calculer l'attraction exercée par une couche plane infinie d'épaisseur h et de contraste de densité $\Delta \rho$? Application : pour une masse volumique de $2.7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ (contraste avec l'air) et une épaisseur de 1000 m. C'est ce qu'on appelle la correction de plateau.
8. Correction de terrain : montrer que les irrégularités par rapport au plateau horizontal (vallées et reliefs par rapport au plateau) ont une influence de même signe sur la composante verticale de la pesanteur.
9. Comparer les différents ordres de grandeurs des termes calculés dans les questions précédentes.
10. Comment définir une anomalie qui tienne compte des différents facteurs passés en revue ci-dessus ?
11. Anomalie de Bouguer et anomalie à l'air libre. Pourquoi, dans l'hypothèse de l'isostasie l'anomalie à l'air libre est-elle plus proche des mesures effectuées ?

Ordres de grandeur des différents facteurs intervenant dans la valeur de la pesanteur et de quelques anomalies

Cause de l'anomalie	Ordre de grandeur
Pesanteur, résultante de différentes causes Valeur moyenne	$9,81 \text{ m/s}^2 = 981 \text{ cm/s}^2 = 981 \text{ gal}$
Anomalie créée par une cavité de gypse	$10^{-4} \text{ à } 10^{-5} \text{ gal}$ Dizième à centième de milligal
Différence entre le pôle et l'équateur	5 gal
Correction pour un déplacement Nord-Sud de 10 kilomètres à la latitude de 45°	5 milligal
Attraction par la lune	1,6 milligal
Gradient moyen au sol	- 0,3086 milligal / m
Différence pour 10 m d'altitude	3 milligal
Différence pour 4000 m d'altitude	De l'ordre du gal
Correction de plateau pour 1000 m d'épaisseur	100 milligal
Correction topographique	0.5 milligal à 2 milligals
Anomalies locales et régionales	Quelques milligals à quelques dizaines de milligals (en + ou en -)
Anomalies à l'échelle de grands ensembles continentaux	Quelques dizaines à 200 à 300 milligals (en + ou en -)

Exercices de Gravimétrie :

Les différents facteurs intervenant dans la pesanteur

1. Facteurs intervenant dans la pesanteur

On rappelle la loi de l'attraction universelle entre deux masses m et m' ponctuelles situées à la distance d l'une de l'autre:

$$f_n = k \frac{mm'}{d^2}$$

(indice n comme Newton) où k est la constante de l'attraction universelle: $k = 6.67 \cdot 10^{-11}$ S.I.

Dans la notion de pesanteur, nous incluons l'ensemble des forces qui agissent sur une masse située à la surface de la terre, et qui définissent notamment la direction du fil à plomb. La mesure précise de l'accélération de la pesanteur correspondant à $f_p = mg$ fournit un bon moyen d'avoir des informations sur la densité des roches de la terre, à condition d'éliminer l'influence des autres facteurs. A votre avis, quels sont les facteurs non liés aux masses terrestres? Calculer leurs ordres de grandeur respectifs.

2. Anomalies de Bouguer et à l'Air Libre

Nous allons dans ce qui suit définir des anomalies par rapport à des valeurs théoriques de g . Lorsque g est mesuré en altitude, nous devons tenir compte de celle-ci (section b); dans la section a, nous tiendrons compte des terrains situés au dessus du niveau de la mer.

a) Correction de plateau

Evaluer l'attraction exercée par une couche de terrain horizontale indéfinie d'épaisseur h et de densité ρ en un point de sa surface. Quelles hypothèses de validité impose le caractère infini de la tranche considérée?

b) Correction d'altitude

Calculer la valeur Δg de cette correction, où $\Delta g = g - g_0$, appelée correction à l'air libre, en milligal par mètre. Par exemple pour une valeur locale $g = 982.6$ gal. On prendra $R = 6368 \cdot 10^3$ m (rayon terrestre).

c) En tenant compte des facteurs calculés en a) et b), on définit une anomalie, en faisant intervenir la valeur g_0 supposée connue sur la surface de l'ellipsoïde de référence, c'est à dire au niveau de la mer au point correspondant au point de mesure, et g_m la valeur de la pesanteur mesurée à l'altitude h (on supposera dans ce qui suit que les corrections relatives aux termes non gravitatifs ou d'origine externe à la terre dans la pesanteur ont été faites); cette anomalie s'écrit:

$$B = g_m - (g_0 - \Delta g) = g_m + \Delta g - g_0$$

Le terme Δg correspond à celui calculé en 2a (correction dite de Plateau). Δg et Δg ont des signes contraires (usage).

d) En cas de relief accidenté, il s'ajoute une correction topographique. Montrer que cette dernière correction est de signe constant.

e) En mer, pour que les valeurs de g soient représentatives de la nature du substratum, il faut de la même manière, si l'on connaît la profondeur h du fond marin, effectuer une correction qui annule l'effet gravitatif de la tranche d'eau. Evaluer cette correction en supposant que le fond

marin est plat, ce qui est pratiquement toujours réalisé. Densité de l'eau de mer: $\mathbf{x}_w = 1.03$. Cette correction est faite par rapport à la densité choisie en 2a.

f) L'anomalie de Bouguer complète se définit donc par:

$$B = g_m + \gamma h + \rho h + T - \mathbf{g}_0$$

avec ∇h correction à l'air libre

δh correction de Bouguer

T correction topographique éventuelle tenant compte de l'inégalité du relief

\square_0 valeur théorique de g au point correspondant de l'ellipsoïde de référence (niveau de la mer).

Donner son expression numérique en fonction de l'altitude et de la densité des terrains superficiels χ_c dans le domaine continental, en fonction en plus de la profondeur h du fond océanique dans le cas de mesures en mer (T et \square_0 seront laissés sous forme paramétrique). Que représente en définitive l'anomalie B ?

On remarque en général que les montagnes sont sur-corrigées et l'on est conduit à proposer une autre anomalie, à l'échelle continentale, où δh et T ne figurent pas, l'Anomalie à l'air libre:

$$g_{\text{GAL}} = g_m + \nabla h - \square_0$$

Exercice de Gravimétrie : l'isostasie

1. Mise en évidence de l'isostasie

L'étude topographique du bouclier scandinave a montré que cette région subit un rehaussement constant de l'ordre du centimètre par an. Cette observation s'explique sans difficulté si l'on conçoit que l'asthénosphère, milieu dans lequel on observe une diminution de la vitesse des ondes S, se comporte comme un liquide sur lequel flotterait la lithosphère, telle un radeau sur la mer. Ce phénomène s'appelle isostasie. Le rehaussement de la Scandinavie est lié au fait que cette région a été récemment soulagée d'un poids important par fonte de l'immense glacier (inlandsis) qui la recouvriraient entièrement il y a quelques dizaines de milliers d'années. Le rehaussement n'est pas instantané en raison de la viscosité de l'asthénosphère.

Premières applications

a) Les résultats bathymétriques et géophysiques montrent que l'Océan Pacifique à l'Est du Japon a la structure représentée sur la Figure 1A. Par ailleurs en Mandchourie, au vu des résultats géophysiques, la structure de la lithosphère est celle représentée sur la Figure 1B. En négligeant les variations topographiques mineures ainsi que les phénomènes liés à l'élasticité de la lithosphère à grande échelle, calculer quelle doit être l'altitude moyenne de cette dernière région si l'équilibre isostatique est réalisé.

b) L'isostasie peut-elle expliquer la répartition des eaux à la surface de la terre?

2. Anomalie à l'air libre et isostasie

Démontrer que 2 blocs en équilibre isostatique, par exemple un bloc continental et un bloc océanique, présentent une même anomalie à l'air libre. On pourra raisonner à partir de la figure 2.

3.. Equilibre isostatique du Japon, des boucliers canadien et scandinave

Dans le cas du Japon on a très grossièrement les résultats suivants (de l'Ouest à l'Est on distingue les zones: Mer du Japon, îles, fosse, Océan Pacifique):

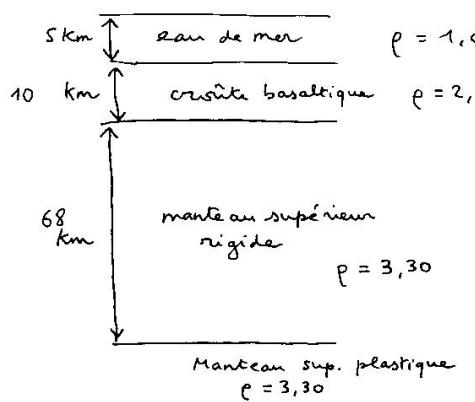
anomalie à l'air libre: nulle à l'Ouest, positive au niveau du Japon (+ 50 mgal) et négative à l'Est: - 100 mgal; redévient nulle encore plus à l'Est

anomalie de Bouguer: positive faible à l'Ouest (+ 20 + 50 mgal); faible à légèrement positive sur le Japon, positive à l'Est (+ 100 mgal)

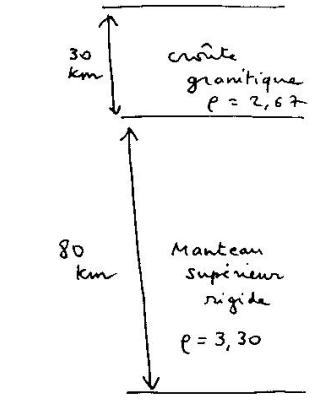
bathymétrie: mer peu profonde à l'Ouest, relief de 800 à 1000 m en moyenne sur le Japon, mer profonde (fosse) à l'Est devenant moins profonde encore plus à l'Est

Dans le cas du Canada et de la Scandinavie on indique simplement que l'anomalie à l'air libre est négative modérée de l'ordre de - 20 à - 40 mgal pour le Canada, et de -20 à -30 mgal pour la Scandinavie.

Que peut-on en déduire quant à l'équilibre isostatique et à la nature de la croûte présente dans les différentes zones du Japon; la tectonique des plaques permet-elle d'expliquer ces résultats? Et de même quant à l'équilibre isostatique des boucliers canadien et scandinave?



Structure de
l'Océan Pacifique



Structure de la Manchourie

Figure 1A

Figure 1B

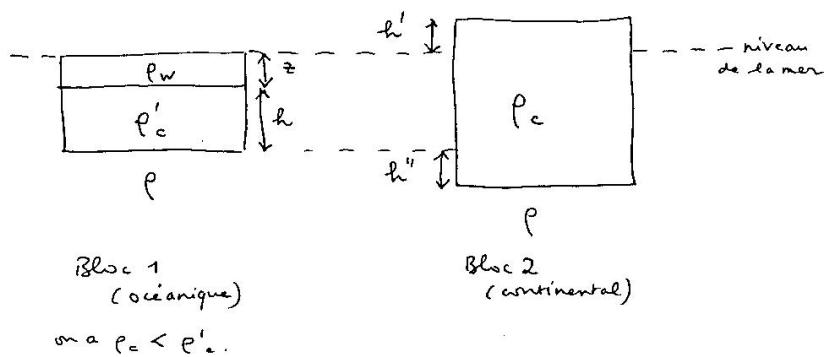
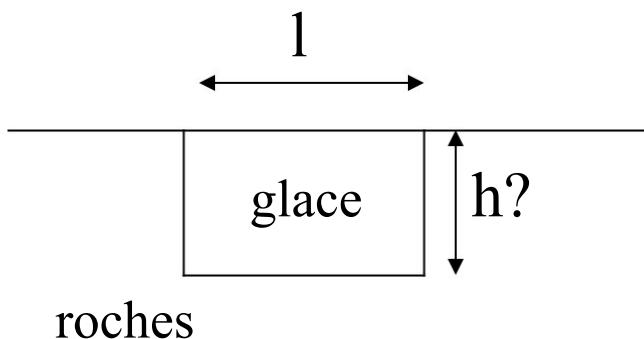


Figure 2

Exercice de gravimétrie

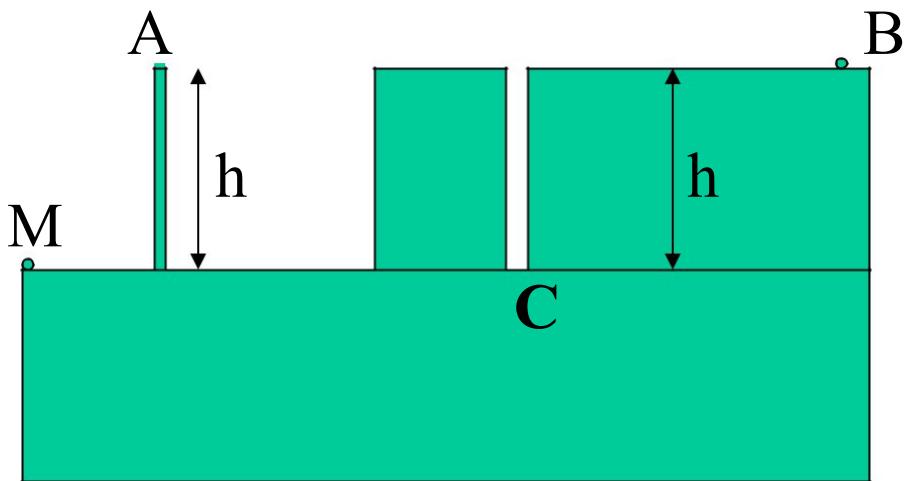
Indiquez comment discuter, à l'aide d'une campagne de gravimétrie, de la profondeur h d'une langue glaciaire de largeur l (par exemple la Mer de glace dans le massif du Mont-Blanc). On pourra considérer que le glacier est un prisme de glace (densité 0.9) de longueur indéfinie inséré dans les roches (densité 2.7) selon le schéma donné ci-dessous en coupe. Donner l'expression de l'anomalie en O au centre du glacier par une intégrale. Donner un ordre de grandeur grossier de l'anomalie attendue en O pour un glacier de largeur $l = 500\text{m}$ et de profondeur $h = 200\text{ m}$, moyennant des approximations que l'on pourra indiquer.

Durée estimée pour l'exercice : une demi-heure



Exercice de gravimétrie (durée 30 minutes)

On se rapportera à la figure ci-dessous



Par rapport à une station située en M, quelles seront les différences de pesanteur aux points suivants :

- a) A (sur une tour sans masse de hauteur h)
- b) B sur un plateau de hauteur h, loin du rebord
- c) C au fond d'un puits situé loin du rebord du plateau

On prendra $h = 80 \text{ m}$ et une masse volumique de 2500 kg.m^{-3}

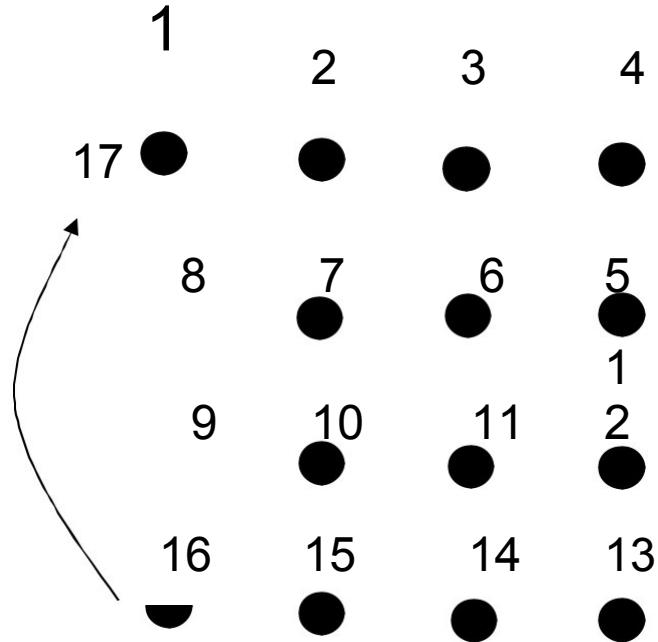
En déduire les différences de pesanteur entre deux points situés à la tête et au fond d'un puits.

Les gravimètres de puits sont utilisés pour réaliser des profils verticaux de la densité, expliquer comment à l'aide du résultat précédent.

Exercice : campagne gravimétrique

Une campagne de mesures gravimétriques est entreprise en vue de détecter la présence de cavités de dissolution dans une formation de gypse.

Dix-sept mesures sont effectuées en seize points géographiques numérotés de 1 à 16 ; pour la dernière mesure on revient au point de départ n°1. Dans une campagne réelle, les points sont en général choisis pour leur commodité d'accès. Pour simplifier le dessin, nous envisageons ici des points répartis régulièrement comme sur la figure (mais cela ne change pas le raisonnement).



Les mesures sont faites de façon brute, c'est-à-dire sans correction de la dérive luni-solaire, pendant une durée T , comptée entre l'instant de la mesure n°1 et celui de la mesure n° 17.

Question : produisez un jeu de données vraisemblable pour cette campagne (valeur de g en chaque point), c'est-à-dire, présentant une dérive luni-solaire vraisemblable, et devant produire, après correction de la dérive luni-solaire, une anomalie elle aussi vraisemblable pour une cavité de gypse. Donnez les deux jeux de valeurs.

Indications : vous choisirez un intervalle de temps T (1h à 2h), une échelle d'espace (distance entre les points d'une dizaine de mètres). Vous pourrez faire en sorte que l'anomalie négative que vous ferez apparaître sera définie par des contours plus ou moins circulaires et centrée sur une cavité en profondeur dont vous choisirez la taille et la profondeur (valeurs de g aux points 7, 6, 10 et 11 les plus basses ; celles des points 2, 3, 5, 12, 14, 15, 9, 8, un peu moins basses ; celles des points 1, 4, 13, 16 les plus hautes ; on pourra les prendre à zéro milligal après correction luni-solaire et définir les autres valeurs de façon relative à ce niveau). Discuter la façon de corriger la dérive luni-solaire, discuter la vraisemblance géologique de la cavité choisie.

I. LES MÉTHODES ÉLECTRIQUES : TECHNIQUES DE PROSPECTION

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.

Sous le terme résistivité ou prospection électrique en courant contenu ou très basse fréquence, nous pouvons utiliser :

1. Les cartes de potentiel
2. La mise à la masse
3. Le traîné électrique
4. Le sondage électrique
5. Les panneaux électriques au sol (ou pseudo-sections)
6. 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..

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.

Base physiques

La prospection électrique est l'une des plus anciennes méthodes de prospection géophysique. Sa mise en œuvre est relativement simple.

On injecte du courant continu (en fait il s'agit souvent de créneaux) au moyen de deux électrodes dites *d'injection* et on mesure la différence de potentiel en résultant avec deux électrodes dites *de mesure*. Celle-ci dépend de la résistance électrique du sous-sol.

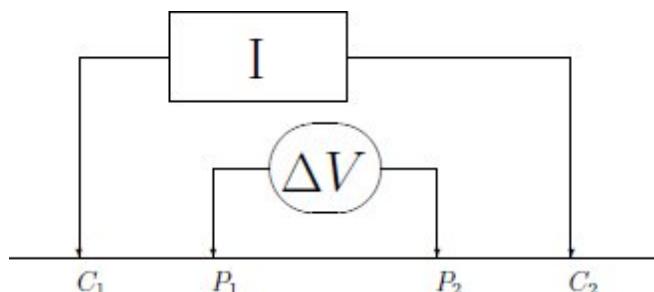


Figure. II.1 Schéma de la configuration d'un dispositif électrique. $C1$ et $C2$ sont les électrodes d'injection (de courant) et $P1$ et $P2$ les électrodes de mesure (de potentiel).

Les filets de courant et les équipotentielles

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 homogène 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 représentée par des demi-sphères centrées sur A et perpendiculaire aux filets de courant :

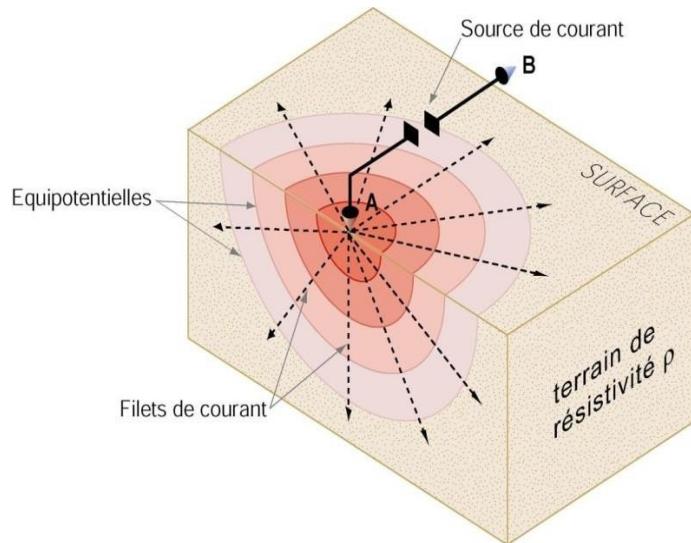


Figure II.2 : Représentation des équipotentielles et des filets de courant pour une source unique

Potentiel et champ électrique entre A et B pour un terrain homogène

Dans un milieu homogène isotrope le potentiel V dû à une source ponctuelle décroît proportionnellement à la distance r , et est d'autre part proportionnel à l'intensité I du courant envoyé et à la résistivité ρ du milieu :

Avec V : le potentiel mesuré en surface en Volts, I : l'intensité du courant injecté en Ampères et

r : la distance séparant le point où on mesure le potentiel de l'électrode de courant, en mètres.

Répartition du potentiel - Principe de superposition

En fait, dans la pratique, il existe deux électrodes d'émission de courant **A** et **B** afin de fermer le circuit électrique. Le courant envoyé par **A** (source) sera recueilli par **B** (puits), 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**.

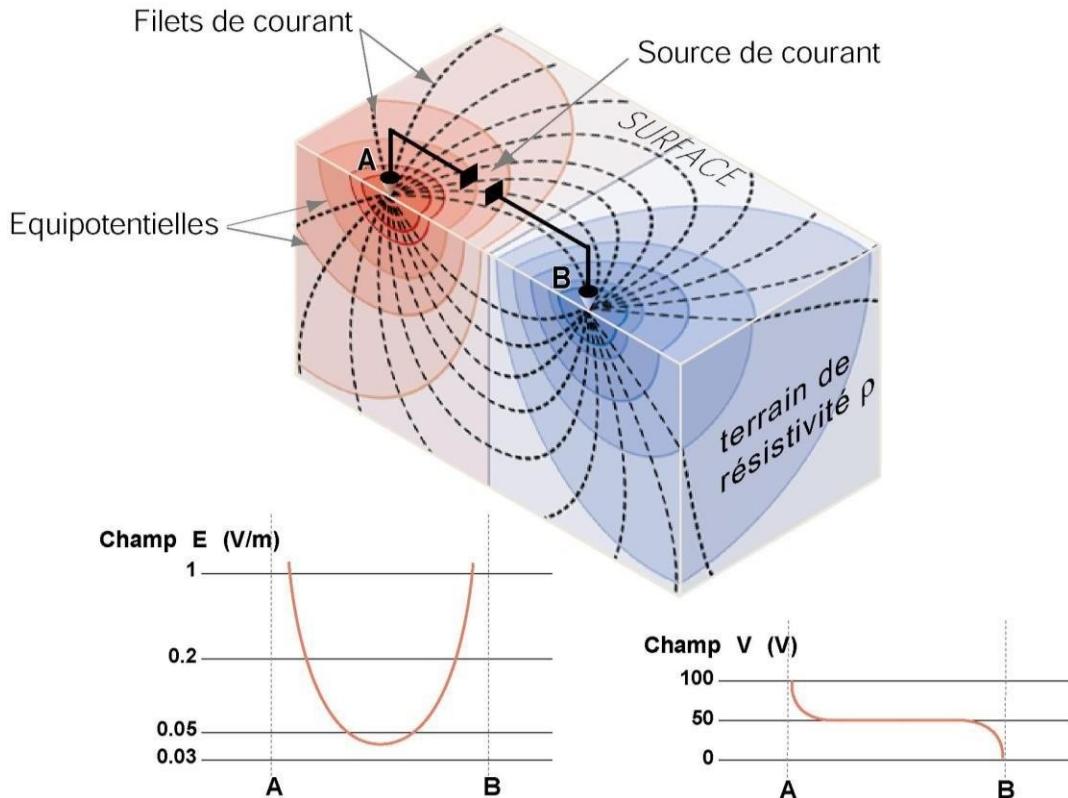


Figure II.3 : Représentation des équipotentielles et des filets de courant pour deux source.

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 $V = VA + VB$ pour deux pôles d'envoi de courant ($+I$ par **A** et $-I$ par **B**) :

$$(\leftarrow \quad \text{---} \quad \text{---} \rightarrow)$$

avec **AM** et **BM** : les distances séparant **M** des électrodes **A** et **B**.

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 électrodes **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 électrode de courant.

Si l'on considère sur la ligne **AB** l'évolution du potentiel V , on obtient la courbe représentée sur la figure ci-dessus. Cette figure montre que le champ V est sensiblement uniforme 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**. Cette résistance est appelée la

« Résistance de contact ».

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 la différence de potentiel à cet endroit, au moyen de deux électrodes de mesure de potentiel, comme nous le verrons plus loin.

D'autre part, lorsque la résistance de contact est très importante, il passe peu de courant dans le sous-sol et la mesure est ainsi rendue difficile. 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.)

Répartition du courant

Au milieu des électrodes A et B et pour un sous-sol homogène, la quantité de courant passant sous une certaine profondeur z vaut :

$$(-) \qquad (—)$$

Cette pénétration du courant est illustrée par la figure suivante :

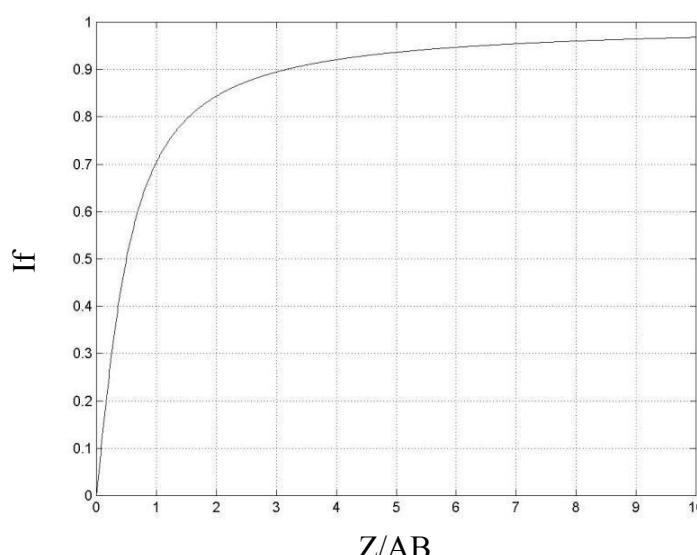


Figure II.4 : Relation entre densité de courant et la profondeur d'investigation d'un courant électrique

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 résultats 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.

Potentiel et champ électrique pour un 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. Nous allons apprécier ici ce problème de manière plus qualitative. Dans le cas d'un sous-sol hétérogène, il est en effet difficile d'obtenir des équations simples décrivant le comportement du champ électrique et des techniques numériques avancées (différences finies, éléments finis) devront être utilisées.

Commençons tout d'abord par donner une image de la répartition du courant électrique (ou du champ électrique) dans un terrain homogène entre deux électrodes A et B (cette situation est similaire à celle décrite ci-dessus). L'exemple géologique utilisé pour la modélisation est un niveau de grès de résistivité 120 Ohm.m.

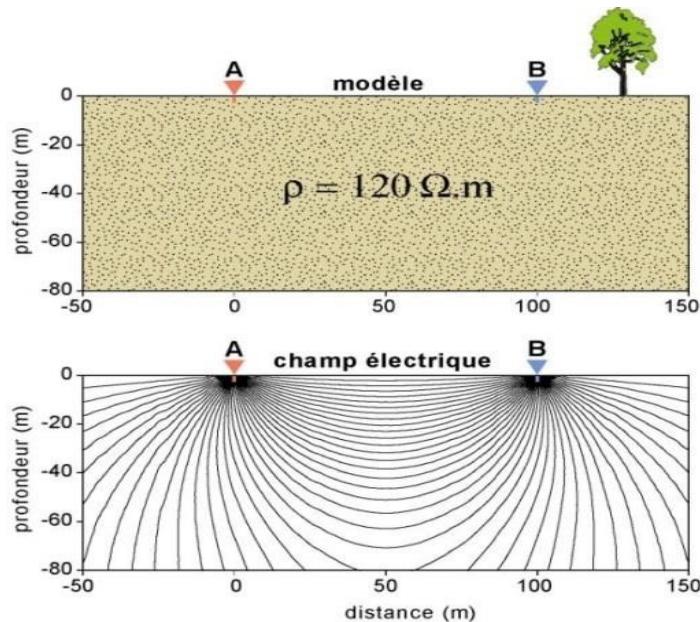


Figure II. 5 : Modèle géologique utilisé pour la modélisation est un niveau de grès de résistivité 120 Ohm.m

Pour un sous-sol hétérogène, plusieurs situations peuvent être envisagées :

II.2.3. 3 Modèle à deux terrains avec

L'exemple géologique utilisé pour la modélisation montre (ci-dessous à gauche) : un terrain supérieur marneux de résistivité 30 Ohm.m

un niveau inférieur gréseux de résistivité 200 Ohm.M

Modèle à deux terrains avec

L'exemple géologique utilisé pour la modélisation montre (ci-dessous à droite) : un niveau supérieur de graviers sableux de résistivité 200 Ohm.m
un niveau inférieur gréso-marneux de résistivité 30 Ohm.m

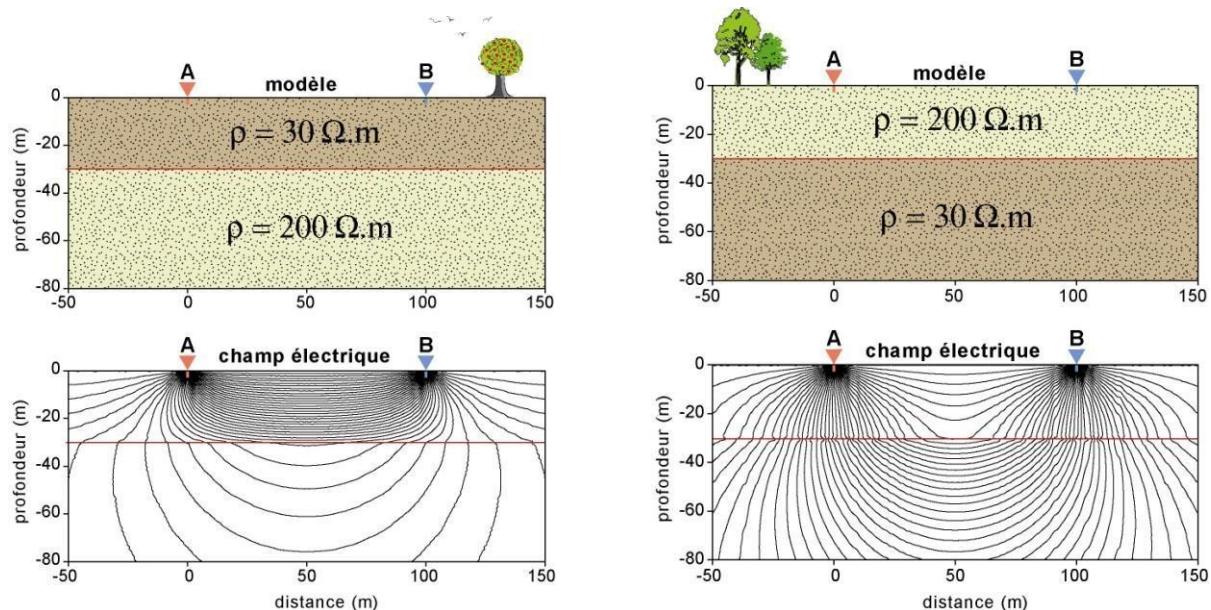


Figure II.6 : Modèles géologiques à deux terrains

Modèle de fossé résistant

L'exemple archéologique utilisé pour la modélisation montre trois terrains (notez la répartition plus complexe des filets de courant) :

- ✚ un niveau supérieur de moraine de résistivité 60 Ohm.m
- ✚ un niveau inférieur gréso-marneux de résistivité 30 Ohm.m
- ✚ un ancien fossé rempli de graviers de résistivité 400 Ohm.m

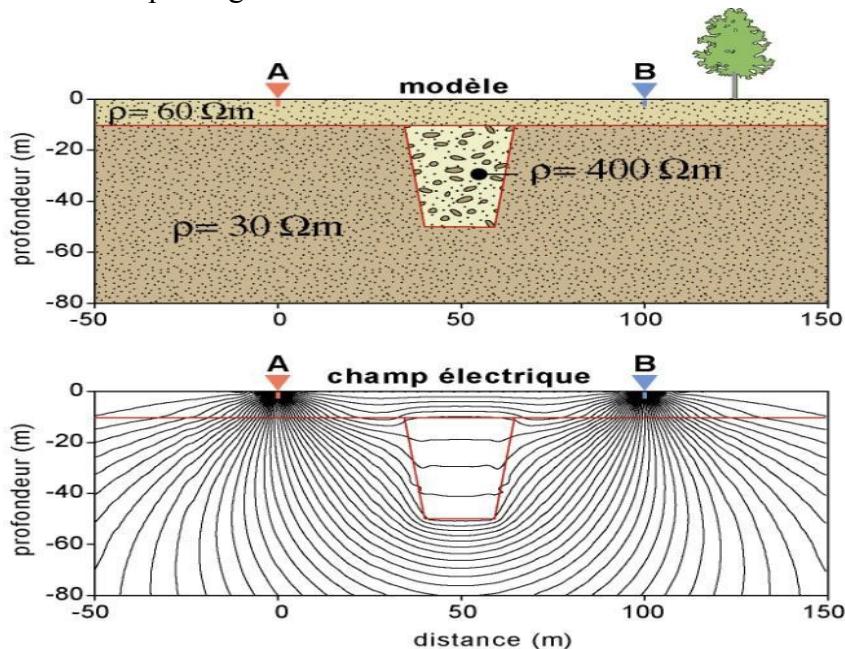
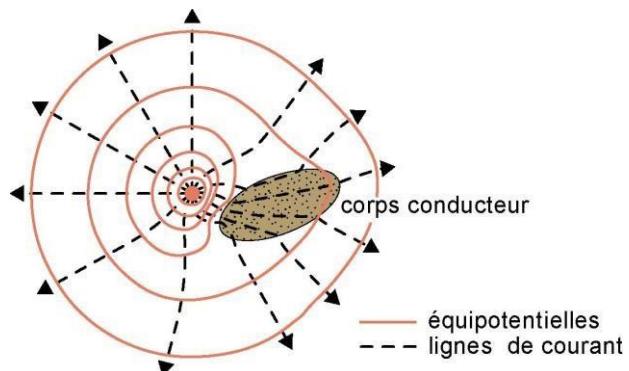


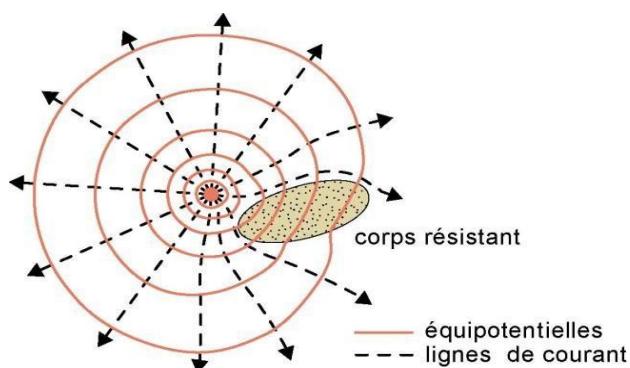
Figure II.7: Modèle géologique de fossé résistant

Hétérogénéités locales en plan

Lorsqu'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 seront repoussées par le conducteur. Voici cette situation sous forme de cartes vue en plan (en surface) et autour d'une source de courant unique positive :



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 :



On remarque donc dans les exemples ci-dessus que le courant se concentre de préférence dans les unités conductrices et « évite » les unités plus résistantes. Cette répartition variable du courant crée également des asymétries dans le champ de potentiel (dans les équipotentielles). En mesurant ce champ de potentiel, nous pourrons alors obtenir des informations sur les structures enfouies dans le sous-sol, définir leurs localisations ainsi que leurs propriétés physiques et par là donner des indices pour une interprétation archéologique.

Influence du relief

La topographie perturbe 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 (même si dans cet exemple le sous-sol est homogène !). Notez que les

équipotentielles sont perpendiculaires à la surface. Cet effet peut devenir gênant dans les régions montagneuses. Il dépend aussi du contraste des résistivités dans un terrain hétérogène, lorsque le terrain superficiel conducteur repose sur un substratum très résistant, la presque totalité des filets de courant se trouve concentrée dans le conducteur et les moindres dénivellations auront alors un effet important. Il est donc nécessaire de tenir compte de la topographie dans l’interprétation des résultats.

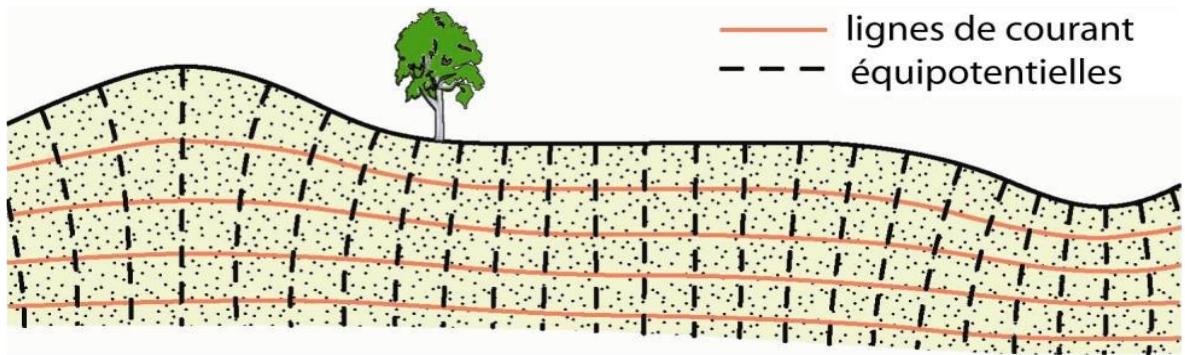


Figure II.8 : Modèle représentant l'influence du relief sur les mesures de résistivité

Technique de mesure

Le quadripôle de mesure

Nous avons vu plus haut que la mesure de la résistance entre deux prises conduit à une impasse (on ne mesure alors que la résistance de contact). Il est donc nécessaire de séparer le circuit d'injection du circuit de mesure. On utilise pour cela quatre électrodes AMNB dans la pratique. Si l'on ferme un circuit d'intensité I à l'aide de deux électrodes A et B, on peut mesurer la différence de potentiel

créé par le passage du courant entre deux électrodes M et N. Comme nous l'avons vu, on doit mesurer ce dans le tiers central du dispositif (sauf exception) afin de mesurer l'effet des structures profondes et non de l'environnement direct des électrodes.

Un circuit complet de mesure se compose alors de :

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.

Les électrodes d'émission A et B

Ces électrodes sont généralement constituées par des piquets d'acier inox.

La mesure du courant I : est effectuée à l'aide d'un ampèremètre.

Le circuit de courant

Ce sont des câbles en acier isolés.

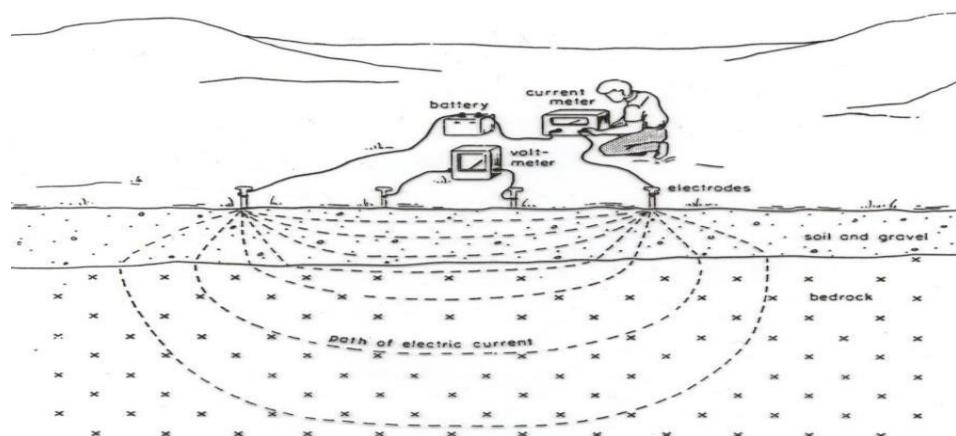


Figure II.9 : Schéma simplifier de la mise en œuvre sur terrain

Les électrodes de mesure de potentiel M et N

Si 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 efficacement possible le phénomène de polarisation des électrodes, on choisit 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, mais le plus souvent on compense ce potentiel parasite à l'aide d'une petite source de tension auxiliaire ajustable ou en répétant les mesures en inversant la polarité de A et B.

La mesure de la différence de potentiel ΔV

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 remédié 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 (bruit) 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.

Principe de réciprocité

Le principe de réciprocité dit que 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.

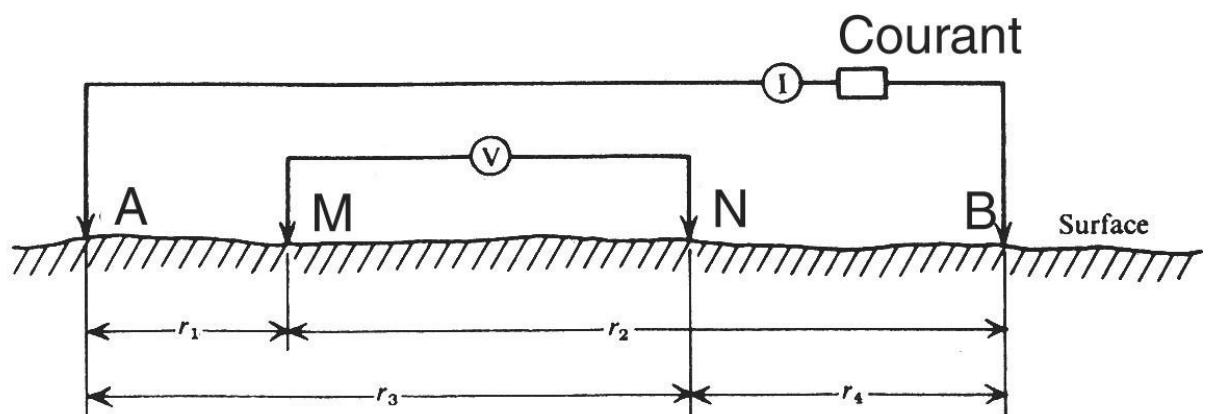


Figure II.10 : Dimensionnement du quadriopole de mesure de resistivité

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.

Le calcul de la résistivité et résistivité apparente

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

potentiel en M

$$\overline{U} = \frac{V}{I}$$

Potentiel en N

$$\overline{U} = \frac{V}{I}$$

entre M et N

$$\overline{U} = \frac{V}{I}$$

Et

$$\overline{U} = \frac{V}{I}$$

ΔV en millivolts, I en milliampères, en ohm.m, K en mètres qui est le facteur géométrique dépendant 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 (résistivité vraies) et de la géométrie du dispositif utilisé.

Première technique de prospection électrique: Cartes et Profils de résistivités apparentes

Principe

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 résistivités apparentes. Comme on « traîne » un câble sur le terrain, on parle aussi de traîner électrique.

Une carte de résistivité apparente dessinée à partir de plusieurs profils est une carte des anomalies relatives qui se rapporte à une longueur et à une orientation sensiblement constante de tout le dispositif de mesure. En effet, à une longueur de ligne déterminée de AMNB correspond une profondeur d'investigation à peu près constante, donc à l'étude

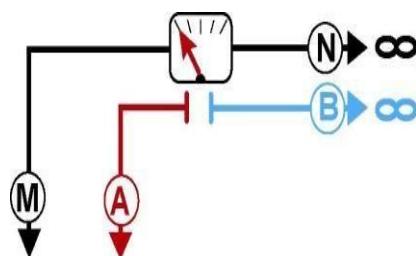
d'une tranche de terrain d'épaisseur et de largeur déterminées. On sera sensibles à des variations horizontales de la résistivité. Les dimensions du dispositif seront donc choisies en fonction du problème à traiter. Il est souvent nécessaire de dresser des cartes avec plusieurs longueurs de ligne pour pouvoir interpréter correctement les résultats.

Quelques dispositifs

Pour l'établissement d'une carte de résistivité apparente 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).

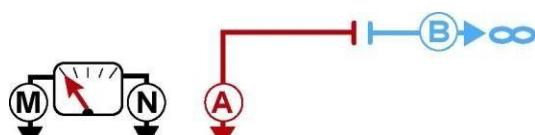
A. | Les dipôles ou pôle - pôle

Les électrodes B et N sont placées à « l'infini » (en théorie), 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 » (en réalité très loin du site de mesure, car on a toujours besoin de quatre électrodes pour fermer le circuit).



B. | Les tripôles ou pôle-dipôle

Les tripôles présentent l'intérêt de n'exiger que le déplacement de trois électrodes et moins de longueur de câble ce qui peut présenter parfois un certain avantage, cependant leur caractère dissymétrique

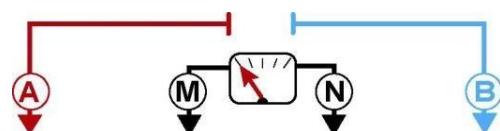


Leur fait en général préférer les quadripôles complets.

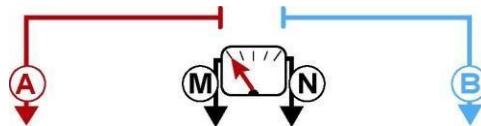
C. | Les quadripôles complets

Dans la plupart des quadripôles utilisés, les quatre électrodes sont disposées sur un même alignement. 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. Les trois quadripôles les plus utilisés sont:

- Le Wenner alpha: 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 dipôle-dipôle: Le dipôle MN est en dehors du dipôle AB

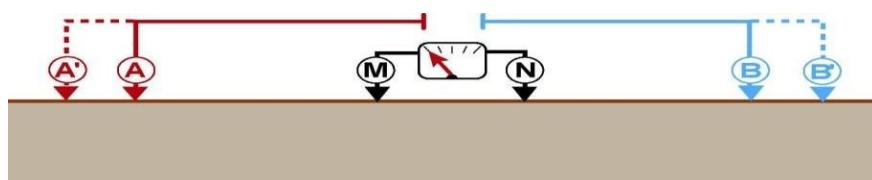


Le dipôle-dipôle est un dispositif où MN est à l'extérieur de AB. L'avantage de celui-ci est de n'exiger que des longueurs de câble beaucoup faibles pour une profondeur d'investigation donnée. Il nécessite cependant un appareillage très sensible, car si la profondeur d'investigation croît avec la distance 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).

Ces trois quadripôles se différencient également par leur capacité à imager des structures horizontales (dalle) ou verticales (mur). Un Wenner sera plus sensible à une variation verticale de la résistivité (bien adapté pour détecter des structures horizontales comme des dalles) alors qu'un dipôle-dipôle sera influencé par une variation horizontale de la résistivité (bien adapté pour détecter des structures verticales comme des murs). Un Schlumberger présente un comportement intermédiaire. Ceci est surtout valable à grande distance des électrodes.

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. Bien entendu, ces dispositifs multiples nécessitent l'emploi de câbles spéciaux à nombreux conducteurs et de nombreuses autres configurations sont possibles.



La figure suivante montre un exemple de dispositif « Twin Probes » permettant d'effectuer plusieurs mesures de la résistivité en utilisant uniquement 5 électrodes. On remarque que les électrodes A, B, M et N sont interverties pour chaque mesure. Au total 6 cartes de résistivités apparentes peuvent être mesurées en une seule installation (4 pôle-pôles, 1 Wenner et 1 dipôle- dipôle). Une seule personne peut effectuer ces mesures en déplaçant simplement le dispositif selon

une série de profils. Un multiplexer permet la commutation rapide d'un dispositif à l'autre, ce qui rend la mesure rapide.

P II.4.4 Profondeur d'investigation des dispositifs

La figure ci-dessous donne pour quelques dispositifs les profondeurs d'investigation et le pouvoir de résolution. Selon Roy la profondeur d'investigation est la profondeur de la couche infiniment mince qui contribue le plus à la mesure du potentiel. Pour Barker, il s'agit de la profondeur à laquelle la portion de terrain située au dessus de cette limite a la même influence que la portion de terrain située au dessous (« profondeur médiane d'investigation »). 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
Schlumberger	I+	P1	P2	I-	0.125L	0.19L
Dipole-Dipole	I+	I-		P1	0.195L	0.25L
Pole-Pole	I+			P1	0.35L	1/8,4

Figure II.11 : relation entre dispositifs et profondeur d'investigation et pouvoir de résolution

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. 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 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 structures étudiées.

Interprétation des profils et des cartes de résistivités apparentes

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

Il est important de pouvoir, en tout temps, disposer des données brutes (la 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, etc. Dans tous les cas, une carte de résistivité apparente doit être accompagnée de la longueur de ligne AB utilisée, de l'échelle, de l'espacement des mesures, d'une légende permettant de localiser l'étude.

L'interprétation des cartes et profils de résistivités apparentes est essentiellement qualitative. 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. Nous pouvons alors obtenir des informations qualitatives supplémentaires sur la variation de la résistivité avec la profondeur. Dans le cas de mesures effectuées avec des dispositifs mobiles, le grand nombre de données collectées peut nécessiter un traitement informatique et statistique permettant de filtrer les données.

Ci-dessous un exemple schématique de profils de résistivité pour un modèle géologique très simple (3 couches). On note bien la relation existant entre l'évolution de la résistivité apparente et la géologie dans le sous-sol (par exemple, le fossé rempli de matériel de résistivité 2 ne peut être détecté avec la petite longueur de ligne AB mais est bien visible avec un AB plus grand).

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.

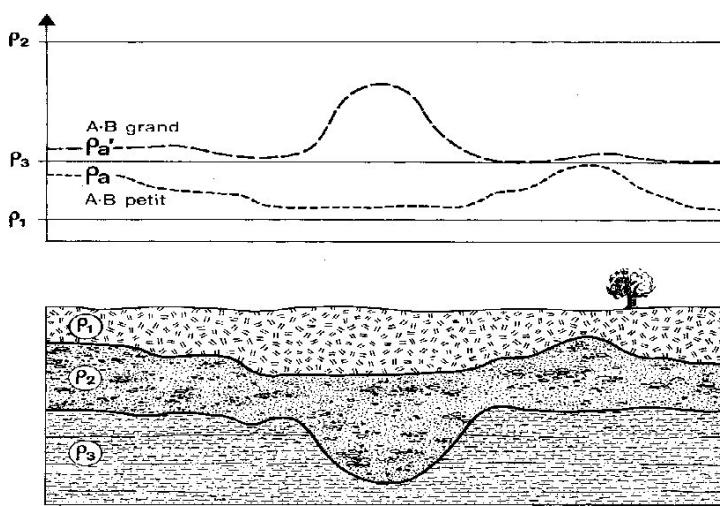


Figure II.12 : Exemple de réponse électrique à un modèle géologique

Les cartes de résistivité 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 anomalies 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.

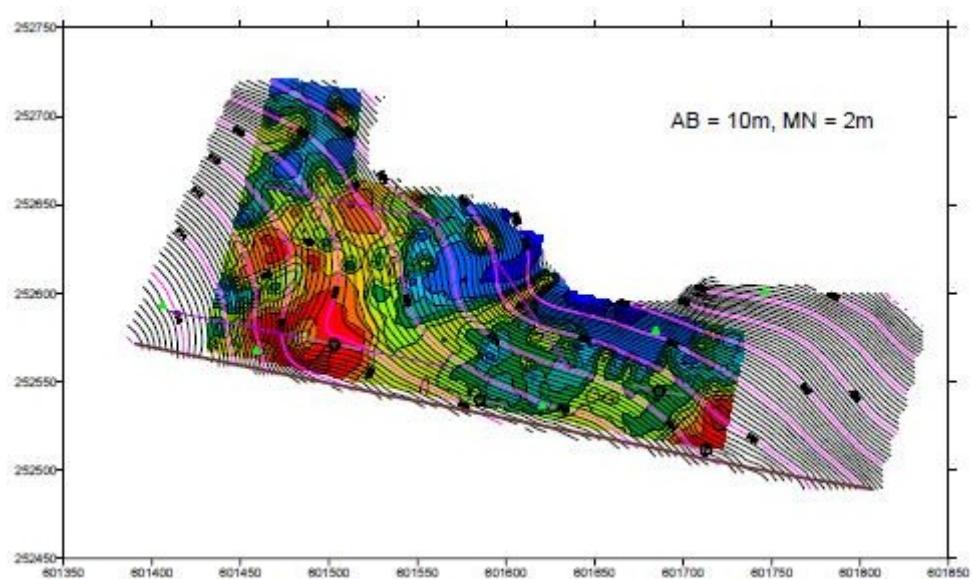


Figure II.13: Exemple de carte de résistivités apparentes (Bâle 1999, AB = 10m) en milieu karstique. Les faibles résistivités font apparaître différentes directions d'écoulement invisibles en surface.

Deuxième technique de prospection électrique : les sondages électriques verticaux

Principe

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 les dimensions du dispositif et de ce fait la profondeur d'investigation qui est proportionnelle (plus la longueur du dispositif augmente, plus le courant se propage en profondeur). 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. Dans la pratique cependant, on n'utilise guère que les quadripôles symétriques, et le plus souvent le dispositif Schlumberger. En pratique, la distance MN est maintenue fixe et aussi petite que possible pendant un certain

nombre de mesures, cela allège le travail manuel. 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. Cette distance MN doit donc être de temps en temps agrandie.

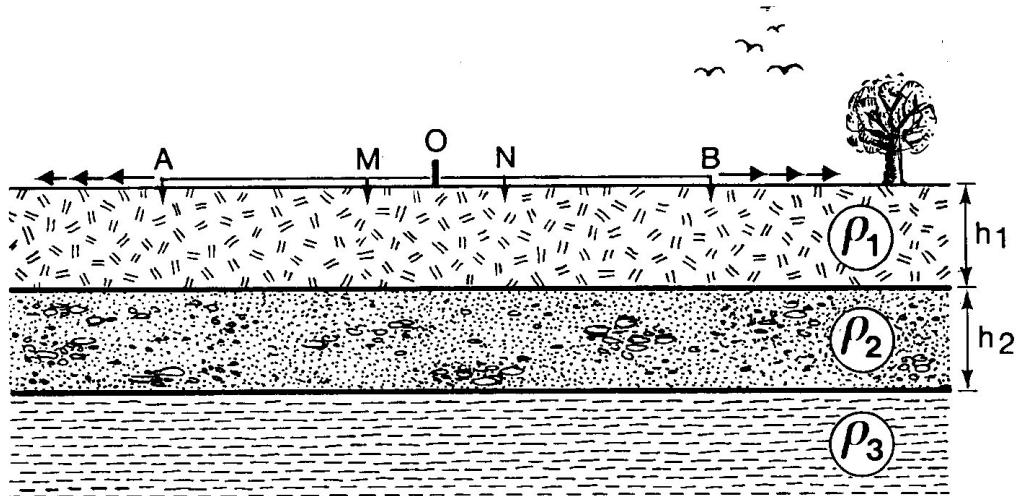


Figure II.14 : La mise en œuvre d'un sondage électrique

On représente la résistivité apparente mesurée en fonction de l'espacement du dispositif (OA) sur du papier bilogarithmique, où les deux axes sont représentés selon des échelles logarithmiques (voir figure plus loin). 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 des sondages électriques d'éviter autant que faire se peut les variations à l'horizontale des résistivités. Des cartes de résistivité apparente effectuées au préalable permettent de placer judicieusement les sondages électriques.

La figure ci-dessous illustre une feuille d'acquisition pour un sondage électrique. On y distingue les colonnes destinées à recevoir les valeurs ΔV et de I mesurées. Le facteur géométrique est donné pour différents MN ce qui permet de calculer directement sur le terrain la valeur de la résistivité apparente et de contrôler ainsi la cohérence des mesures.

ETUDE : _____

SONDAGE N° : _____

DATE : _____

COORDONNEES : _____

OPERATEUR : _____

COTE : _____

$$A \quad \overset{O}{\bullet} \quad M \quad N \quad \overset{B}{\bullet} \quad k = \frac{AM \cdot AN}{MN} \cdot 3,14$$

k pour

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

MARQUES	O·A en m	M N 1 m	M N 10 m	M N 60 m	M 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			

Figure II.15 : Fiche de Sondage électrique vertical

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.

Milieu homogène et isotrope

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 1 de ce milieu.

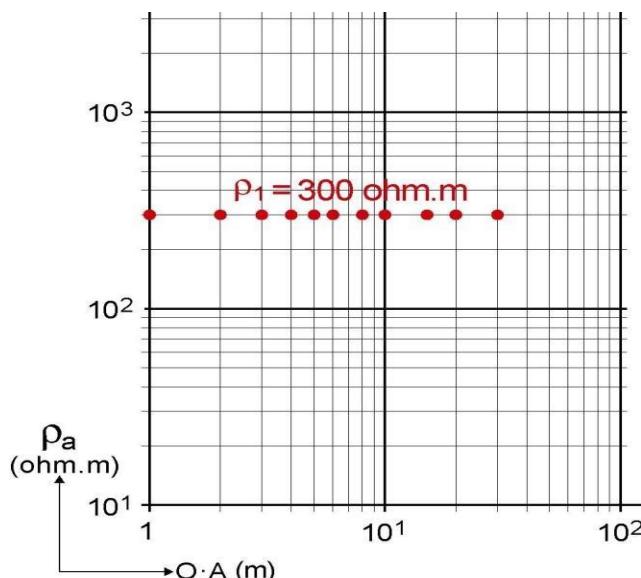


Figure II.16 : Courbe de sondage pour un terrain homogène

Milieu à deux couches

Si le sous-sol est composé de deux couches, une première couche d'épaisseur h_1 et de résistivité surmontant un substratum d'épaisseur infinie et de résistivité alors le sondage électrique ébute, pour les petits espacements, par une portion de ligne droite ou la résistivité apparente

est plus ou moins égale à la résistivité du premier terrain. Puis, au fur et à mesure que l'espacement augmente, la courbe monte ou descend selon que h_1 est plus grande ou plus petite que OA et finalement atteint une valeur asymptotique qui est celle de ρ_2 . L'espacement OA auquel on atteint la valeur de 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_1 / ρ_2 .

Cependant quel que soit le dispositif utilisé il faut des OA plus grands pour atteindre quand est résistant (/) que quand est conducteur (/) . Le courant est en effet canalisé dans la première couche si .

Pour interpréter le sondage électrique (c'est-à-dire obtenir les épaisseurs et les résistivités vraies de chaque couche à partir des résistivités apparentes mesurées), deux méthodes sont utilisées, la premier est graphique et l'autre utilisé un programme d'inversion (modélisation) appelle Winsev ou autres.

Les deux méthodes d'interprétation sont basées sur la résolution de l'équation générale du potentiel à la surface de deux terrains parallèles, homogène et isotropes, on peut construire une série de courbe représentant la résistivité apparente appelée ABAQUE CH-1.

$$\Sigma \frac{1}{[\quad (\quad) \quad]}$$

Avec, Σ et $\frac{1}{[\quad (\quad) \quad]}$

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:

$$\Sigma \left(\frac{1}{[\quad (\quad) \quad]} \right)$$

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 où le premier terrain a une épaisseur et une résistivité unité.

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. La variation des résistivités apparentes obtenues est essentiellement due à la pénétration croissante du courant.

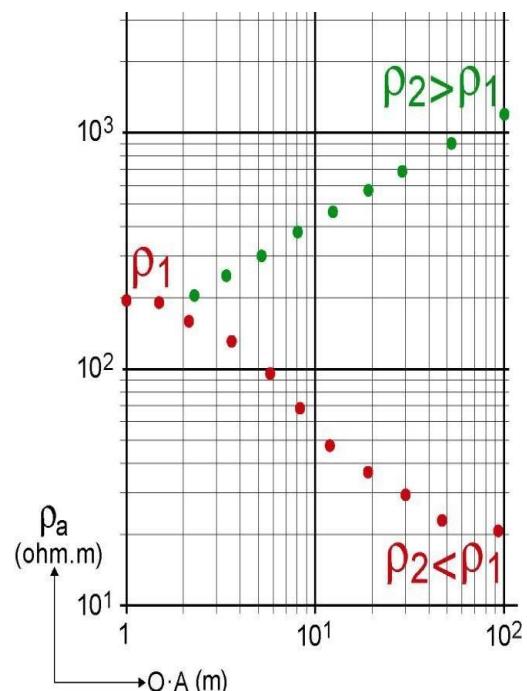
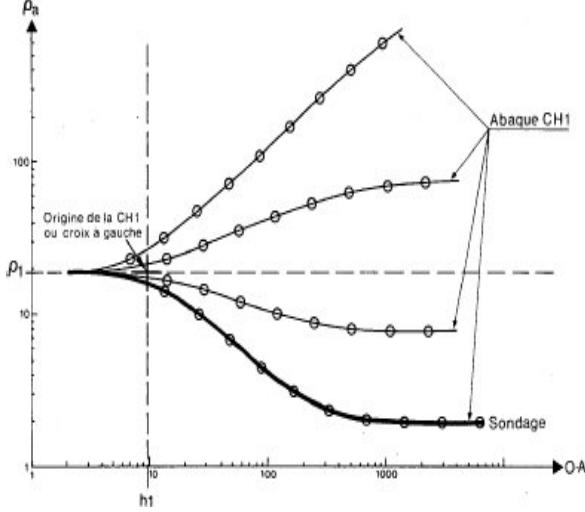


Figure II.17 : courbes de sondage a deux couches

ABAQUE CH 1

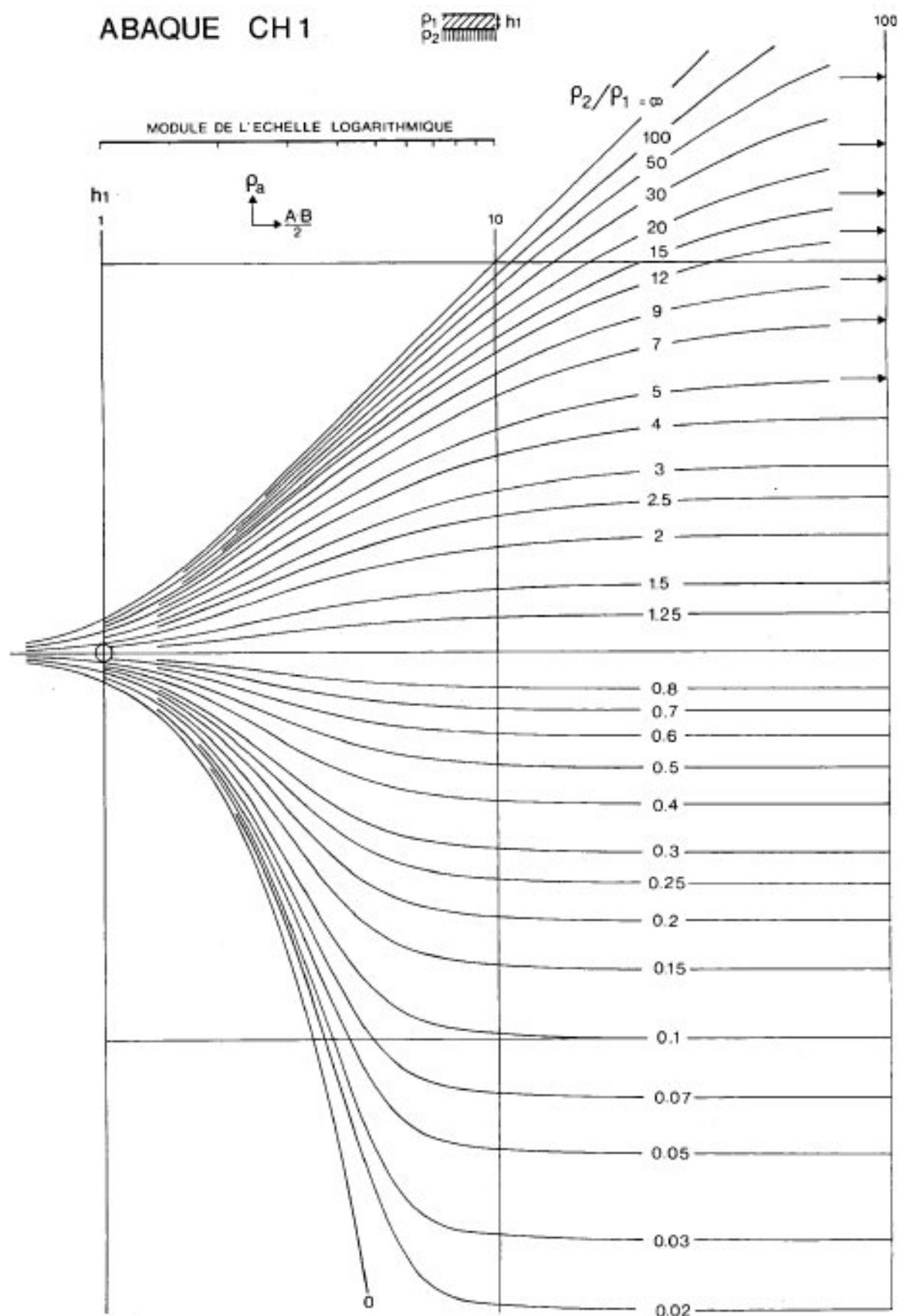
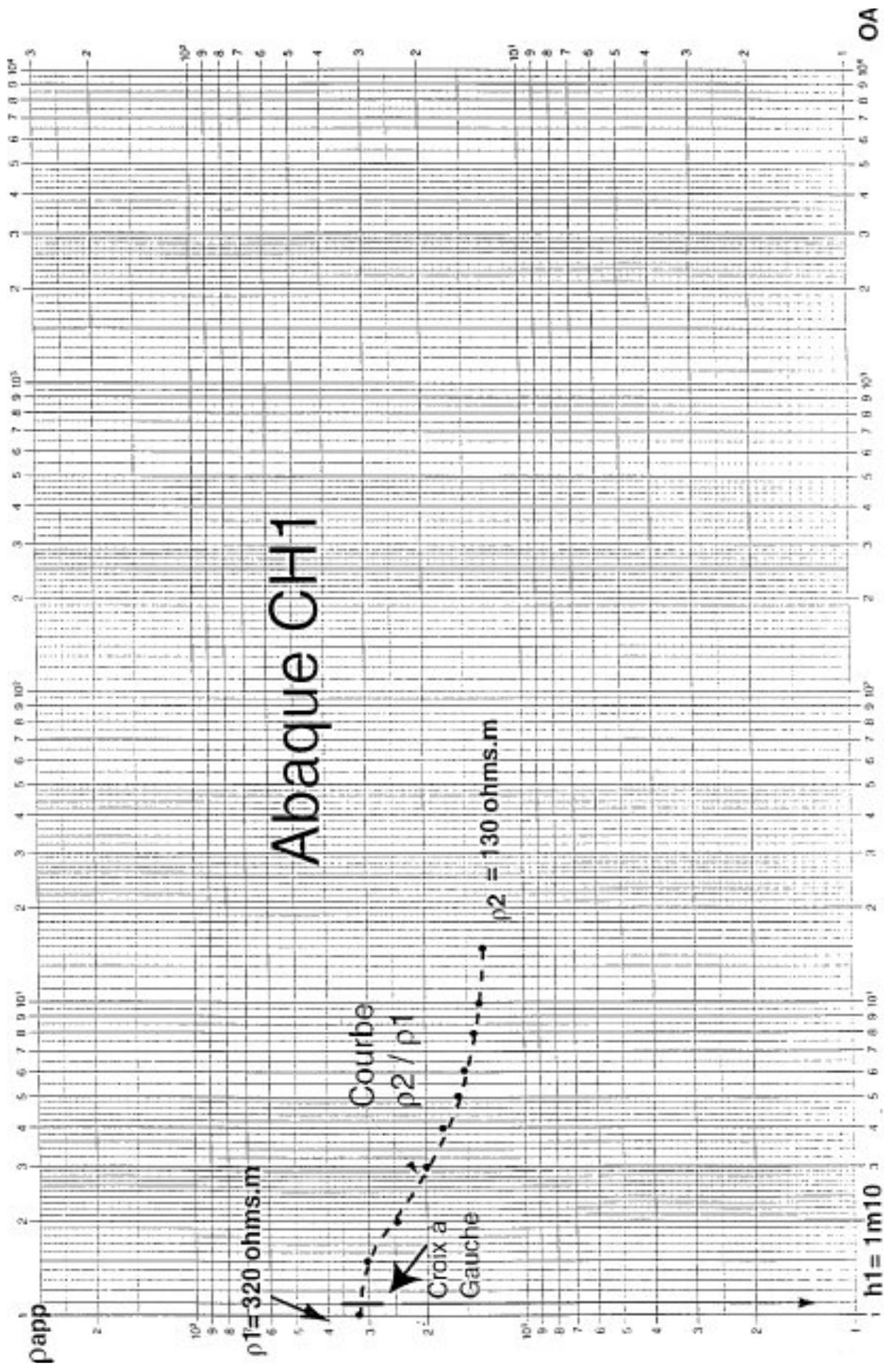


Figure .II.18 : Abaque CH-1



Sondage à deux terrains

Figure II.19 : Feuille Bilogarithmique

Milieu à trois couches (et plus...)

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 ci-dessous):

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

Là encore, un programme doit être utilisé pour interpréter ces sondages à plusieurs couches.

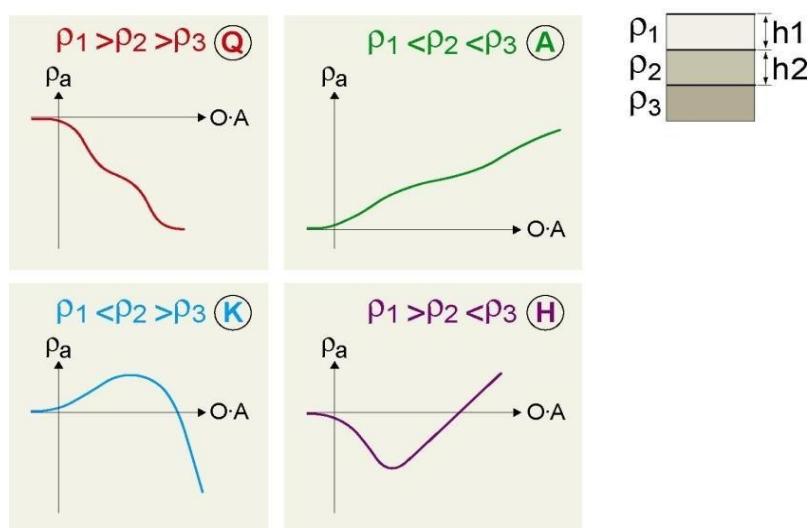


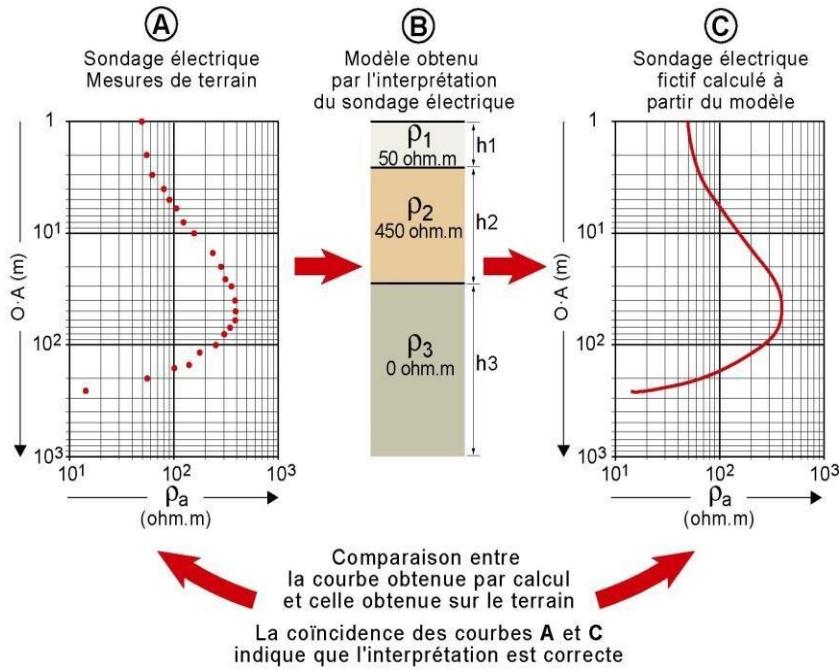
Figure II.20 : courbes de sondages électriques pour trois couches

Interprétation des sondages électriques

Des programmes d'interprétation de sondages électriques sont disponibles gratuitement sur Internet. Ces programmes permettent de faire une interprétation automatique (inversion par itérations).

Les résistivités apparentes mesurées (données de terrain) sont représentées sur le graphe (A) de la figure suivante. Le but de l'opération est de créer un modèle du sous-sol constitué d'une succession de couches horizontales ayant chacune une certaine résistivité et une certaine épaisseur (B) puis de calculer la réponse de ce modèle (C). Il s'agit là de la réponse du modèle, ou résistivités apparentes calculées (sur le modèle). L'interprétation n'est bonne que lorsque la courbe calculée pour le modèle coïncide avec les mesures de terrain. Dans ce cas le modèle est une approximation possible de la réalité du sous-sol car il génère des données similaires à celles mesurées.

Il faut toutefois au préalable contraindre l'inversion en terme de résistivités et épaisseurs, ce sont les informations a priori (données mesurées sur affleurements, forages). Sans contrainte, l'algorithme d'inversion ne cherche qu'à converger vers une erreur minimale entre les résistivités apparentes mesurées et calculées sur son modèle, parfois au mépris de la pertinence géologique (couches infiniment conductrices ou trop fines).

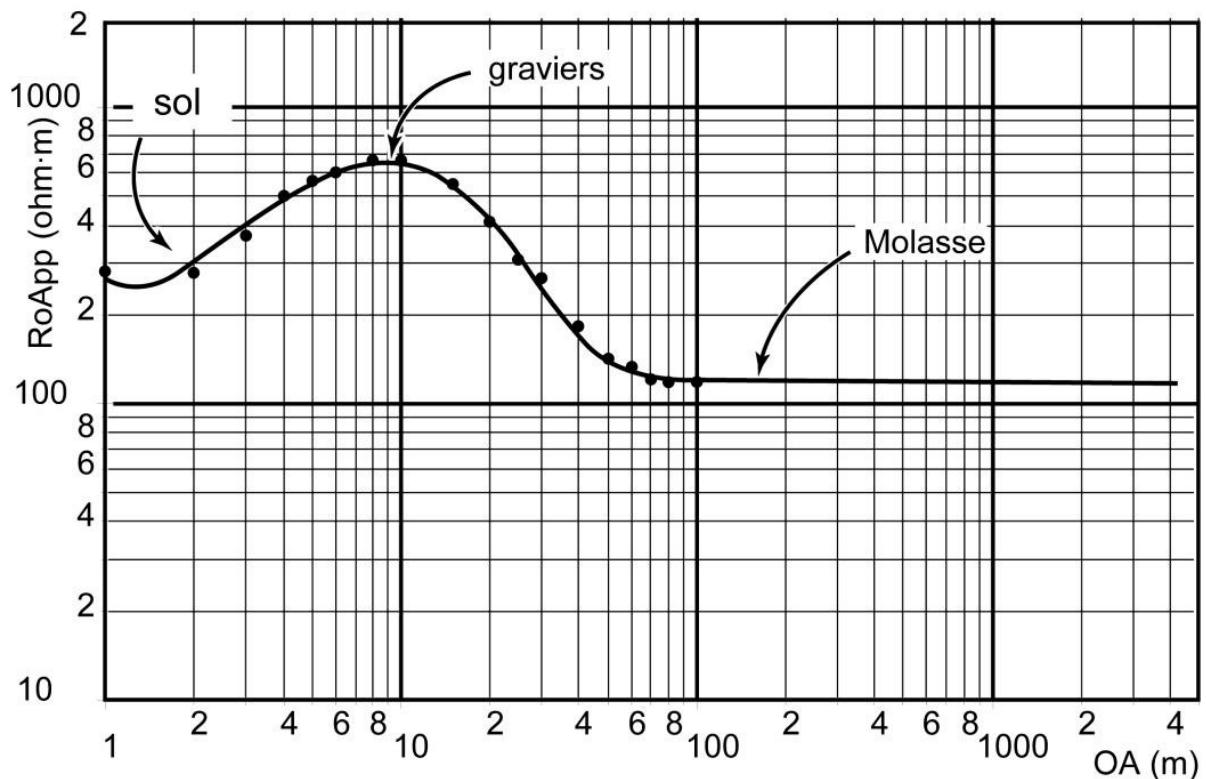


la pertinence géologique (couches infiniment conductrices ou trop fines).

Figure II.21 : Inversion des données de sondage électrique.

Une courbe de sondage électrique avec des mesures contenant du bruit peut correspondre à des répartitions très différentes des résistivités et des épaisseurs, ce qui peut conduire à une indétermination. Il y a plurivocité de l'interprétation (plusieurs solutions possibles). Cette indétermination se manifeste sous deux formes particulières qui ont reçu le nom de principe d'équivalence (impossibilité de déterminer de manière indépendante la résistivité et l'épaisseur d'une couche, sous certaines conditions de contrastes de résistivité) et de suppression (une couche de résistivité intermédiaire peut disparaître). Des informations a priori (mesures sur affleurements par exemple) sont souvent nécessaires pour interpréter correctement les sondages électriques.

La figure ci-dessous montre un exemple de sondage électrique effectué dans la région de Fribourg (Grangeneuve). Les mesures sont marquées par des points noirs et la courbe calculée sur le modèle par une ligne noire. Le modèle géologique, en termes de résistivités et de profondeurs est donné sous la figure. On distingue bien le sol conducteur, puis les graviers plus résistants et finalement la Molasse burdigalienne plus conductrice.



Terrain N°	Résistivité (ohm·m)	Epaisseur (m)	Profondeur (m)	Cote h
1	266	0.7		621
2	119	0.3	0.7	620.3
3	1175	5.5	1.0	620
4	84	14	6.5	614.5
5	124		20.5	600.5

Figure II.22 : Sondage électrique vertical interprété.

Troisième technique de prospection électrique : La tomographie électrique

But de la tomographie électrique

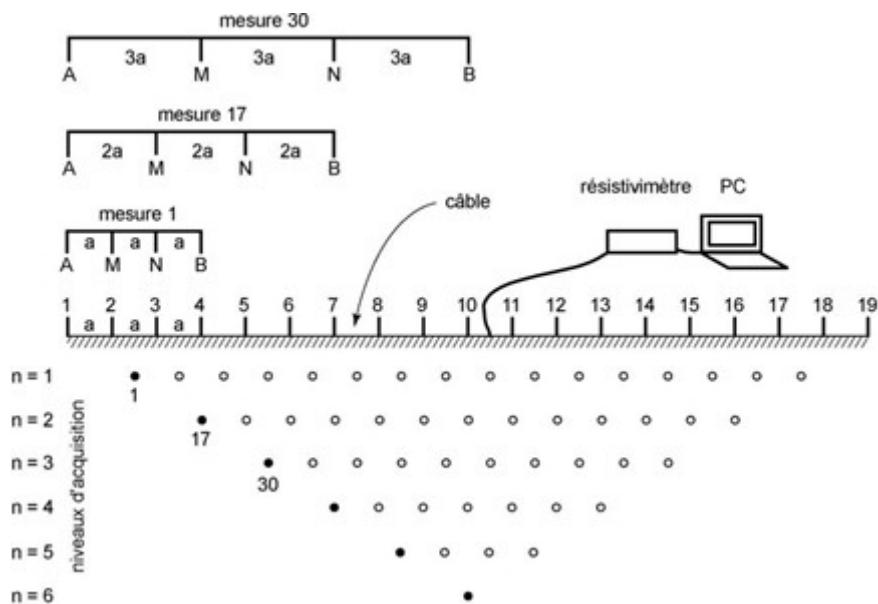
Une des limitations des sondages électriques vient du fait qu'ils ne prennent pas en compte les variations latérales de la résistivité du sous-sol. La méthode de tomographie électrique (parfois appelée imagerie électrique, ou ERT « Electrical Resistivity Tomography » en anglais) fût mise au point dans le but d'obtenir un modèle du sous-sol où la répartition de résistivité varie verticalement et horizontalement. Dans le cas de la tomographie 2D (en 2 dimensions), on suppose que la résistivité ne change pas dans la direction perpendiculaire à un profil. Cette supposition est raisonnable pour beaucoup de corps allongés (murs par exemple) et dans ce cas la méthode pourra être appliquée. Il faudra alors tenter de placer les profils perpendiculairement au corps à étudier ce qui nous permettra également de déterminer les vraies dimensions de ce corps. Pour une géométrie du sous-sol plus

complexe, une étude 3D devrait être utilisée. Si, pour un sondage, on emploie quelques dizaines de points, il en faudra entre 100 et 1000 pour un profil 2D et plusieurs milliers pour une acquisition 3D. Cette évolution, bien qu'elle permette une amélioration considérable de notre connaissance du sous- sol, pose différents problèmes: le temps d'acquisition important, le coût du matériel relativement élevé et l'interprétation des données de plus en plus nombreuses. La

tomographie 2D semble donc être actuellement un bon compromis entre obtenir des données fiables tout en maintenant un coût d'acquisition et de traitement raisonnable.

Procédure de mesure en 2D

Une acquisition 2D utilise en général un grand nombre d'électrodes connectées à un câble multi-conducteurs et placées selon un profil. Un ordinateur portable, dans lequel est programmée la séquence de mesures (ou un résistivimètre possédant un disque dur), est relié à une boîte de commutation et sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection du courant et la mesure du potentiel (figure ci-dessous). Chaque électrode possède en effet une adresse numérique unique dans le dispositif, ce qui lui permet d'être identifiée par l'ordinateur. La séquence de mesure est généralement créée sous forme de fichier texte dans lequel sont contenues diverses informations. Les formats de ces fichiers dépendent du constructeur. Les câbles multi-conducteurs sont reliés à la boîte de commutation. Un contact galvanique est assuré avec le sol au moyen de piquets métalliques (acier inoxydable) ou encore d'électrodes spéciales éliminant la polarisation



spontanée. Un espacement constant est généralement utilisé d'une électrode à l'autre.

Figure II.23 : mise en œuvre d'une Tomographie 2D

Lorsqu'on lance l'acquisition, le programme sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection du courant et la mesure du potentiel en fonction de la séquence de mesure programmée. La mesure est ensuite stockée dans la mémoire de l'ordinateur (ou du résistivimètre). Pour obtenir une bonne image 2D du sous-sol, il est nécessaire que la couverture des mesures soit également 2D et uniforme. Prenons comme exemple un dispositif Wenner avec 19 électrodes. La distance entre deux électrodes est notée a . En dispositif Wenner (figure ci-dessous) la première mesure du fichier d'acquisition va se faire à l'aide des électrodes 1, 2, 3 et 4; les électrodes 1 et 4 serviront à l'injection du courant (A et B), les 2 et 3 à la mesure du potentiel (M et N). Tout le dispositif va ensuite

se déplacer par commutation d'une distance a . Les électrodes 2 et 5 serviront alors d'injection du courant et les 3 et 4 de mesure du potentiel. Le processus se répète jusqu'à l'électrode 19. On a donc, pour le premier niveau d'acquisition 16 possibilités (19-3).

Comme la caractéristique du dispositif Wenner est de garder une distance constante entre toutes les électrodes, on va donc, pour le niveau suivant, prendre une distance égale à $2*a$. La première

mesure du 2ème niveau impliquera donc les électrodes 1 et 7 pour l'injection du courant et 3 et 5 pour la mesure du potentiel. Le processus se répète à nouveau jusqu'à l'électrode 19. Le second niveau comprendra alors 13 possibilités (19-2*3). On effectue ainsi les mesures de chaque niveau d'acquisition avec 3*a, 4*a, etc... (il en existe 6 pour 19 électrodes en Wenner). Il est évident que plus la distance inter-électrode augmente, plus le nombre de possibilités diminue. Le nombre de mesures va dépendre du type de dispositif utilisé. Pour avoir de bons résultats, il est obligatoire d'effectuer les mesures de manière systématique de façon à éviter les zones sans mesures. Le dispositif Wenner a le plus faible nombre de mesures comparativement aux autres dispositifs communément utilisés.

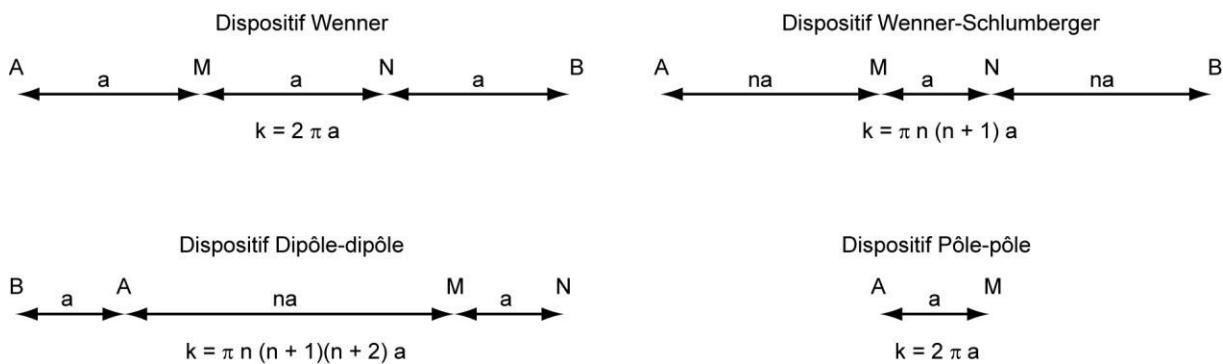


Figure II.24 : Dispositif utilisés en tomographie électrique

Pour le pôle-pôle, une procédure similaire au Wenner est utilisée. Pour un système avec 19 électrodes, 18 mesures sont d'abord effectuées avec une distance 1*a entre A et M, puis 2*a et ainsi de suite.

Pour un dipôle-dipôle, un Wenner-Schlumberger ou un pôle-dipôle, la séquence de mesure est légèrement différente (voir figure ci-dessous). Pour un dipôle-dipôle par exemple, les mesures commencent habituellement avec une distance 1*a entre les électrodes d'injection du courant (A et

B) et de mesure de potentiel (M et N). La première séquence de mesure est alors effectuée en donnant une valeur de 1 pour le facteur n (qui est le rapport AM/MN) puis une valeur de 2 tout en maintenant la distance AB et MN fixe à 1*a. Lorsque n vaut 2, la distance AM est donc le double de la distance AB (ou MN). Pour les mesures suivantes, la valeur de n est habituellement incrémentée jusqu'à 6. A partir de n=6, la valeur du potentiel mesurée n'est plus précise car trop faible. Pour accroître la profondeur d'investigation, on augmente la distance AB à 2*n et une même séquence de mesure est effectuée de manière similaire. Si nécessaire, cette opération peut être encore répétée.

Pour le Wenner-Schlumberger et un pôle-dipôle, différentes combinaisons de a et n sont utilisées. Il est donc bien clair que dans le cas d'un Wenner-Schlumberger, le type exact du dispositif va donc être compris entre un Wenner au sens strict et un dispositif Schlumberger.

Procédure de mesure en 3D

Etant donné que les structures géologiques et archéologiques sont en 3D dans la nature, un véritable dispositif 3D devrait donner de meilleurs résultats. Ce type d'acquisition n'a néanmoins pas encore atteint un niveau de développement équivalent à celui de la 2D. Une acquisition 3D demande en effet plus de données et coûte donc plus cher. Il y a toutefois deux principales évolutions qui tendent actuellement à rendre les études 3D possibles. Il s'agit de l'apparition récente des

résistivimètres multicanaux qui permettent d'effectuer plusieurs mesures à la fois ainsi que de l'évolution rapide du matériel informatique rendant possible le traitement d'un nombre important de données en un temps raisonnable.

La procédure décrite pour les acquisitions 2D reste valable en 3D. Les électrodes sont par contre habituellement arrangées selon un carré ou un rectangle en surface (bien que cela ne soit pas une obligation). La forme de la grille peut donc varier selon celle du corps à étudier. L'interélectrode est également identique selon les axes x et y du dispositif (figure ci-dessous). On utilise essentiellement des dispositifs pôle-pôle, pôle-dipôle et dipôle-dipôle en tomographie de surface 3D. Les autres dispositifs ont en effet une trop faible couverture de données vers les bords de la grille.

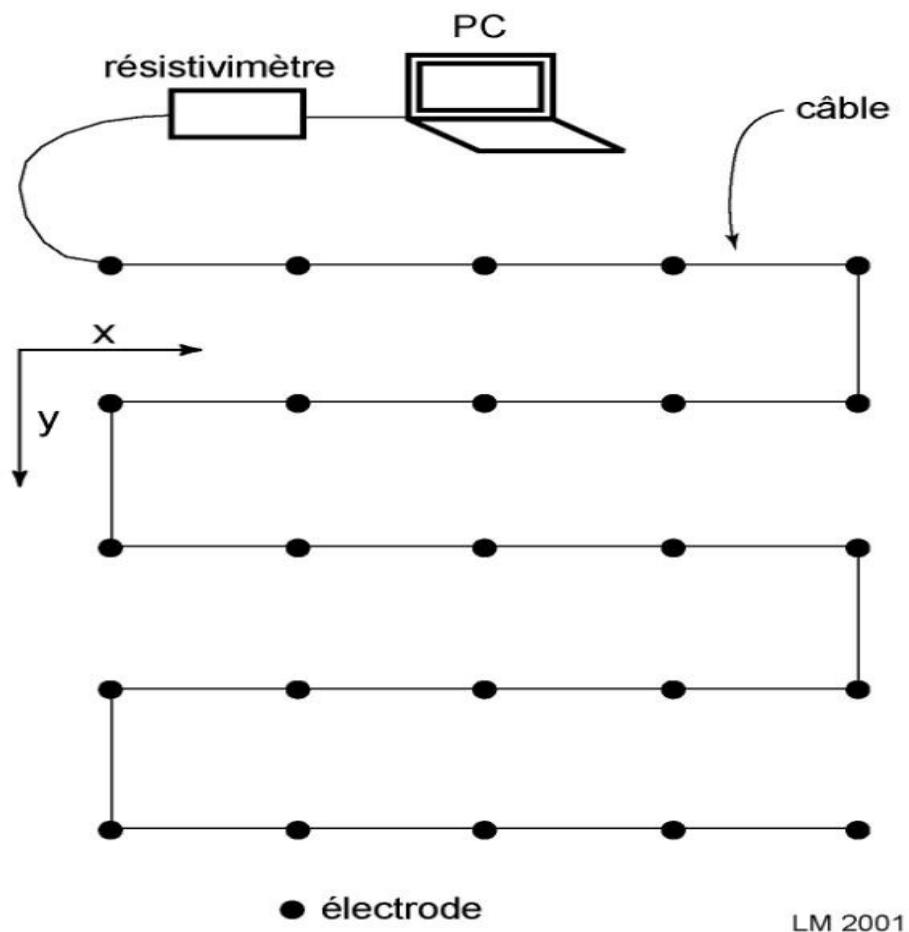


Figure II.25 : Procédure de mise en œuvre d'une tomographie 3D

Pseudo sections

Les points de mesure sont habituellement représentés en 2D sous la forme de pseudosections (coupes électriques du sous-sol en résistivités apparentes). Les points de mesure sont reportés à l'aplomb du centre du dispositif et à une profondeur arbitraire proportionnelle à la distance séparant les électrodes.

Une pseudosection donne une image distordue du sous-sol car cette image dépend de la répartition des résistivités dans le sol mais également du dispositif utilisé (concept de résistivités apparentes). Une pseudosection est donc uniquement une manière commode de représenter les résistivités apparentes. Il est donc totalement faux d'utiliser une pseudosection comme une image finale de la résistivité vraie du sous-sol! Cette pseudosection doit être interprétée (inversée, voir plus loin). Une des utilités de la pseudosection est la possibilité d'éliminer sur ces profils les mauvaises données de résistivités apparentes. Ces dernières se marquent par des points de résistivité apparente anormalement hauts ou bas par rapport aux points environnants.

La figure ci-dessous présente les pseudosections obtenues avec trois dispositifs différents sur un modèle constitué de deux corps identiques (murs), infiniment longs perpendiculairement au dispositif et éloignés de quatre fois leur largeur. La figure permet de faire quelques commentaires intéressants. Les formes engendrées par un objet identique diffèrent fortement en fonction du dispositif employé. C'est la raison pour laquelle, il est quasiment impossible d'interpréter correctement une pseudosection. Le nombre de points de mesure et leur emplacement varient aussi avec les différents dispositifs. Ce phénomène se remarque bien en comparant l'acquisition effectuée en Wenner et celle en dipôle-dipôle. Les valeurs en résistivité apparente de l'anomalie sont très faibles, malgré la résistivité élevée des deux corps (800 Ohm.m) et un environnement à 30 Ohm. m.

Interprétation de la tomographie électrique

L'interprétation des données (c'est-à-dire la détermination d'un modèle à partir des mesures) est appelée inversion. La méthode d'inversion est décrite schématiquement ici. Un modèle de départ (composé de blocs ou cellules de résistivité homogène) est tout d'abord élaboré soit automatiquement à partir des données de résistivités apparentes mesurées, soit à partir d'informations a priori entrées par l'utilisateur. Le programme calcule ensuite la réponse de ce modèle en résolvant le problème direct (c'est-à-dire le calcul de résistivités apparentes calculées à partir de résistivités vraies du modèle, en simulant numériquement sur le modèle la même série de mesures effectuées sur le terrain) (étape 1). L'algorithme détermine alors le degré de différence entre les résistivités apparentes mesurées et calculées sur le modèle (étape 2). Le modèle est ensuite modifié dans le but de minimiser ce degré de différence (erreur) (étape 3). L'opération est alors répétée de manière itérative jusqu'à ce que le processus converge (l'erreur ne diminue plus de manière significative). Dans ce cas le modèle est une approximation possible de la réalité du sous-sol. On représente le modèle sous la forme de blocs ou aussi parfois sous une forme lissée (contourage des

valeurs des blocs).

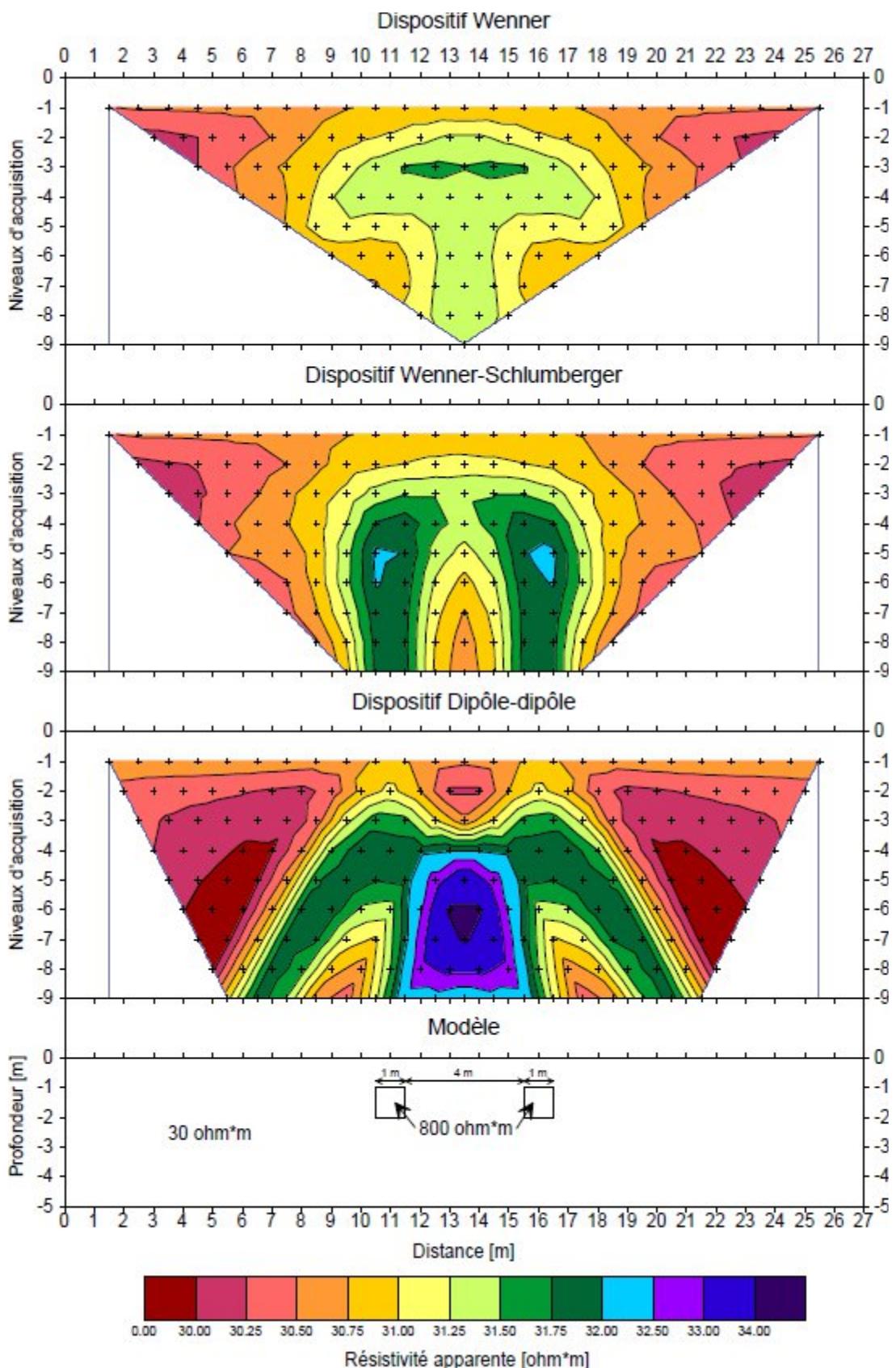


Figure II.26 : Pouvoir de résolution des différents dispositifs

On notera que la répartition du courant dans le modèle dépend des résistivités du modèle : c'est pour cela qu'on utilise une inversion itérative pour le tomographie électrique, car à chaque itération on va modifier le modèle et donc la répartition du courant. Il sera donc nécessaire de recalculer à chaque itération la réponse du modèle. On dit dans ce cas que l'inversion est non linéaire. Vous trouverez plus d'information sur l'inversion .

La figure ci-dessous montre le résultat de l'inversion des pseudosections mesurées plus haut sur les deux murs. Le modèle en 2D représente une coupe des propriétés électriques du sous- sol. On peut remarquer que les résultats sont relativement similaires quels que soient les dispositifs utilisés (Wenner, Schlumberger, dipôle-dipôle), mais ils ne sont pas exactement identiques : comme nous l'avons vu plus haut, chaque dispositif a une résolution différente qui se traduit également dans le résultat de l'inversion.

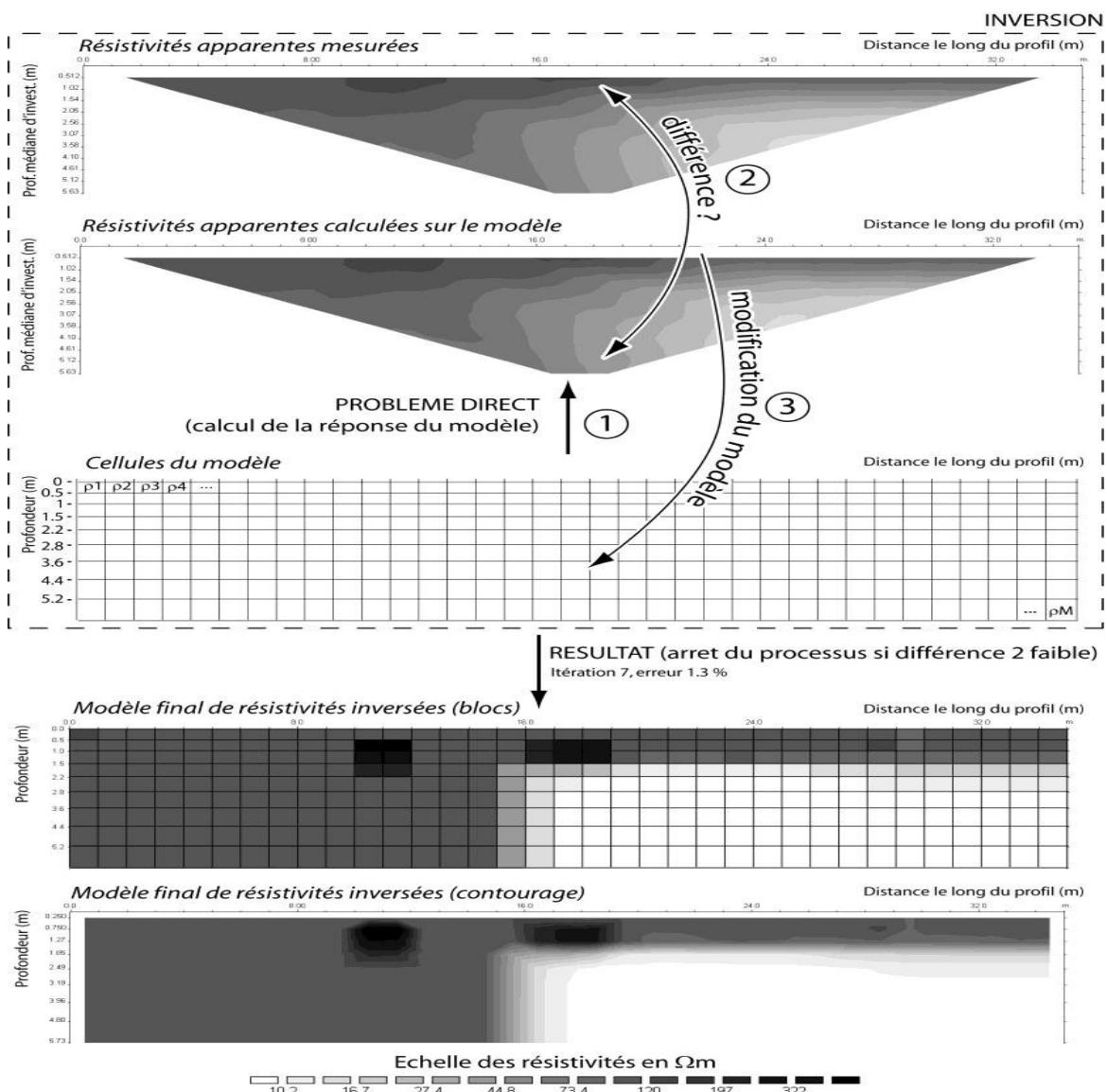


Figure II.27 : Procédure d'inversion des données électriques

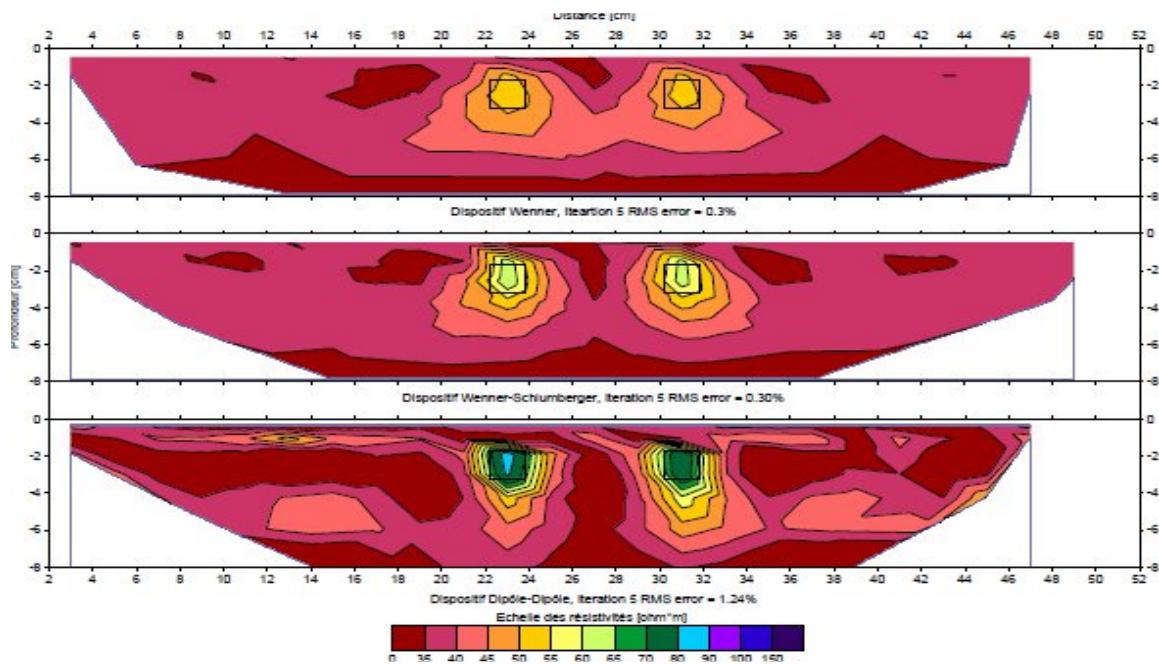


Figure II.28 : exemple de Tomographie électrique 2D

L'inversion en 3D suit une stratégie similaire. Le modèle n'est plus une coupe composée de cellules mais un volume de résistivité composé de petits cubes. On représente ce volume sous la forme de sections horizontales (à même profondeur) à travers ce volume (voire figure ci-dessous).

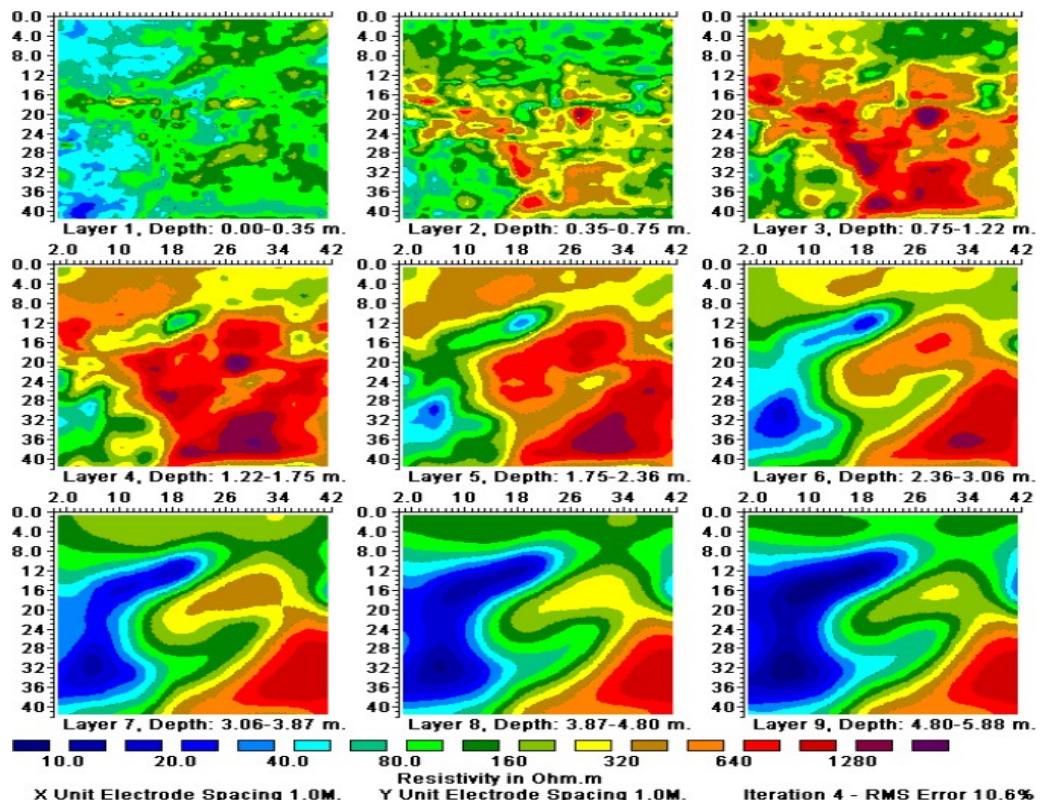


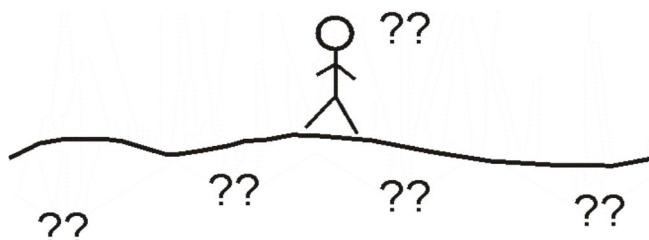
Figure II.29 : exemple de Tomographie électrique 3D

2. Esquisse globale du canevas de reconnaissance
 3. Méthodes Directes
 4. Méthodes Indirectes
 5. Méthodes in situ
 6. Méthodes en laboratoire.
 7. Principes d'application
 8. Conclusion
-

1. Introduction

L'ingénieur (technicien) se tient debout sur un site d'un projet de construction, ou de recherche des eaux souterraine, en affrontant un ensemble de questions, telle que quelle la succession des couches ; la nature du sol et du sous sol ; les propriétés physiques chimiques et mécaniques, les profondeurs; les épaisseur ; La structure géologique du site ; nature des terrains du substratum, épaisseur des formations superficielles, présence de failles, indices de mouvements anciens ou actifs, etc. L'examen des cartes géologiques permet d'avoir une première information sur la nature des sols ou des roches, sur la structure géologique, sur le pendage des couches, etc.

Pour cette raison, les scientifiques praticiens, ont opté pour un canevas général de re connaissance



Est la somme des techniques et moyens pour vaincre les questions relatives au sol et le Sous sol

2. Canevas de reconnaissance

- Définition

il est définit comme l'ensemble des méthodes et techniques pour vaincre toutes les questions déjà citées en introduction.

- Le Canevas

Les reconnaissances s'appuient sur un canevas général qui comprend quatre techniques et méthodes (Fig. ci dessous).

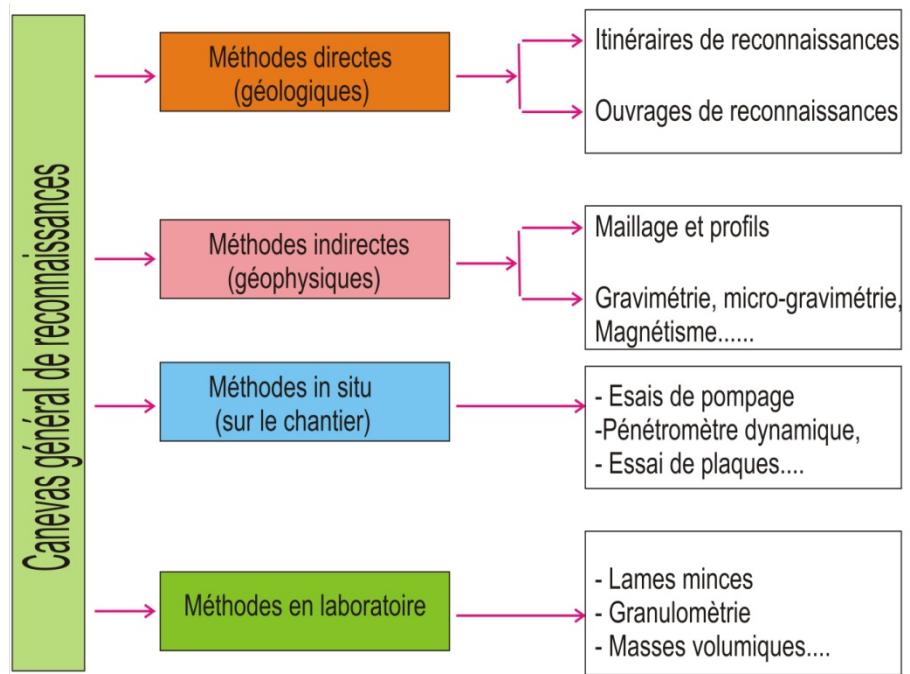


Figure 1: Esquisse du canevas de reconnaissance

3- Méthode directe, dites méthodes géologiques

Ces méthodes consistent à couvrir tout le terrain choisi pour le projet, par des observations, de mesures et éventuellement d'échantillonnage. Ces méthodes sont précises mais coûteuses, elles permettent

- d'Observer directement et d'écrire les affleurements
- de Mesurer les distances, les épaisseurs des couches, les directions et les pendage
- d'Echantillonner le rock et le sol.

3.1- Itinéraires de reconnaissance

consistent à couvrir le site d'étude par des observations les secteur ou la région à étudier.

ces itinéraires sont de deux sortes :

▪ a. Itinéraires selon une maille	▪ b. Itinéraires libres
<p>La reconnaissance s'effectue selon une maille, cette dernière est conditionnée par la nature de l'ouvrages à construire ou du projet, de l'objectif de la reconnaissance elle-même, de la structure géologiques et les détails souhaités (escomptés). Les connaissances déjà acquises jouent un rôle prépondérant dans le choix de la maille (Maille lâche,</p>	<p>Si on possède déjà des connaissances sur le site, le géologue peut effectuer ses observations selon des itinéraires (lignes) brisés, indépendamment d'une maille régulière (Fig.2).</p>

maille serrée), (**Fig.2**).

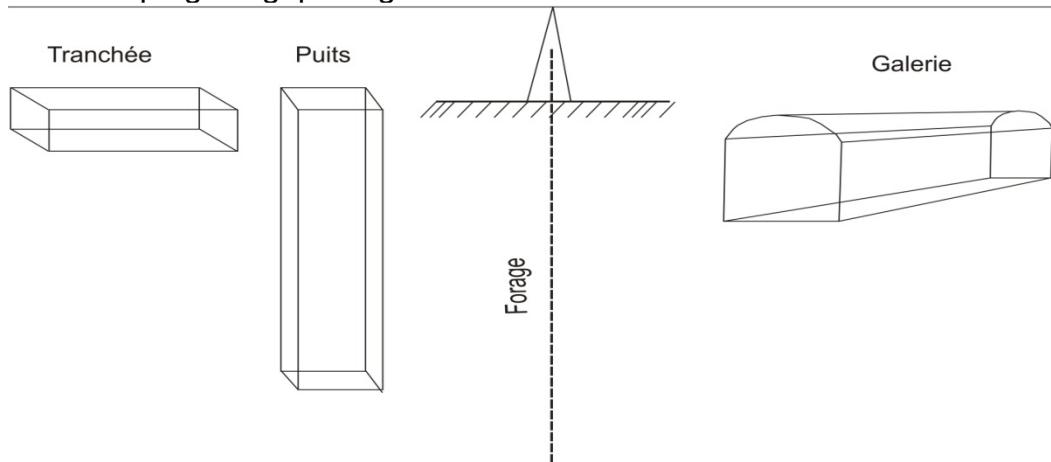
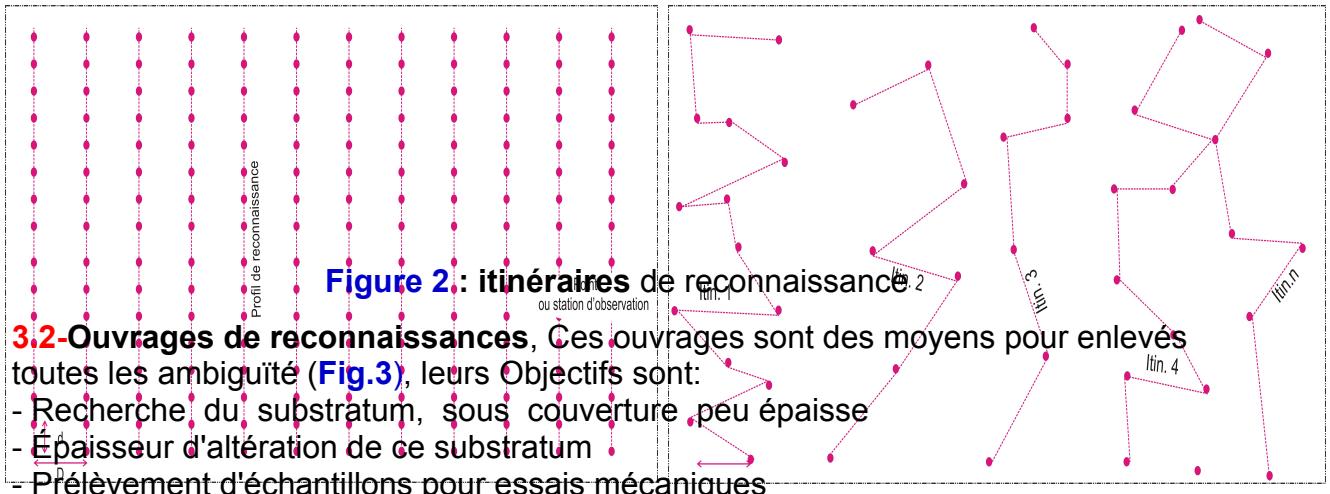


Figure 3 : Ouvrages de reconnaissance

Tranchées permet d'explorer le sol sur une faible profondeur. ses dimensions sont en général 1m de largeur, 2.5m de profondeur et sa longueur peut atteindre jusqu'à 10m.

Puits permettant d'investir d'avantage en profondeur. Il s'agi d'une section de 1m², et il peut atteindre 25 m.

Sondage mécanique et forage

Il s'agit ici de procéder à des sections tubulaires par toutes une gamme de moyens qui servent d'explorer différents terrains à des profondeurs importantes.

- Galerie

4. Méthodes Indirectes

L'ingénieur aura dans sa vie professionnelle des problèmes à poser et à résoudre... Ainsi le présent enseignement d'initiation à la géophysique est surtout fondé sur des exercices rassemblés ici. Des notes de cours sont rajoutées qui présentent de façon très succincte (et sans doute en partie périmée aujourd'hui du fait de l'évolution rapide des techniques)

les grands domaines de la géophysique. Cette matière est extraite des archives des cours que j'ai donnés de façon discontinue à l'Ecole des mines de Saint-Etienne depuis la fin des années 1970 jusqu'au début des années 2010. Je suis l'auteur d'un certain nombre d'exercices, d'autres m'ont été inspirés directement ou indirectement par divers chercheurs que je remercie (voir à ce propos les ouvrages cités dans la liste de références à la fin du texte). Je salue tous les étudiants-ingénieurs de l'Ecole des Mines de Saint- Etienne à qui je me suis adressé pendant toutes ces années. On pourra se reporter au cours de Jean-Luc Bouchardon (« La terre est ronde ») pour des informations plus complètes en matière de physique du globe (gravimétrie, sismologie, magnétisme). Un fascicule de corrigés accompagnera le présent document.

La géophysique est l'application des physiques à l'étude de la terre; le mot **géophysique** a un caractère plus appliqué et localisé (Pétrole, Sciences de l'Ingénieur etc.) que le mot **physique du globe** où l'on s'intéresse à la terre dans son ensemble.

Les méthodes utilisées sont très nombreuses;

elles permettent une connaissance à distance de parties de la terre inaccessibles à l'observation directe. Certaines de ces méthodes sont mises en oeuvre par l'homme sous forme de véritables expériences de physique à l'échelle de zones plus ou moins vastes de la terre; dans d'autres cas, on se contente de mesurer des champs physiques ou des effets non directement créés par l'homme. Ces méthodes ne donnent pas toujours des réponses uniques au sens mathématique: l'interprétation géophysique demande un dialogue constant avec les hypothèses géologiques. Enfin on remarquera que les campagnes de géophysique permettent d'acquérir un grand nombre d'informations et que d'importants domaines des mathématiques appliquées sont mis en oeuvre pour traiter les données.

On trouvera ci-après des fiches récapitulant les principales méthodes ainsi que des énoncés d'exercices discutés en classe; on donne à chaque fois le principe et les domaines d'application. On notera que l'auteur de ces feuilles n'est pas un praticien de la géophysique mais seulement un géologue intéressé par la physique.

A titre d'exemple :

Liste des sujets retenus pour l'année 2005 et annoncés pour la préparation de l'examen

gravimétrie: les différents termes de l'anomalie de Bouguer (influence de la latitude, de l'altitude, correction de plateau, de relief); calculs d'anomalies; ordres de grandeurs d'anomalies de l'échelle locale à l'échelle régionale; mise en oeuvre d'une campagne gravimétrique (influence de la dérive luni-solaire)

électricité: le quadripôle de Schlumberger: principe et mise en oeuvre théorique; résistivité des roches, influence de la teneur en eau

radar: principe; longueurs d'ondes, profondeur d'investigation, domaines d'application, mise en oeuvre de la méthode

sismique: les différents types d'onde; les différentes arrivées (onde directe, réfléchies, réfractées); interprétation de profils simples; ordres de grandeur des vitesses des ondes, domaines d'application, imagerie sismique, mise en oeuvre de la sismique réflexion

géothermie: petits calculs de flux de chaleur et anomalies thermiques; loi de diffusion de la chaleur, ordres de grandeur de paramètres thermiques (conductivité, diffusivité thermiques), flux de chaleur moyen, gradient géothermique moyen

magnétisme : les composantes du champ magnétique ; moment magnétique ; les propriétés magnétiques des matériaux ; exemples d'anomalies

La Géophysique, ou physique de la Terre a pour but d'étudier les propriétés physiques du globe terrestre. Pour cela, le géophysicien se repère dans l'espace et le temps. Les trois mots clefs qu'il a toujours à l'esprit sont : dynamique, structure et échelles.

L'objectif principal de la géophysique est de déduire les propriétés physiques et la constitution de la Terre (ou d'autres corps du système solaire), à partir des phénomènes physiques qui leur sont associés, par exemple, le champ géomagnétique, le flux de chaleur, la propagation des ondes sismiques, la force de pesanteur, etc. On distingue dans cette discipline les méthodes dites de potentiel qui reposent sur l'étude des champs de pesanteur, magnétique, électrique d'une part, des méthodes portant sur la propagation des ondes d'autre part (sismologie, sismique réflexion, sismique réfraction, radar). Généralement, on sépare la physique du globe de la géophysique appliquée pour des raisons d'échelle, mais on distingue aussi ces deux dernières de la géodynamique qui s'attache plutôt à l'étude du fonctionnement dans le temps et dans l'espace des systèmes complexes qui interviennent dans la vie de notre planète. Cet ensemble de trois disciplines n'a pas de frontières marquées ; ainsi, la physique du globe, lorsqu'elle s'adresse aux mécanismes internes, se place comme la géodynamique dans des échelles spatiales et temporelles (convection dans le noyau ou dans le manteau, déformations lentes, rhéologie visqueuse, etc.) et à l'intérieur de chacune de ces disciplines la notion d'échelle doit toujours être précisée. On pourra tout aussi bien faire de la microgravimétrie à l'échelle de la parcelle pour y déceler d'éventuelles cavités que de grandes reconnaissances gravimétriques à l'échelle d'une région ou d'un continent, pour y déceler l'existence de structures d'intérêt pétrolier ou préciser la structure de la croûte ou de la lithosphère. De même la frontière entre la géophysique et la physique des roches n'est pas précisément établie, sinon qu'en physique des roches, on peut opérer au laboratoire, alors qu'en général, le géophysicien n'a pas un accès direct de l'objet qu'il étudie. Examinons maintenant quelques concepts de base indispensables en géophysique ; © les notions d'échelle et de modèle, puis celles de mesure et d'anomalie

4- Méthodes indirectes, dites aussi méthodes géophysiques, elles consistent, soit de mesurer un paramètre physique (gravimétrie) soit d'émettre un signal et enregistrer sa réponse à l'aide des capteurs ou enregistreurs (sismique, électrique). les résultats exigent des interprétations de spécialiste, si ce n'est pas l'expert. ces méthodes sont rapides et économiques.

Principe de la géophysique

Mesurer un paramètre physique à l'aide d'un appareil de mesure.

Exemple ; Appareil de mesure : Gravimètre pour la densité des Roches en se basant sur la loi de l'attraction universelle "Loi de Newton"

Emettre un signal à travers les roches et enregistrer les réponses

La reconnaissance géophysique, ou prospection géophysique (*geophysical survey en anglais*), met en œuvre un ensemble de méthodes indirectes où l'on cherche, à partir d'une ou plusieurs propriétés physiques à déterminer la structure du milieu souterrain de manière non destructive (non-invasive) et avec un échantillonnage spatial suffisamment dense pour que les variations latérales et verticales en soient décrites aussi complètement que le permettent la propriété et la méthode de mesure utilisées. La résolution, c'est à dire le degré de finesse avec lequel le sous-sol va être décrit, est en effet variable selon la propriété choisie et la méthode utilisée. Les mesures peuvent être réalisées à partir de la surface, de puits ou d'excavations préexistantes. Le plus souvent elles ne permettent pas, à elles seules, de déterminer les valeurs de paramètres géotechniques mais sont indispensables pour placer judicieusement les forages où seront effectuées les mesures de ces paramètres, pour interpoler entre ces localisations et pour déceler les anomalies préjudiciables à un projet. Certaines méthodes de grand rendement et capables de déterminer les grands traits de la structure géologique – sismique réfraction et méthodes électriques en particulier – seront mises en œuvre dès les premiers stades de l'étude du projet (faisabilité géotechnique G12, phase 1). Ces mesures seront réalisées quasi obligatoirement pour les études de tracés linéaires (routes, autoroutes, voies ferrées). On choisit la propriété à mesurer à partir de la corrélation qu'on lui connaît avec les caractéristiques géotechniques recherchées et de l'amplitude des contrastes qu'elle peut montrer. Toutefois, les propriétés physiques montrant à la fois une variabilité suffisamment importante en fonction des paramètres d'état du terrain significatifs en géotechnique (porosité, teneur en eau, argilosité ...), et donnant lieu à des méthodes de mesure réalisables à faible coût avec des appareils robustes et de mise en œuvre facile sur le terrain, sont en nombre limité. On s'arrêtera ici à la densité, à la vitesse de propagation des ondes de compression et aux propriétés électriques. On ne traitera pas des propriétés magnétiques qui, quoique d'un usage très important en prospection archéologique et en géophysique de l'environnement sont peu utilisées en Génie Civil, ni des propriétés thermiques qui présentent l'avantage de pouvoir être mesurées en télédétection mais sur une épaisseur inférieure au mètre. Si une même propriété physique peut-être mesurée de plusieurs façons, le premier choix du prospecteur reste celui de la propriété à mesurer, en fonction des caractéristiques

recherchées du terrain, la facilité d'emploi et les sensibilités des appareils disponibles intervenant ensuite dans le choix de la méthode de mesure et de l'appareillage. Le coût de la mise en œuvre d'une méthode reste toujours un élément déterminant dans les choix.

La géophysique applique les moyens de la physique pour l'exploration du sol et du sous-sol. C'est l'une des approches utilisées pour la reconnaissance géotechnique du site avant la construction d'un ouvrage.

3- Méthodes in situ

se sont des essais qui se réalisent au chantier. on note:

- . **les essais hydrauliques**
- . **les essais mécaniques**
- **Essais Hydrauliques**

■ L'essai de pompage

Le pompage dans un aquifère selon un mode opératoire rationnel permet d'en calculer la perméabilité. Ce type d'essai dure longtemps et réclame généralement une préparation importante (forage et tubage du puits, pose de piézomètres au voisinage).

Il est surtout mis en œuvre en vue de l'exploitation des nappes. En génie civil, on utilise moins fréquemment, lui préférant le plus souvent des essais plus ponctuels, plus rapides, moins coûteux.

■ L'essai Lefranc

Pour mesurer la perméabilité d'un sol, un essai de pompage n'est pas toujours justifié ni même possible. L'essai Lefranc permet d'obtenir des résultats corrects, sans nécessiter un matériel important. Il peut être réalisé dans les sondages de reconnaissance, au fur et à mesure de l'avancement.

■ L'essai Lugeon

Sur le plan hydraulique, l'écoulement de l'eau dans un massif rocheux diffère en général beaucoup de celui que l'on observe en milieu poreux. Cela provient essentiellement de la forme et la dimension des vides offrant passage à l'eau, pores dans un cas, fissures dans l'autre.

Le degré d'ouverture de ces fissures et la charge produisant l'écoulement autorisent parfois des vitesses rapides, l'écoulement peu devenir turbulent, ce qui interdit l'application de la loi de Darcy. Par ailleurs l'hypothèse, courante en milieu poreux, de l'homogénéité et de l'isotropie de la perméabilité n'est pratiquement jamais admissible en massif rocheux.

Les méthodes employées, comme celle de l'essai Lugeon, restent très empirique. La validité des résultats fournis n'est souvent que relative et dépend beaucoup du sérieux et du soin apportés à l'exécution.

. les essais mécaniques

-ESSAI C.B.R. (California Bearing Ratiotest) Norme NF P 94-078 A.

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers. Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants (IP) CBR qui permettent - d'établir une classification des sols (GTR) - d'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IP) - déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente => épaisseur diminue)

Essai au pénétromètre dynamique

Essai à la plaque

VI.3.4- Méthodes en laboratoire

-lames minces

En géologie, généralement, on fait des préparation des échantillons, à titre d'exemple, on cite, la confection des lames minces (**Fig. VIII.5**),

exemple,

La granulométrie est la première analyses qu'on effectue au niveau du laboratoire. (**fig. VIII.6**).



Figure VIII.6 : Quelques illustrations d'analyse granulométrique

4. LA STRATEGIE DES RECONNAISSANCES

les reconnaissances s'effectuent dans un esprit de tactique et de stratégie, elle visent de vaincre toutes les questions et les ambiguïtés.

6. Conclusion

Pour conclure ce chapitre consacré aux moyens de reconnaissance à mettre en œuvre pour compléter l'étude géologique de surface, nous insisterons sur le fait qu'une campagne de reconnaissance doit toujours être menée avec méthode et précision. Le choix d'un type d'appareil doit se faire en fonction du terrain attendu et surtout de la nature du problème à résoudre. Il est rare qu'une seule méthode donne des résultats escomptés et l'on doit souvent combiner plusieurs observations et/ou plusieurs mesures.

Plan

	page
1. Introduction	
2. Résistivité : Notions et caractéristiques	
3. Principe des méthodes électriques	
4. Dispositifs de mesure de résistivité	
4.1. Trainée électrique	
4.2. Sondage électrique vertical	
4.3. Tomographie de résistivité électrique	
5. Interprétation des données	
5.1. Interprétation qualitative	
5.2. Interprétation quantitative	
6. conclusion	
pour en savoir en plus	

1. Introduction

La géophysique de surface comprend nombre de méthodes qui, à partir de la mesure d'un ou de plusieurs paramètres physiques (densité, résistivité électrique,...), permettent d'imager le sous-sol.

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, les plus développées et les plus diversifiées (méthodes imaginées en 1912 par les frères Schlumberger).

La prospection électrique est basée sur la mesure d'un paramètre physique: la résistivité électrique, qui permet dans les cas favorables de caractériser les formations géologiques et de connaître leur disposition dans le sous-sol. Cette méthode s'applique bien

particulièrement aux sous sols constitués de couches stratifiées présentant un bon contraste de résistivité entre elles.

2. Rappels : Loi d'Ohm et la résistivité électrique

Les terrains présentent une résistance au passage du courant électrique. Cette résistance électrique, R , dépend de la nature des terrains (argile, sable, calcaire), de leur degré d'humidité, et de la nature des eaux qui les baignent.

La résistance, R , peut donc permettre de caractériser un matériau.

La loi d'Ohm stipule que la résistance électrique, R , est donnée par le quotient de la différence de potentiel ΔV , appliquée aux bornes d'un matériau par le courant, I , qui circule,

Cependant, en prospection électrique la notion de résistance n'a pas vraiment de signification puisque si on prend deux échantillons de longueur différente du même matériau, ils n'auront pas la même résistance, tandis que deux échantillons de matériaux différents peuvent présenter la même valeur.

Puisque la résistance dépend de la géométrie du corps, on doit se baser sur une propriété qui, tout en caractérisant la facilité à laisser passer le courant, est indépendante de la géométrie de l'échantillon choisi.

Cette propriété s'appelle la résistivité électrique \times , et est reliée à la résistance, R , par :

Où l (en m) est la longueur du matériau et S (en m^2) sa section, \times s'exprime donc en $\Omega \cdot m$.

3. la résistivité électrique est la propriété physique qui détermine la capacité de ce milieu à s'opposer au passage d'un courant électrique.

L'inverse de la résistivité est la conductibilité σ exprimée en mho/m.

Lorsqu'un courant électrique continu (ou alternatif très basse fréquence) traverse le sous-sol, celui-ci se comporte comme une résistance dans un circuit électrique. La relation entre le champ électrique dans un conducteur et le courant provoqué par ce champ ou encore entre le courant électrique, la tension et la résistance est exprimé par la Loi d'Ohm: Où dV est la différence de potentiel en Volts entre les extrémités du conducteur de résistance R en Ohms et I l'intensité de courant en Ampères.

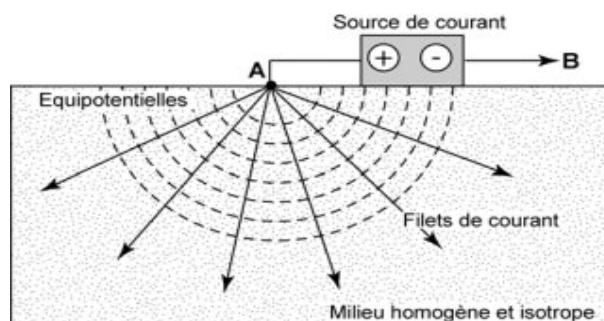
De plus, dans un conducteur:

Où R est la résistance en Ohms, dL la longueur du conducteur en mètres, S sa section en mètres carrés et ρ la résistivité en Ohm.m. En combinant les équations 1.3 et 1.4, on déduit:

Le passage du courant se fait par déplacement d'électrons dans un conducteur solide (conductibilité électronique) ou par ions dans la plus part des roches on parle alors de conductibilité électrolytique, c'est à dire que le passage du courant se fait grâce aux ions contenus dans l'eau de la formation, ions qui transportent les charges sous l'effet du champ électrique.

3. Principe de mesure

La mesure de la résistivité se fait par l'envoi dans le sous-sol d'un courant continu et par la mesure de la différence de potentiel créée par le passage de ce courant du fait de la résistance ohmique du sous-sol. Dans un milieu homogène isotrope, les filets de courant rayonnent autour de l'électrode ponctuelle d'injection. Les équipotentielles dessinent des sphères centrées sur l'électrode d'injection.



Dans un demi-espace homogène, isotrope et infini, de résistivité ρ , la différence de potentiel

dV créée par une source ponctuelle s'exprime par:

Principe des méthodes électriques

Le principe de la méthode électrique repose essentiellement sur l'interprétation de la résistance électrique du terrain. C'est par la mesure d'une différence de potentiel (méthodes des potentiels), d'une part, et surtout d'une intensité, d'autre part, que l'on accède à la valeur de la résistance.

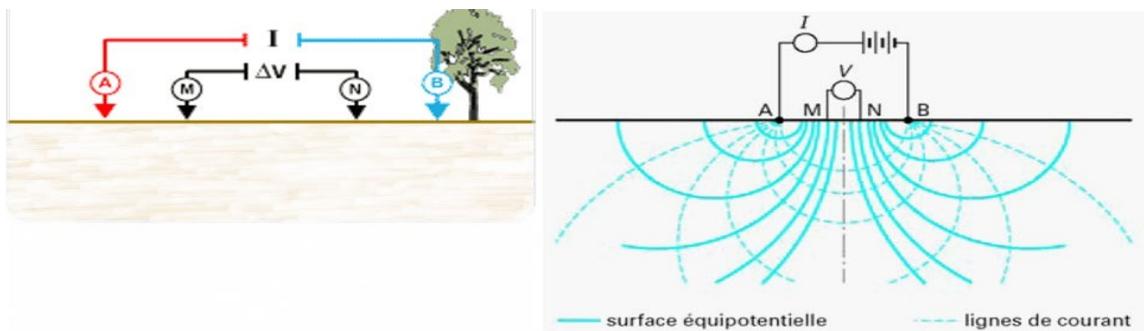


Figure 2 : Schéma de la mise en œuvre par un quadripôle

dispositifs

fonction de l'objectif de prospection.

Dispositifs	L	Prof. d'investigation		Pouvoir de résolution
		Roy (1971)	Barker (1989)	
Wenner		0.11L	0.17L	1/2.25
Schlumberger		0.125L	0.19L	1/2.45
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L	1/3.45
Pôle-Pôle		0.35L		1/8.4

Figure 3: Récapitulation et caractérisations des profondeurs d'investigation et du pouvoir de résolution de différents dispositifs de prospection électrique.

5. conclusion

La prospection électrique, et en particulier la méthode de résistivité électrique (ρ , rho) est de type galvanique. Des électrodes sont implantées dans le milieu prospecté, souvent un sol de surface, en assurant un bon contact avec le substrat. Un premier jeu d'électrodes ou dipôle électrique crée un champ électrique artificiel continu (en pratique de fréquence assez basse pour que les courants aient le temps de se stabiliser) dans le milieu. Sous l'effet de ce champ, les porteurs de charges électriques (essentiellement les ions en solution aqueuse, moins couramment les électrons dans les métaux (artéfacts) et certains minéraux semi-conducteurs, comme les oxydes de fer (hématite (Fe_2O_3)) et magnétite (Fe_3O_4) et la chalcopyrite ($CuFeS_2$), notamment) se mettent en mouvement tentant de rétablir l'équilibre électrique du milieu. Ce déplacement de

charges électriques est une migration de charges libres : on parle de conduction ohmique, responsable d'un courant électrique et d'une différence de potentiel associée. Cette différence de potentiel est mesurée entre deux autres électrodes (ou dipôle), dites passives.

Par approximation au régime électrique stationnaire, la loi d'Ohm ($U = RI$) est utilisée. Elle permet de caractériser le milieu par sa résistance R (ou résistivité tenant compte du volume du milieu investi) à partir de la mesure de différence de potentiel U et du courant I .

La résistivité électrique est donc la propriété d'un milieu conducteur à limiter le passage d'un courant électrique. Elle se mesure en ohm \times mètre ($\Omega \cdot \text{m}$) et son inverse est la conductivité électrique qui s'exprime en siemens par mètre (S/m). Les appareils de mesure sont des résistivimètres.

La simple utilisation d'un ohmmètre situé entre deux électrodes plantées dans le sol ne donnerait qu'une indication sur la qualité du contact entre les électrodes et le sol. Il faut donc dissocier l'émission du courant, par un dipôle dont la taille est adaptée à la profondeur maximale à laquelle on s'intéresse, et la mesure de la différence de potentiel, aux bornes d'un autre dipôle dont la taille est adaptée à la résolution qu'on désire obtenir.

La mesure de résistivité brute, représentative d'un certain volume du milieu en fonction de l'inter-distance entre les électrodes, est appelé la résistivité apparente. Pour déterminer le profil de résistivité en fonction de la profondeur, on utilise des modèles d'inversion, notamment la régularisation de Tikhonov mise au point dans les années 1930, une des méthodes les plus utilisées pour résoudre les problèmes inverses. La contribution d'Andreï Nikolaïevitch Tikhonov à la prospection géoélectrique permit la découverte d'importants gisements de minéral de cuivre en Union soviétique.

À proximité du milieu du dipôle émetteur les lignes de courant sont sensiblement parallèles et équidistantes. Il est donc possible de faire plusieurs mesures à partir d'une seule position du dipôle émetteur (dont la mise en place et l'utilisation sont contraignantes du point de vue de la sécurité). On considère généralement qu'une mesure effectuée à une distance du milieu du dipôle émetteur de l'ordre d'un tiers de sa longueur ne dépend pas de sa position exacte, mais seulement de son orientation et de la position de la mesure.

Pour s'affranchir des perturbations causées par les courants telluriques, on effectue plusieurs mesures en inversant le sens du courant.

Cours 6

Méthodes et Techniques de Reconnaissances in situ et en laboratoire

plan

1. Définition de Laboratoire	
2. exemples des essais en laboratoire	

1. Définition de Laboratoire

- Local disposé pour faire des recherches scientifiques, des analyses biologiques, des travaux photographiques, des essais industriels, etc. (Abréviation familière : labo.)
- Ensemble de chercheurs effectuant dans un lieu déterminé un programme de recherches.
- En apposition après un nom, avec ou sans trait d'union, indique qu'un lieu sert à des travaux de recherche, à des essais, etc. : **Ferme-laboratoire**.
- Local aménagé pour les préparations en charcuterie et en confiserie.
- Partie d'un four à réverbère où s'effectuent les échanges de chaleur ou les réactions chimiques.

Local aménagé pour effectuer des recherches scientifiques, des analyses biologiques ou encore réaliser des travaux de photo.

Synonyme : **cabinet**, atelier

Traduction en anglais : laboratory

classe de laboratoire

géologie

géotechnique

Aussi appelés **centre de recherche**, ceux-ci permettent aux chercheurs de mener à bien des études scientifiques sur des domaines variés. Aussi appelés centre de recherche, ceux-ci permettent aux chercheurs de mener à bien des études scientifiques sur des domaines variés.

En **chimie expérimentale**, le **but** est l'objectif que l'on cherche à atteindre, en respectant les règles élémentaires de **sécurité**, lors d'une **synthèse**, d'une **analyse** ou d'une expérimentation en général. Il constitue le fil conducteur de la manipulation.

À la rédaction comme à l'oral, il est bref — deux lignes au plus dans la majorité des cas — et introduit un verbe d'action. En général, il regroupe le travail effectué, ainsi que la **méthode**.

3- Méthodes *in situ*

se sont des essais qui se réalisent au chantier. on note:

- . **les essais hydrauliques**
- . **les essais mécaniques**
- **Essais Hydrauliques**

VI.3.4- Méthodes en laboratoire

-lames minces

En géologie, généralement, on fait des préparation des échantillons, à titre d'exemple, on cite, la confection des lames minces (**Fig. VIII.5**),

exemple,

La granulométrie est la première analyses qu'on effectue au niveau du laboratoire. (**fig. VIII.6**).



Figure VIII.6 : Quelques illustrations d'analyse granulométrique

plan

1. Introduction

2. Définitions

2.1. Forage

2.2. Sondage

3. Historique sur les forage

4. Types de machine

5. Types de montage

6. Description générale de machine

7. type de forages

7.1. forage destructif

7.2. forage carottant

8. conclusion

pour en savoir plus

.....

1. Introduction

Le forage est un ensemble d'opérations qui permet de creuser un trou de diamètre centimétrique à décimétrique, généralement vertical et utilisé à des fins scientifiques ou économiques. Le forage d'eau est un ouvrage réalisé par des professionnels pour la mise en valeur des eaux profondes. Les puits traditionnels ne permettent pas d'assurer une alimentation durable des populations dans un contexte de changement climatique, caractérisé par un déficit pluviométrique et une diminution corrélative de la recharge des nappes superficielles. Le forage qui permet de capter les eaux profondes inaccessibles à partir des moyens traditionnels, apparaît comme une alternative, donc une stratégie d'adaptation au contexte actuel de changement climatique.

Un forage sert, généralement, à l'exploitation ou l'exploration des ressources naturelles fluides emmagasinées dans le sous-sol (réservoir) et qui sont :

1- Eau,

2- Pétrole,

3- Gaz naturel.

Dans certains cas, les forages peuvent servir, pour surveiller (piézomètres) ou recharger un réservoir en fluide: on parle de puits injecteur.

Dans d'autres cas très rares certains forages servent à exploiter l'énergie géothermique d'une région ou pour des buts d'exploration minière, scientifique (pôles, océans...) ou pour stoker des déchets (puits poubelles).

La sonde de forage rotary (Figure 1.1) est l'appareillage nécessaire à la réalisation des trois fonctions suivantes :

- poids sur l'outil.
- rotation de l'outil.
- injection d'un fluide.

2. Définitions

Un forage est une section tubulaire nominative.

Forage Sondage

Le forage est un ensemble d'opérations qui permettent, par le biais d'un procédé mécanique, de creuser un trou de diamètre centi à décimétrique, généralement vertical et utilisé à des fins scientifiques et /ou économiques. Ce procédé mécanique correspond à tout un assemblage du matériel ; monté sur camion ou bien inclus dans un atelier ; destiné à réaliser l'objectif du projet bien sur en pénétrant le sous sol. En fait, toutes les techniques de forage (battage, rotary, foration à l'avancement odex...) sont valables pour les deux styles soit atelier ou bien sur camion. Quelque soit la technique de forage employée, plusieurs précautions doivent être prises en considérations : Ø La quantité d'énergie exigée pour la foration est réglementé (diriger de façon autoritaire et arbitraire) par les caractéristiques du terrain ; Le tableau ci-dessous montre les numéros de catégorie et les caractéristiques correspondant à chaque type de terrain

3. Types de machine

1. Classification des appareils de forage

La classification des appareils de forage se fait en première approche par la capacité de profondeur de forage maximale (figure 1.2).

Les appareils de forage peuvent être classés comme suit :

- Appareil léger.
- Appareil moyen.
- Appareil lourd.
- Appareil ultra lourd [1].

APPAREIL	Puissance Hp	Profondeur (m)
Léger	650	1950
Moyen	1300	3900
Lourd	2000	6000
Super lourd	3000	9000

Description des appareils de forage :

Le chantier de forage peut être décrit sous forme de deux catégories de matériel.

Matériel de surface

Cette catégorie est répartie en plusieurs groupes mettant en œuvre l'outil de forage et assurant la sécurité du puits.

Equipements de levage :

Ils permettent :

- le contrôle du poids sur l'outil;

- les changements d'outils (manœuvre de garnitures) ;
- la descente des colonnes de tubage ;
- les levées et les descentes du mât (DTM). Ils sont principalement composés de :
 - la structure de la tour de levage ;
 - les moulins fixe et mobile ;
 - le treuil de forage ;
 - le crochet de levage ;
 - le câble de forage ;
 - le poste de commande et de contrôle.

Les équipements de rotation :

Ils sont principalement composés de :

- la table de rotation ;
- Le Trépan ;
- le carré d'entraînement ;
- la tige d'entraînement ;
- raccord d'usure de la tige d'entraînement ;
- la tête d'injection.

Les équipements de pompage et de circulation :

Ils sont principalement composés de :

- Bacs à boue plus équipements ;
- Mixeurs ;
- Tamis vibrants ;
- Des sableurs ;
- Mud cleaner ;
- Centrifugeuses ;
- Dégazeur ;
- Les pompes à boues plus accessoires ;
- Soupapes de décharges (ou de sécurité) ;
- Les conduites d'aspiration et vannes ;
- Le flexible d'injection.

Ces équipements assurent la fabrication, le pompage et la circulation ainsi le traitement mécanique des fluides de forage.

Les équipements mécaniques :

On distingue :

- Les groupes électrogènes ;
- Les compresseurs.

Ils fournissent l'énergie nécessaire au fonctionnement de la sonde de forage.

Le matériel de fond :

Cette partie regroupe l'ensemble de la garniture de forage :

- Outil de forage ;
- Masse tige ;
- Tige de forage ;
- Equipements auxiliaires ;

➤ Raccords divers.

Principe de fonctionnement de l'appareil de forage :

L'outil de forage (trépan) est entraîné dans son mouvement de rotation au fond du trou par une colonne de tiges creuses vissées les unes aux autres.

À l'extrémité supérieure de ce train de tiges et à hauteur du plancher de la tour de sondage se trouve la tige d'entraînement qui est creuse également, mais de section extérieure carré ou hexagonale, et qui passe à travers la table de rotation par laquelle elle est entraînée. La table de rotation est entraînée par les moteurs par l'intermédiaire d'un ensemble de transmission par chaîne et roues dentées.

L'ensemble du train de sonde est suspendu au crochet de levage par l'intermédiaire de la tête d'injection qui joue le rôle de palier de rotation pour l'ensemble de train de tiges, elle comprend une partie mobile solidaire du train de sonde et une partie fixe solidaire du crochet.

Ce crochet de levage peut être manœuvré du haut en bas de la tour métallique grâce à un système de mouflage composé d'un moufle mobile auquel est suspendu le crochet et d'un moufle fixe, fixe en haut du mât de sondage.

Le brin du câble va s'enrouler sur le tambour de treuil de forage lequel est entraîné par les moteurs par l'intermédiaire d'un jeu de transmission et d'embrayages.

Une injection de boue dans le trou est assurée pendant la durée de forage.

Des pompes à boue aspire la boue des bacs et la refoule par l'intermédiaire de la colonne montante, du flexible et de la tête d'injection dans l'intérieur du train de sonde, la boue, descend ainsi jusqu'au fond du trou, sort par les évents du trépan et remonte par l'espace annulaire compris entre les tiges et le trou foré, cette boue qui remonte du fond du trou est chargée des déblais de forage.

Ainsi dès son arrivée à la surface, elle passe aux tamis vibrants qui la séparent des déblais; elle retourne dans les bacs d'aspiration. La boue effectue donc un circuit fermé, durant le forage.

1. Derrick
2. Moteurs
3. Treuil
4. Pompe à boue
5. Moufle fixe
6. Moufle mobile
7. Crochet
8. Tête d'injection
9. Tige carrée
10. Table de rotation
11. Obturateurs de sécurité
12. Tige de forage
13. Masse-tige
14. Trépan
15. Tubages cimentés
16. Tamis vibrant
17. Bac à boue
18. Stockage des tiges par ensembles de 3
19. Logement de la tige carrée pour

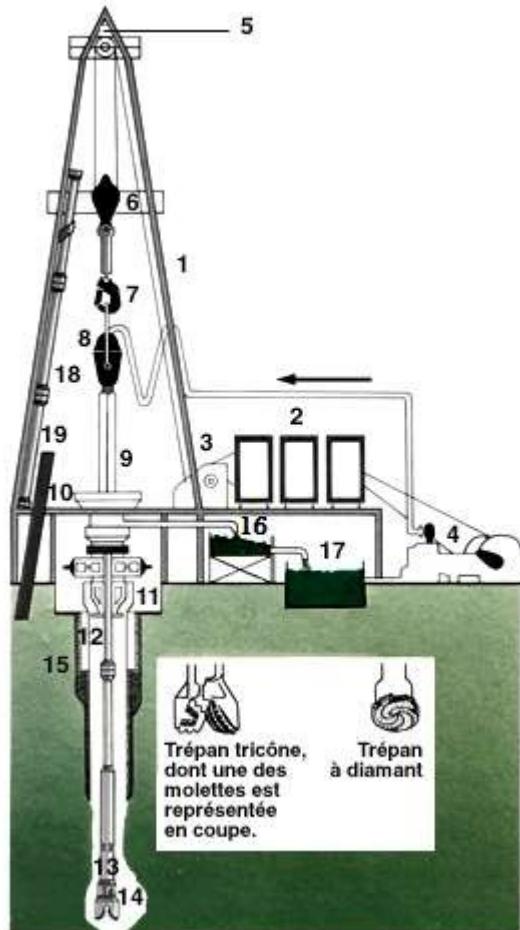


Figure 1.1 : Sonde de forage rotary.

7. type de forages
- 7.1. forage destructif
- 7.2. forage carottant

conclusion

pour en savoir plus

Cours 08

Techniques de forage

plan

1. introduction
 2. techniques de forages
 - 2.1. forage par battage
 - avantages
 - inconvénients
 - 2.2. forage par rotation
 - avantages
 - inconvénients
 - 2.3. forage par marteau au fond de trou
 - avantages
 - inconvénients
 3. conclusion
- pour en savoir plus
-

1 INTRODUCTION :

S'il existe différentes méthodes d'étude d'un gisement d'eau minérale, la réalisation d'un forage Constitue la méthode la plus directe d'approche des caractéristiques du milieu souterrain en un Point donné. La réalisation d'un forage dans un gisement nécessite une programmation rigoureuse compte Tenu des aspects suivants : ès'agissant d'une action sur le sous-sol, elle constitue un risque pour le milieu souterrain et pour les différentes entités géologiques concernées par la foration. Ce risque peut concerter le transfert d'éléments indésirables vers certains niveaux producteurs (contamination chimique ou bactériologique). Il peut également se produire des phénomènes de mélanges entre différents niveaux pouvant induire des modifications de qualité voire de quantité (jusqu'à la perte d'une ressource) ès'agissant d'une action ayant un objectif technique déterminé et représentant un coût en général non négligeable, l'ouvrage doit être conçu pour une acquisition optimale de données compte tenu des moyens pouvant être mobilisés. Ainsi, toute action de foration entreprise sur un gisement d'eau minérale doit s'accompagner d'une réflexion préalable sur : *la mise en œuvre de la technique de foration la plus appropriée ; *la réalisation d'un suivi technique adapté ; *la mobilisation d'une entreprise de forage qualifiée pour le type de forage envisagé. Le forage : le forage est une technique ou un moyen pour traverser des terrains (roches) en les désagrégeant tout en évacuant les déblais, afin d'atteindre un but qui peut être du gaz, pétrole, eau ou un gisement minier. Le forage peut être vertical, forage dévié ou horizontal. Il est aussi la façon la plus sûre pour connaître la géologie réelle des terrains traversés. Il existe plusieurs méthodes de forage qui peuvent être classées en trois catégories : Forage par mouvement alternatif (battage ou percussion). Forage par combinaison des deux mouvements (rotation- percussion). Forage par rotation (rotary).

2. Techniques de forage

On appelle une méthode de forage, tout moyen qui vise à désagréger une roche et évacuer les déblais. Plusieurs techniques de forages d'eau ont été développées en fonction du type d'ouvrage recherché et du contexte géologique. Toutefois, certaines ont tendance à disparaître, d'autres sont au stade expérimental.

Selon le mode d'action de l'outil de fond, les techniques actuelles de forage peuvent être classées en trois (3) catégories, comme il est indiqué sur le schéma ci-dessous (fig. 2.1) :

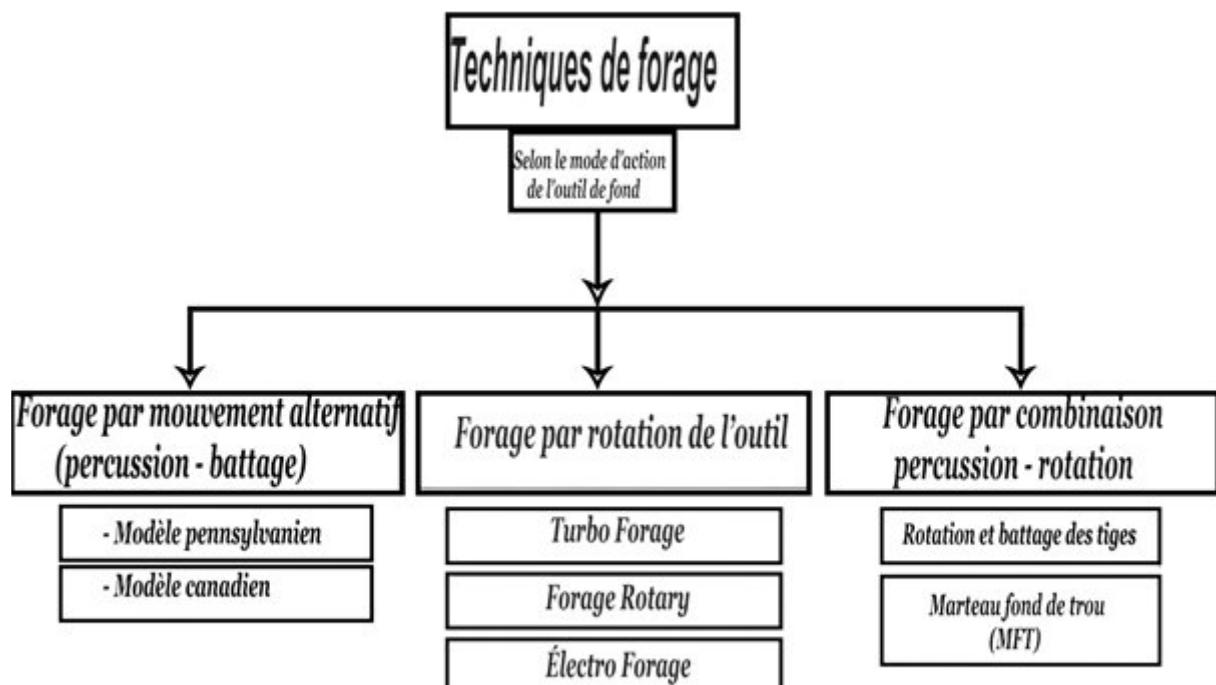


Figure.I.5 : techniques de forages

4.1. Forage par mouvement alternatif

qu'on appelle **le battage au câble**, ceci est dit à percussion

C'est la méthode la plus ancienne, on assure que les chinois la pratiquaient déjà il y'a 4000 ans [3]. Ils auraient atteindre des profondeurs de 1000m.

Le procédé est simple ; il consiste à soulever un outil lourd et à le laisser retomber sur la roche à perforez. La hauteur de chute et la fréquence des coups varient la dureté de la roche. Si le trépan est accroché directement au câble, ou sous la masse tige, c'est le procédé pennsylvanien. Si le trépan est fixé sous un train de tiges, c'est le procédé canadien.

4.1.1. Avantages

Les avantages de cette technique sont :

- Investissement moins important que pour les autres matériels de forage.
- Faible énergie dépensée.

- Facilité de mise en œuvre, pas de boue de forage, possibilité de travail à un poste.
- Récupération aisée d'échantillons
- Travaux pouvant être exécutés dans des zones désertiques (40 à 50 litres d'eau, même salée, suffisant) au fond du trou
- Équipe réduite
- Pas de problèmes de forage dans les formations à pertes d'eau.
- Bonne verticalité du trou.
- Les outils peuvent être rechargés, reforgés, cémentés et affûtés sur place.

4.1.2. Désavantages

- Forage lent.
- Difficultés pour équilibrer les vannes d'eau jaillissantes.

4.2. Forage par mouvement rotatif de l'outil (rotary)

Cette méthode est mise au point entre 1920 à 1925 en ex URSS. Un outil placé à l'extrémité d'un train de tiges creuses se trouve de façon permanente au fond de puits, et il est animé d'un mouvement rotatif et soumis à une pression ou un poids bien défini. En Rotary, la pénétration de l'outil s'effectue par abrasion et broyage du terrain, sans chocs, uniquement par rotation. L'évacuation des déblais est assurée par le circuit de la boue.

4.2.1. Avantages

Les avantages de cette technique sont suivants se résument ainsi :

- Cette technique est plus économique et le plus efficace et le plus rapide que la méthode de battage.
- Elle permet de forer des puits à très grand profondeur en gros diamètre, et pour obtenir le meilleur rendement d'un atelier le forage rotary, il convient d'être très vigilant sur trois facteurs qui conditionnent longitudinal de l'arbre de forage
 - * Poids sur l'outil.
 - * Débit des pompes à boue.
 - * Vitesse de rotation.

4.2.2. Désavantages

- Nécessite une haute qualification du personnel

4.3. Forage par combinaison (percussion + rotation)

Cette technique est dite « forage à la percussion au marteau fond de trou ». Cette méthode de forage utilise la percussion en fond de trou assortie d'une poussée sur l'outil qui se trouve lui-même en rotation. L'énergie utilise pour actionner cet outillage est l'air comprimé à haute pression (10-25bar) permettant également d'évacuer les débris de forage.

Cette méthode est surtout utilisée dans les formations dures car elle permet une vitesse de perforation plus élevée que celles obtenus avec les autres méthodes. L'outillage habituellement utilisé permet de forer des trous d'un diamètre de 85 à 381 mm.

Le principe du forage percussion Cette technique permet de traverser des terrains durs comme le rocher (granites) ou sédimentaires consolidées (grés, calcaires).

Un tillant à boutons en carbure de tungstène fixé directement sur un marteau pneumatique, est mis en rotation et fonctionne comme un marteau piqueur, à l'air comprimé qui est délivré par un compresseur en plu de la machine de forage. Le flux d'air permet de remonter les cutting du terrain. On distingue 2 phase, la percussion et le soufflage [

4.3.1. Conseil Conseils (MFT)

- * Il est nécessaire que l'appareil de forage soit bien stable et qu'il n'y ait aucune possibilité de décalage.
- * Les filetages des tubes de travail doivent être systématiquement munis de protéger
- * Filtrages en dehors des manipulations. Les tubes de travail doivent être eux –même bien rangés et manipulés sans brutalité.
- * L'intérieur des tubes doit être propre avant leur utilisation.
- * On doit apporter un soin attentif au démarrage d'un trou en utilisant une faible poussée sur l'outil, une rotation lente et une basse pression d'air comprimer.

4.3.2. Avantages

La méthode de forage avec un outil fond de trou est intéressante dans les pays où l'eau est rare. C'est une méthode de forage de mise en œuvre rapide et simple. Elle permet en outre de déceler « de visu » la présence d'un aquifère leurs du forage

Le tableau ci-dessous montre les numéros de catégorie et les caractéristiques correspondant à chaque type de terrain

Tab 1 : Les duretés des différentes roches

Catégorie du terrain	Caractéristiques du terrain	Terrai
8	Extrêmement dur	Quartzites, Basaltes
8	Très dur	Porphyre quartzeux, schistes siliceux, grès dur
7	Durs	Granite compacte, conglomérats durs, minerais de fer
7	Durs	Calcaire et grès durs, marbre, dolomite
6	Assez durs	Grès ordinaire
6	Assez durs	Grès schisteux
5	Moyens	Schistes argileux durs
5	Moyens	Schiste divers, marne compacte
4	Assez tendres	Schiste tendre, craie, sel gemme, sol gelé, galets
4	Assez tendres	Cailloutis, huile
3	Tendres	Argile compacte, limon compact

3	Terreux	Loess, gravier, charbon tendre
3	Terreux	Terre végétale, tourbe, sable humide
2	Friables	Sable, remblais
1	fluents	Sable fluents, tourbe, loess saturé d'eau

Ø Pour les roches dures, les outils de foration auront besoin de refroidissement et de lubrification ;

Ø Les débris de forage doivent être enlevés ;

Ø Les formations non consolidées exigeront l'appui pour éviter l'effondrement du puit. Ce qui caractérise une technique de forage d'une autre c'est :

Ø Le type d'outil qui découpe la roche: trépan, tricône, taillant ;

Ø La nature des fluides qui transporte les déblais (cuttings) ;

Ø Le sens de circulation du fluide (boue, air et eau) pour le système rotary: celui-ci est directe lorsque le fluide injecté à l'intérieur du train de tiges (garniture) et remonte les déblais par l'espace annulaire entre le forage et la garniture; il est inverse, lorsque le fluide descend dans ce même espace annulaire et remonte les déblais par l'intérieur du train de tiges.

Généralement l'objectif visé par la perforation et la nature du terrain à traverser, sont les principaux facteurs pris en considération lors du choix de la technique, alors que Les catégories du matériel sont choisies selon les spécifications du trou, diamètre, profondeur, position...

I.5. Conclusion

Le technicien se dispose des techniques et des méthodes d'étude, qui s'échelonnent depuis la simple observation de terrain, aux analyses très précisées en laboratoire.

Toutefois, il n'existe pas une ordonnance générale de ces méthodes, au contraire l'enchaînement des travaux devrait être conduite dans un esprit de stratégie et de tactique, afin de résoudre toutes les problèmes géologiques et hydrogéologiques et à répondre à l'objectif posé au préalable.

Il existe plusieurs méthodes de forage dont le choix est fonction des caractéristiques du formation rencontré et surtout de budget du projet mais jusque présent la méthode la plus utilisé est la méthode de système rationnelle.

Cours 9

Forage d'eau

plan

1. Introduction
2. Travaux au préalable (Travaux des surfaces)
 - Installation et organisation de chantier
 - Terrassement et aménagement de plateforme
 - Réalisations des fosses à boue et rigoles :
 - horizontalité de la sondeuse
3. Travaux de forage
 - 3.1. Avant puits et cimentation
 - 3.2. Sondage (forage) à petit diamètre de reconnaissance
 - 3.3. Diagraphies
 - 3.4. Essai à l'air lift
4. Elargissement et alésage
 - 4.1. Exécution d'un forage en 12"
 - 4.2. Exécution d'un forage en 17"
5. Mise en place des graviers siliceux roulés
6. Les analyses physico-chimiques et bactériologiques
7. Réalisation d'une margelle bétonnée
8. Capot de fermeture
9. Dispositif permettant les mesures de niveau
10. Identification du forage
11. Prévention aux risques de pollution
12. Conclusion

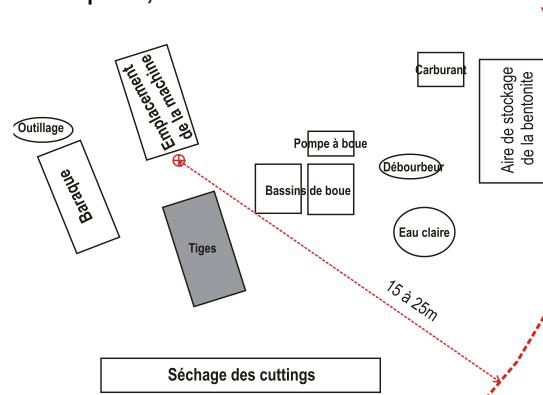
1. introduction

Les eaux souterraines sont très précieuses et ont une grande importance. Se trouvant à des profondeurs moyennes de 300m à l'horizon du complexe terminal plus ou moins important, il est toujours nécessaire de forer pour les explorer et les exploiter

2. Travaux au préalable

- Installation et organisation de chantier

Le plan d'installation du chantier (PIC) est un document graphique fondé du plan de masse pour déterminer les circuits des ouvriers des engins de chantier et les baraques, cantonnements et des installations techniques du chantier.



Installation du chantier de forage

D'une façon générale, un projet de forage d'eau ne peut être bien conçu et bien réalisé que s'il s'appuie sur une bonne connaissance du milieu.

Les considérations économiques ne doivent pas occulter la phase de collecte et d'analyse de l'information pour connaître :

➤ Le milieu physique depuis la surface jusqu'à l'objectif en profondeur : état du site du forage, sol superficiel et remblais éventuels, couches géologiques, niveaux aquifères ; ➤ Les zones à risques : zones inondables, zones d'instabilité du sous-sol (mouvements de terrain, carrières souterraines, dissolution et corrosion de la roche), zones de pollutions du sol... ;

➤ Les contraintes environnementales : périmètres de protection des captages pour l'eau potable, nappes surexploitées, périmètre du SAGE où les prélèvements de l'ensemble de la nappe sont limités, contrat de rivière, zones de sauvegarde de la ressource pour l'approvisionnement en eau potable, sauvegarde des milieux aquatiques dont les zones humides...

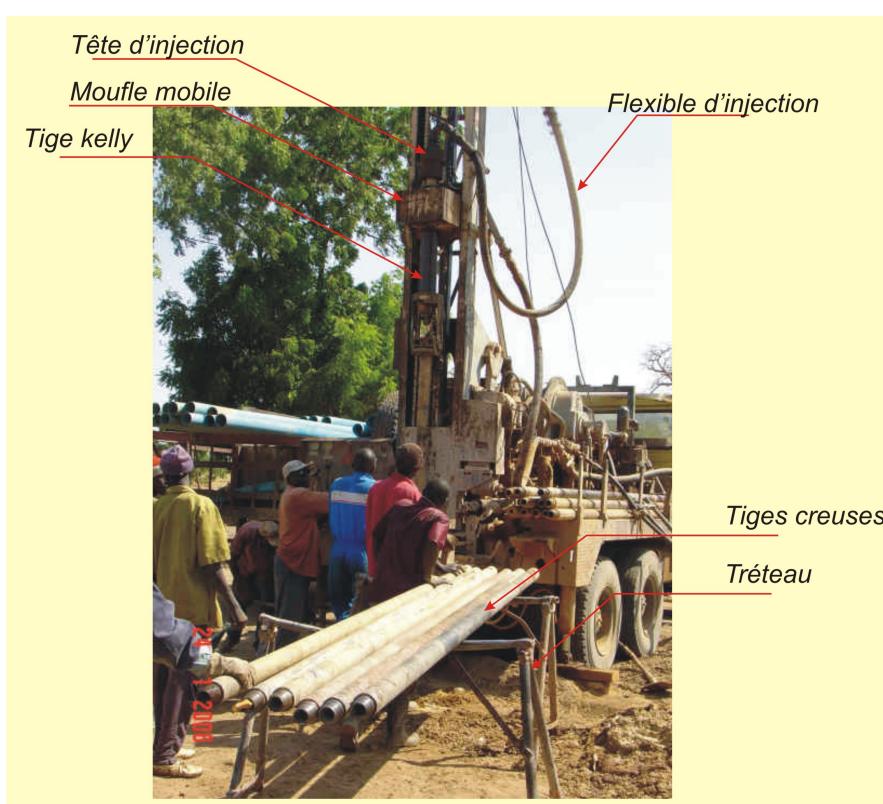
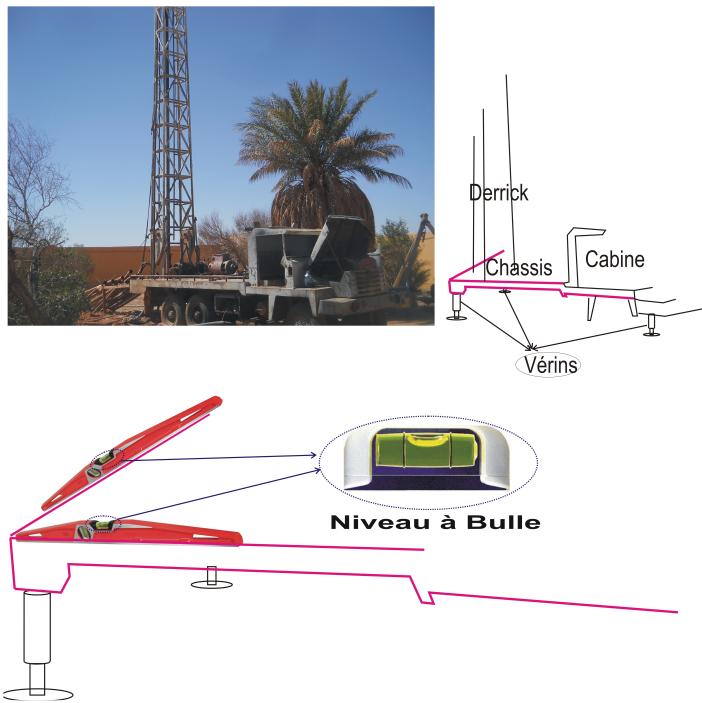


figure.....

- Terrassement et aménagement de plateforme permettent l'accès et l'installation correct de la sondeuse
- Réalisations des fosses à boue et rigoles :
- Horizontalité de la sondeuse



fidure horizontalité de la sondeuse

3. Travaux de forage

3.1. Avant puits et cimentation

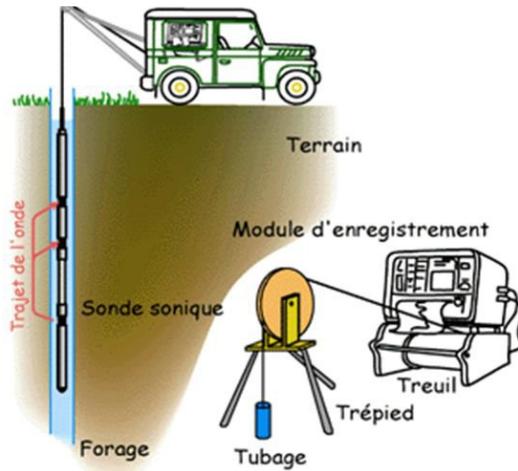
- Tube guide : exécution un forage en 24" (619 mm) et équipé par un tubage en acier de 20" (508mm) entre (10 à 20m) de la hauteur suivant le poids d'appareil pour assurer la stabilité et la verticalité, et cimenté l'espace annulaire par ciment type CRS.

3.2. Sondage (forage) à petit diamètre de reconnaissance

Le sondage ou la reconnaissance est un puits de petit diamètre de l'ordre de 8" à 12" (203.2mm et 304.8 mm) 1/4. Donc leur réalisation et équipement est similaire à ceux des forages d'exploitation. Les sondages (forages) de reconnaissance permettent de vérifier les hypothèses émises et apportent des informations indispensables (investigation, mesures et essais, prélèvement d'échantillons d'eau et de sol, observations périodiques) comme ils permettent d'effectuer des diagraphies et des essais de pompage.

3.3. Diagraphies

Elle consiste à utiliser différents dispositifs d'électrodes afin de mesurer des résistivités directement dans le trou de forage. Réaliser juste à la fin de la foration, pour permettre de localiser avec grande précision les zones productrices d'eau, et donc définir la position optimale des crépines.



3.4. Essai à l'air lift



4. Elargissement et alésage

4.1. Exécution d'un forage en 12"

Exécution d'un forage en 12" (304.8 mm) 1/4 Avec alésage de l'aquifère pour délimiter la longueur et la position de la crêpine. V.1.9. Tubes et Crêpines Le rôle de la crêpine 8" (203.2mm) 5/8 en acier inoxydable est d'éviter l'entrée de sables et des éléments fins de l'aquifère à l'intérieur de la colonne afin de ne pas être aspirés par la pompe, car ils constituent un grand risque pour cette dernière (corrosion, usure). La crêpine doit être placée dans une position où les caractéristiques hydrauliques sont les meilleures. Pour choisir cette position, on doit se baser sur :

- Les diagrphies instantanées.

- L'analyse granulométrique des échantillons.

4.2. Exécution d'un forage en 17"

5. mise en place des graviers siliceux roulés ou Massif filtrant (gravier additionnel)

Le rôle du gravier additionnel est d'augmenter les débits d'exploitation, de diminuer les vitesses d'écoulement, et d'éviter le risque d'érosion en évitant l'entrée des sables fins. Dans la pratique, le gravier additionnel est défini par la granulométrie de la formation espar l'ouverture de la crête. Il doit être uniforme, propre, calibré et siliceux de préférence. Et descend dans l'espace annulaire le long du tubage. Une remontée de boue par le tube de forage indique une descente correcte du gravier. Lorsque le niveau du gravier atteint le haut des crêtes, la boue ne remonte pas par le tube mais par l'espace annulaire : le massif de gravier doit alors dépasser le haut des crêtes sur quelques mètres. Le volume nécessaire du gravier peut être défini théoriquement (volume du trou moins volume de tubage) ou de la manière empirique suivante selon Edouard :

$$V = h \cdot 0,8 \cdot (D - d)$$

D'où V : le volume de gravier en litre.

h : hauteur du massif de gravier en m.

D : diamètre du trou en pouces.

d : diamètre des tubes en pouces.

6. Développement du forage

voir le cours 11 : **Développement du forage**

8. Analyses physico-chimiques et bactériologiques

L'eau de bonne qualité (potable) qui respecte les paramètres de norme algérienne :

-Les paramètres chimiques

la dureté (calcium, magnésium), PH (acidité), conductivité électrique (pour connaître la quantité de sels), fer, métaux lourds, les nutriments (azote, phosphate).

-Les paramètres biologiques

les pathogènes (bactéries, virus, parasites, ... etc.)

-Les paramètres physiques

la turbidité, couleur, odeur, etc. La plupart des analyses de qualité de l'eau doivent être réalisées en laboratoire.

.Condition techniques et précautions

La réalisation des travaux ne doit pas altérer la structure géologique avoisinante et la qualité des eaux, notamment lors des opérations suivantes :

- Injections de boues de forage ;
- Développement de l'ouvrage par acidification ou tout autre procédé ;
- Cimentations ;
- Obturations et autres opérations ;

9. **Prévention de toute pollution du milieu**

➤ Traitement des déblais de forage, des boues et des eaux extraites du forage par décantation, neutralisation ou toute autre méthode adaptée ;
➤ Dispositifs de traitement adaptés en fonction de la sensibilité des milieux récepteurs ;

A- Information au préfet :

- De tout incident ou accident susceptible d'altérer la qualité des eaux ;
- De la mise en évidence d'une pollution des sols et des eaux ;
- Des premières mesures prises pour y remédier ;

B- **Etablissement de la coupe géologique de l'ouvrage** :

➤ Lors des travaux, le déclarant fait établir la coupe géologique de l'ouvrage. En l'absence de supervision par un géologue, cette coupe est établie par le foreur. Cette coupe version « foreur » a minima, figurera dans le rapport de fin de travaux. L'organisation de chantier de forage doit permettre au foreur d'intervenir rapidement encas de problème. Les précautions à prendre doivent conduire à déterminer :

- Un périmètre de sécurité autour du chantier.
- Le bon choix de site du forage.
- Un approvisionnement en eau (citernes)
- Un accès facile pour le remplissage des fosses
- Une zone de déblais (cuttings)
- L'emplacement et le creusage des fosses à boue
- Le positionnement du compresseur de façon à ce qu'il ne reçoive pas la poussière de forage.

Réalisation d'une margelle bétonnée

- Conçue de manière à éloigner les eaux de la tête du forage
- Surface minimale de 3 m²
- Hauteur de 0,30 m au-dessus du niveau du terrain naturel

Réalisation éventuelle d'un local ou d'une chambre de comptage

- La margelle n'est pas dans ce cas nécessaire
- La hauteur du plafond du local est d'au moins de 0,50 m au-dessus du niveau du terrain naturel

V.6.3 Tête du forage • La tête du forage située à l'extérieur ou dans une chambre de comptage s'élève au moins à 0,50 m au-dessus du terrain

naturel ou du fond de la chambre decomptage dans lequel elle débouche. • La tête du forage située dans un local s'élève au moins à 0,20 m au-dessus du fond du local dans lequel elle débouche • La tête est cimentée sur 1 m de profondeur à partir du sol (niveau du terrain naturel) En zone inondable la tête est rendue étanche ou située dans un local lui-même

- Étanche

V.6.4. Capot de fermeture • Doit permettre un parfait isolement du forage (inondations, pollutions superficielles) • Dispositif de sécurité interdisant l'accès à l'intérieur du forage.

V.6.5. Dispositif permettant les mesures de niveau • Les conditions de réalisation et d'équipement d'un forage doivent permettre de relever le niveau statique de la nappe, au minimum par sonde électrique.

• Pour répondre à cette prescription on installera le cas échéant un tube guide de la sonde de mesure dans le forage, notamment lorsque l'objet principal du forage est la surveillance des eaux souterraines.

. Identification du forage

Le forage doit être identifié par une plaque mentionnant les références du récépissé de déclaration.

12. Conclusion

La réalisation d'un forage est une opération délicate, car la bonne réalisation en adoptant la technique de forage adéquate est en respectant les étapes de réalisation, c'est la clé d'un forage bien conçu et constitue la première étape vers une exploitation et gestion meilleur de cet ouvrage. En conséquence, la bonne conception d'un forage facilite le suivi et le diagnostic des pannes et dysfonctionnements ultérieurement.

Cours 11

Nétoyage et Développement forage d'eau

plan

1. Introduction
2. Principe du développement de forage
3. Techniques de développement
4. Conclusion

pour en savoir plus

1. Introduction

Lors de l'opération de forage, la boue de forage peut s'accumuler au niveau de l'aquifère.

Le développement d'un forage consiste donc en une amélioration de la perméabilité et la formation aquifère située autour de la crête et à stabiliser cette formation. Il faut savoir que la mise en production immédiate d'un ouvrage sans développement aurait des conséquences indésirables :

- . Elle ne permettrait pas d'optimiser le débit que pouvant être fourni par l'aquifère ;
- . Elle entraînerait très certainement d'importantes venues de sable (risques de dommages à la crête et à la pompe, de colmatage, de tassement du massif de gravier).

Le développement est donc destiné à parfaire le nettoyage du trou, de la crête et du massif de gravier et à améliorer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère autour de la crête, dans le but d'augmenter le débit exploitable et de produire une eau propre.

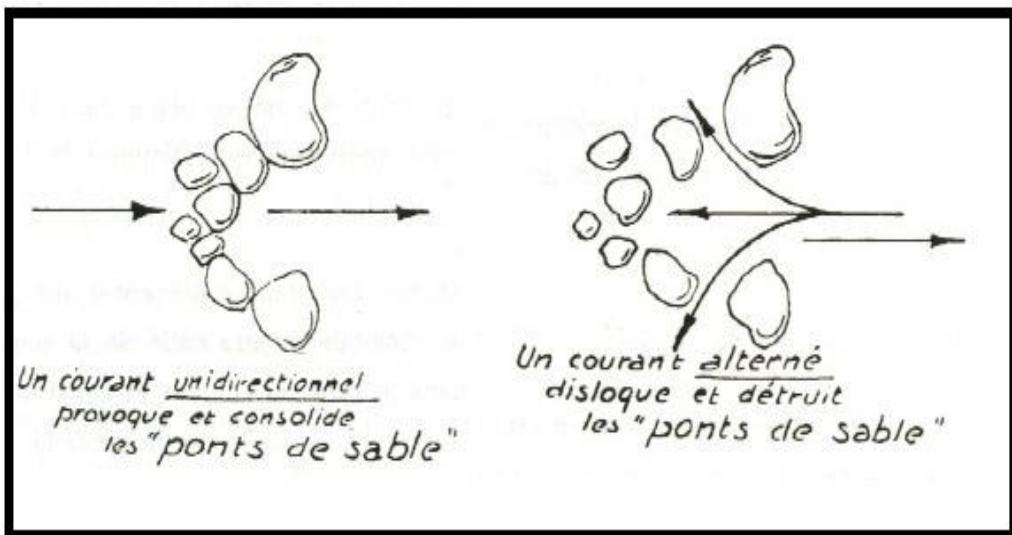
2. Principe De développement

Le développement d'un forage consiste, entre autres, à améliorer la perméabilité de la formation aquifère située autour de la crête et à stabiliser cette formation. Il consiste à éliminer les éléments fins qui colmatent naturellement le terrain et la boue de forage utilisée lors de la foration et à agrandir les fissures dans les roches massives fissurées. Il faut savoir que la mise en production immédiate d'un forage sans développement aurait des conséquences fâcheuses

3. Méthodes et technique de développement:

3.1. Développement par sur-pompage, dit aussi auto développement

- C'est une méthode simple. Elle consiste en un pompage à un débit très supérieur au débit d'exploitation estimé ;
- Il y a des risques de développement irrégulier selon les variations verticales de perméabilité du terrain ;
- Il est possible que ce type de développement provoque une compaction des sédiments fins entraînant une diminution de la perméabilité ;
- Il y a enfin des risques de création de « ponts de sable » et donc d'une diminution de la perméabilité, par un flux unidirectionnel (figure..)



Un courant unidirectionnel

Un courant alterné disloque et détruit provoque des ponts de sable les ponts de sable

figureCréation et élimination des « ponts de sable » autour de la crête (d'après A. ABILLOT, 1971).

Certains matériaux, même très fins, s'arrangent les uns contre les autres et formeront des voûtes, renforcées par les courant uniforme et d'autant plus solides qu'elles seront consolidées par autres matériaux plus grossiers qui viendront s'y ajouter.

Ces points aboutiront vite au colmatage de la formation et se traduiront soit par une augmentation de vitesse dans les voies restées libres avec risque d'érosion consécutive, soit par freinage important du flux et une réduction massive de la capacité spécifique de l'ouvrage.

Seul, un développement provoqué, bien conduit, et un flux alterné peuvent disloquer les points de sable, modifier les arrangements des

particules et ouvrir la formation au libre passage du courant.

3.2. Développement par pompage alterné

- Alternance de démarrages et d'arrêts brusques de la pompe afin de créer de brèves et puissantes variations de pression sur la couche aquifère, inversant le flux à travers la crêpine ;
- Facilite la destruction des ponts de sable ;

3.3. Développement par pistonnage

- Mouvement vertical ascendant et descendant d'un piston dans l'ouvrage créant, à la descente, une compression de la nappe avec refoulement de l'eau et des fines dans la formation et, à la remontée, une dépression attirant les fines et l'eau dans la crêpine (les fines sont ensuite récupérées dans la crêpine) ([Figure 2](#)) ;
- Pour être efficace le piston doit rester dans la partie supérieure non crépinée ;
- Inversion du flux à travers la crêpine permettant l'élimination des ponts de sable.

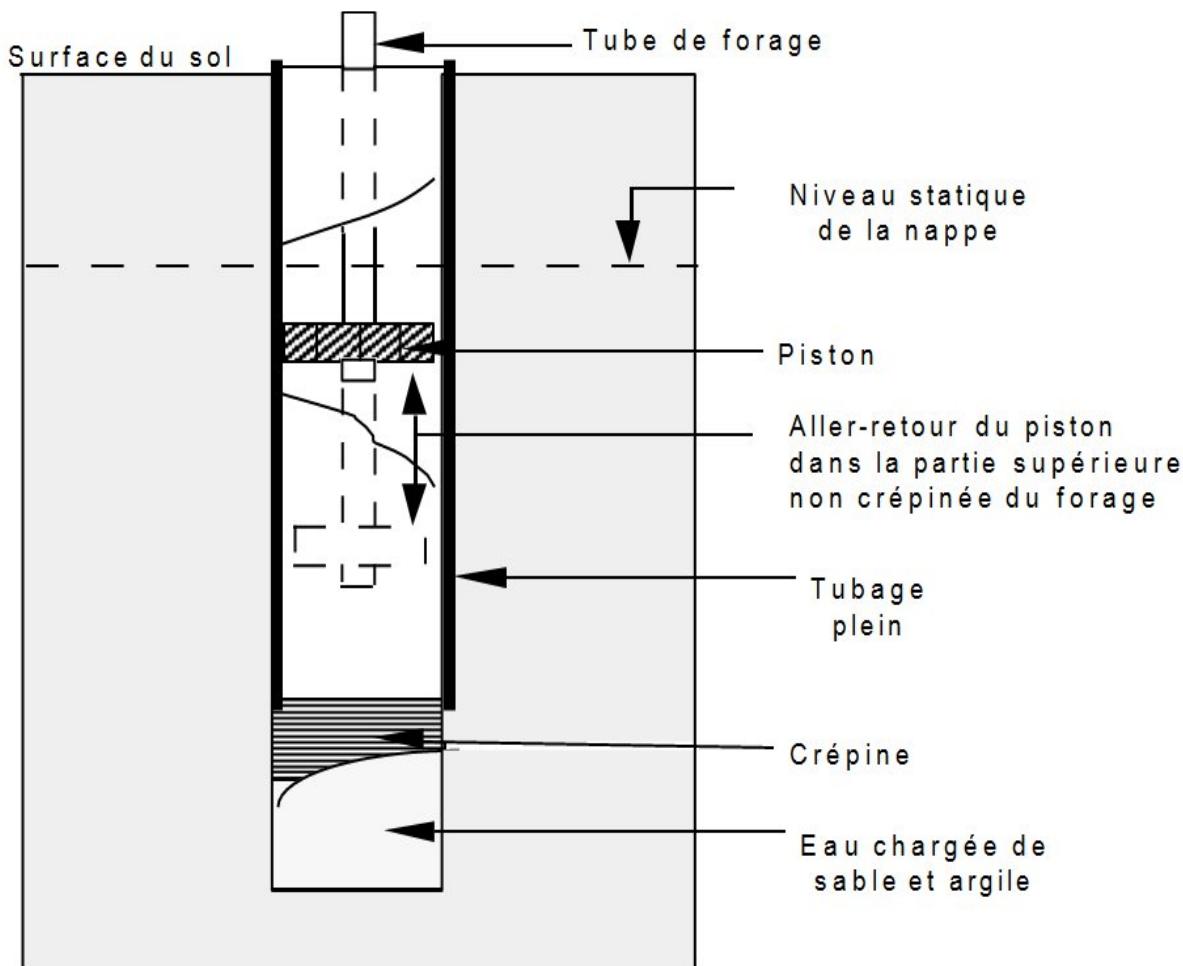


Figure 2 Développement par pistonnage

3.4. Développement par lavage aux jets d'eau sous pression

- C'est une méthode simple, dans laquelle un outil à jets d'eau sous pression permet, par rotation et déplacement vertical, de traiter toute la longueur de crépine (figure 3).
- Les particules fines pénètrent dans la crépine où elles sont récupérées ensuite par pompage ou avec une soupape ;
- L'efficacité du procédé dépend du type de crépine : elle sera maximale pour des crépines à ouverture continue du type Johnson.

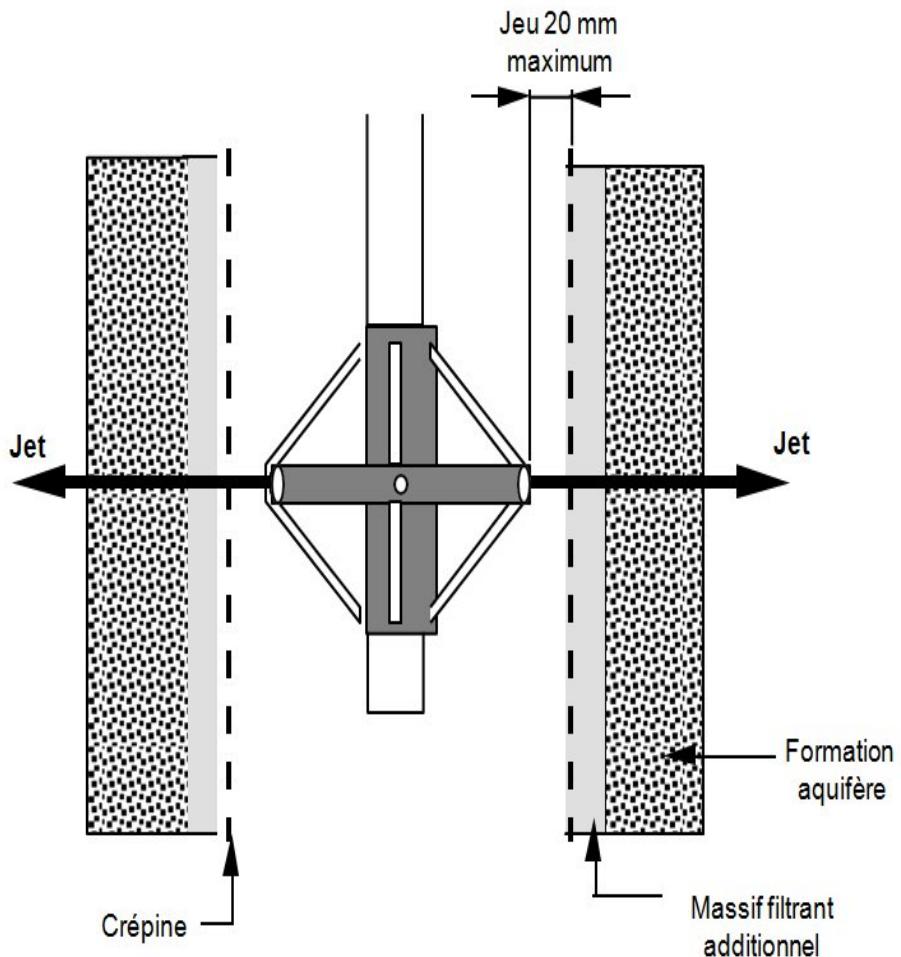


Figure 3 Schéma du développement au jet sous pression.

7.1 Le nettoyage du forage Au rotary à la boue, il s'agit de laver les parois du forage à l'eau claire pour éliminer le "cake". L'idéal est d'alléger la boue autant que possible sans pour autant risquer d'effondrer le forage juste avant la mise en place de l'équipement. Une fois tubé, l'injection d'eau propre depuis la surface permet de rincer abondamment les crêpines et le gravier filtre qui sont colmatés avec la boue de forage. On alternera les phase de rinçage et les phases de pompage par air lift dans le forage pour sortir de l'eau claire.

7.2 Le développement Le développement d'un forage est une étape très importante qui permet d'éliminer la plupart des particules fines du terrain et du gravier filtre qui pourraient pénétrer dans le forage ainsi que le reste du cake de boue et d'arranger le terrain autour de la crêpine afin d'en augmenter la perméabilité. Cette opération permet d'augmenter de façon significative le débit du forage initialement estimé. La nappe est en effet progressivement mise en production, l'aquifère est libéré de ses fines, la perméabilité et le débit instantané augmentent.

3.5. Développement chimique

Les agents chimiques utilisés peuvent être des acides ou des polyphosphates.

— Les acides sont particulièrement efficaces dans les roches solubles carbonatées (calcaires, dolomies).

En général, on utilise de l'acide chlorhydrique dilué. Le volume d'acide à utiliser augmente à chaque opération d'acidification : il varie de 2 à 5 fois le volume du trou à acidifier.

conclusion

Le nettoyage du forage Au rotary à la boue, il s'agit de laver les parois du forage à l'eau claire pour éliminer le "cake". L'idéal est d'alléger la boue autant que possible sans pour autant risquer d'effondrer le forage juste avant la mise en place de l'équipement. Une fois tubé, l'injection d'eau propre depuis la surface permet de rincer abondamment les crépines et le gravier filtre qui sont colmatés avec la boue de forage. On alternera les phase de rinçage et les phases de pompage par air lift dans le forage pour sortir de l'eau claire.

Le développement Le développement d'un forage est une étape très importante qui permet d'éliminer la plupart des particules fines du terrain et du gravier filtre qui pourraient pénétrer dans le forage ainsi que le reste du cake de boue et d'arranger le terrain autour de la crépine afin d'en augmenter la perméabilité. Cette opération permet d'augmenter de façon significative le débit du forage initialement estimé. La nappe est en effet progressivement mise en production, l'aquifère est libéré de ses fines, la perméabilité et le débit instantané augmentent.

- Plan

Cours 12

Nettoyage et développement de forage d'eau

Introduction

Le nettoyage et le développement de forage d'eau consistent à éliminer les débris, sédiments et fluides de forage pour améliorer le débit, tandis que le développement vise à améliorer la productivité du forage en nettoyant le réservoir autour des crépines. Des documents PDF sur le sujet incluent des guides de procédures de développement, de désinfection (par exemple, avec du chlore) et d'entretien général des forages.

Nettoyage

- **Principe :**

Il s'agit d'éliminer les débris, les sédiments et les boues qui obstruent le forage après sa construction.

- **Méthodes :**

- Injection d'eau à haute pression ([hydroforage](#)).
- Pompage pour évacuer les sédiments.

Développement

- **Principe :**

Optimiser le débit d'eau en rendant les pores de l'aquifère plus perméables autour des crépines.

- **Méthodes :**

- Chaque méthode de nettoyage peut être utilisée pour le développement, en fonction de l'objectif de performance.
- Les méthodes incluent des techniques comme l'injection d'eau sous pression (hydroforage) pour déloger les matériaux et améliorer le débit.

Maintenance et désinfection

- **Inspection :**

Des inspections régulières sont recommandées pour prévenir les problèmes.

- **Désinfection :**

Utilisation de produits chlorés comme le HTH pour éliminer les bactéries et les germes.

- Des instructions détaillées peuvent être trouvées dans des guides, qui couvrent le dosage, le mélange et le rinçage de l'eau de javel, et la désinfection de la tuyauterie domestique si nécessaire, voir des sources comme [Scribd](#) et [Les Puits du Québec](#).

Documents PDF pertinents

- ["Procédures de développement de forages" par l'UNICEF, disponible sur le site du Programme Solidarité Eau.](#)
 - ["Conception et réalisation de forages" par le DINEPA.](#)
 - Des présentations sur le nettoyage et la désinfection, souvent liées à l'hygiène et à l'eau, sont aussi disponibles sur des sites comme Scribd.
 - [PROCEDURES DE DEVELOPPEMENT DE FORAGES ...](#)
- Le développement d'un forage consiste à nettoyer la zone de l'aquifère à proximité

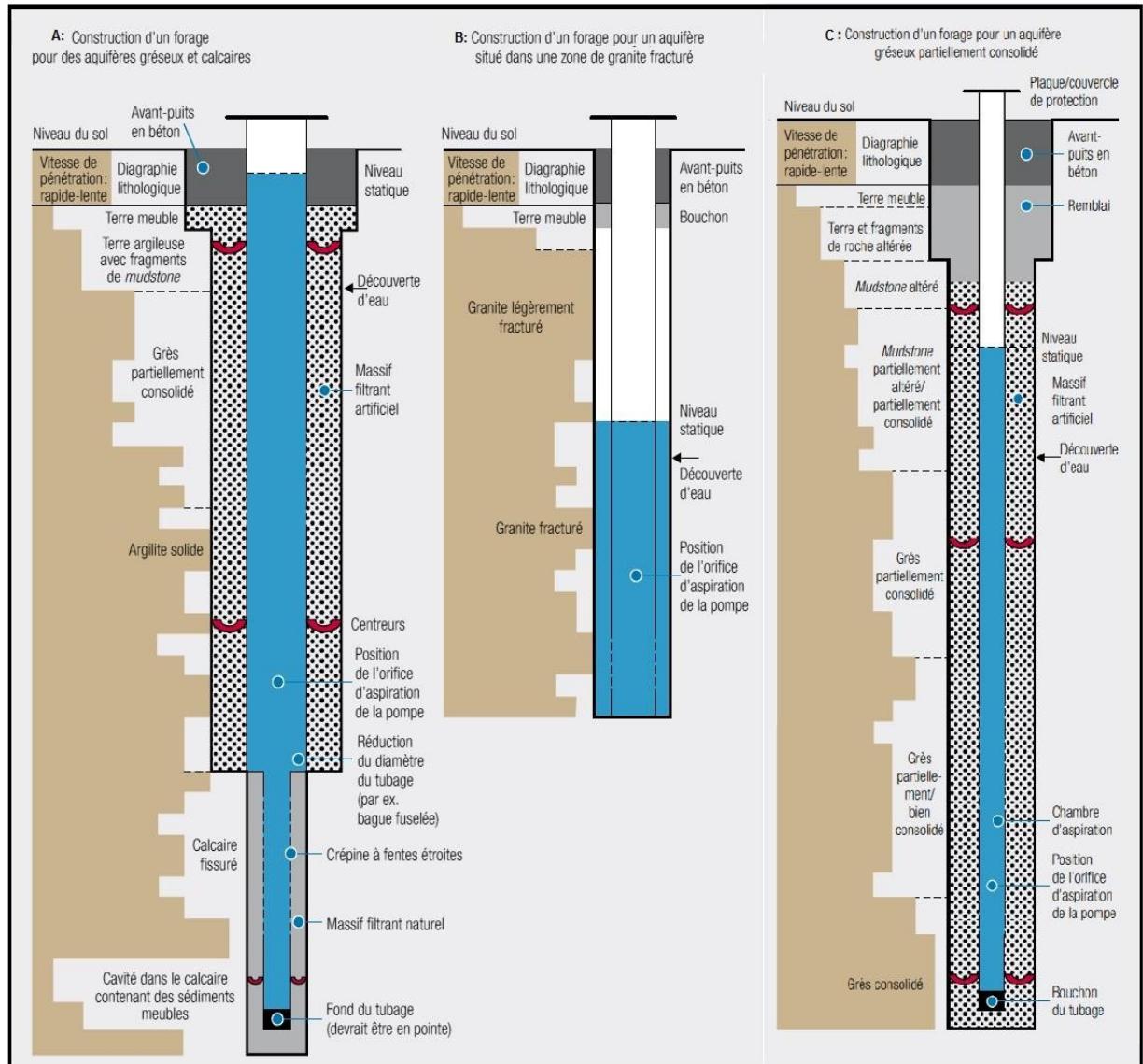
immédiate des crépines afin d'éliminer tous déb...

Programme Solidarité Eau

• Nettoyage et Désinfection des Forages | PDF | Chlore | Eau - Scribd

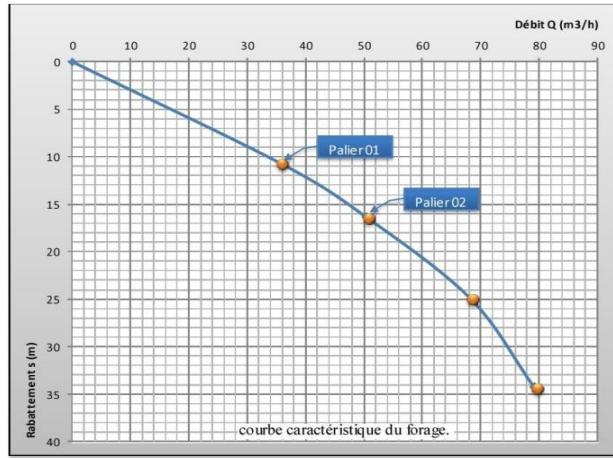
Le document décrit les méthodes de nettoyage et de désinfection des forages, notamment l'injection d'eau sous haute pression, le c...

- qui permet de protéger le forage contre la contamination de surface. Les deux derniers mètres de l'espace annulaire au minimum (en principe la section qui était protégée par le tube guide durant le forage) devraient être nettoyés et élargis, éventuellement en carré, autour du tubage définitif. En dessous, l'espace annulaire du forage au-dessus du massif filtrant devra être remblayé par un bouchon composé de gravier ordinaire, de gravillons, de granulés de bentonite, ou simplement de déblais du forage. Le nouveau trou réalisé pour l'avant-puits peut ensuite être rempli de ciment jusqu'au niveau du sol, ou de préférence légèrement au-dessus (Fig. 70). Pour les forages où le niveau statique de l'eau est élevé, et qui sont couverts par une couche superficielle perméable, on ne peut pas faire grand-chose d'autre que de prendre soin à ne pas renverser d'eau usée autour du trou.



• Figure 70: Différents types d'avant-puits.

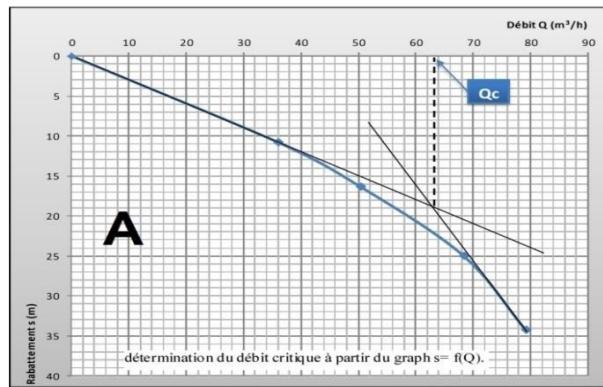
- **Essais de pompage**
- Une fois le forage terminé et l'avant-puits mis en place, un essai de pompage est effectué. Il a pour objectifs :
 - la détermination des différentes caractéristiques hydrodynamiques de la nappe aquifère :
 - la perméabilité K
 - la transmissivité T
 - l'étendue de la nappe : le rayon d'action Ra (rayon d'influence)
 - le coefficient d'emmagasinement S
- le réglage optimal d'exploitation d'un forage pour éviter la surexploitation et l'assèchement de la nappe, à travers :
 - la détermination du débit spécifique, du rabattement spécifique, la productivité de l'ouvrage, le débit maximum admissible et le rabattement maximum admissible.
 - la détermination des durées et des périodes de pompage.
 - la détermination de la position optimale pour l'emplacement de la pompe.
- Les tests de pompage sont d'autant plus importants que le prélèvement envisagé est élevé. On distingue les essais de pompage par paliers et les Essais de pompage à débit constant.
 - **Essai de pompage par paliers** : L'entreprise de forage réalisera un pompage par paliers croissants de débits constants : au minimum 3 paliers de 1heure chacun, avec mesures et enregistrement des débits et de la profondeur du niveau dynamique. Afin de permettre l'interprétation la plus juste, il est préférable de ne pas enchaîner les paliers de débits, mais de les séparer d'un arrêt de pompage jusqu'à un retour au niveau statique initial, ou sur une durée égale à celle du palier de pompage (1heure). Pour un débit d'exploitation envisagé supérieur à 20m³/h, il est préférable de mettre en œuvre des paliers d'une durée de 2heures. **Par exemple** : Si le débit de purge a été mesuré à un débit de Q litres par seconde, il peut être conseillé d'effectuer un essai de pompage par paliers de la manière suivante : pomper d'abord le forage pendant une heure à un débit de Q/4 litres par (palier 1, débit q₁) et on attendre la remontée de niveau une heure, puis pendant une autre heure à Q/2 litres par seconde (palier 2, débit q₂) et on attendre la remontée de niveau une heure, puis pendant une troisième heure à 3Q/4 litre par seconde (palier 3, débit q₃) et on attendre la remontée de niveau une heure et, enfin, pendant une quatrième heure à Q litre par seconde (palier 4, débit q₄) devrait légèrement sur-pomper le forage. Ce test doit être interrompu si le rabattement s'approche de l'orifice d'aspiration.
- Les résultats d'un essai par paliers peuvent être analysés de différentes façons, dont certaines sont très complexes, mais la méthode la plus utilisée est : (P. Dross.2011).
 - **Courbe caractéristique de forage** : les quatre couples débit-rabattement obtenus, ont permis d'établir la courbe caractéristique (Fig.71) qui représente la 'fiche santé' du forage. Elle est caractérisée par son équation qui est de la forme : $s = BQ + CQ^2$
- Avec : Q : représente le débit de pompage par m³/h. S : représente le rabattement mesuré à un temps t en m. B et C : des constants représentent les pertes de charge.
- La courbe caractéristique montre une pente régulière dans sa partie initiale et une partie terminale qui s'incurve.



○ ○ Figure 71: La courbe caractéristique de forage.

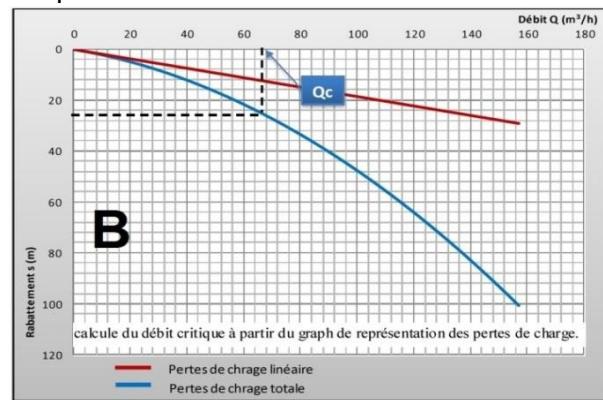
- **Détermination du débit critique :** La différence entre la droite $s = BQ$ et l'axe des x donne pour chaque débit la valeur des pertes de charge linéaire. Et la différence entre la droite et la courbe $s = BQ + CQ^2$ donne pour chaque débit, la valeur du terme CQ^2 , c'est-à-dire la valeur des pertes de charge quadratique. Lorsque le débit augmente les pertes de charge quadratique augment d'une façon considérable. Le débit critique est en relation avec le graphe $s = f(Q)$ à partir de l'augmentation de la pente du courbe $s = BQ + CQ^2$ et on peut estimer qu'il est atteint quand les pertes de charge linéaire égalent les pertes de charge quadratiques.

- A ce débit la vitesse de circulation de l'eau dans les crêpines atteint sa valeur critique et l'écoulement devient turbulent. Ce régime turbulent augmente de façon considérable, les pertes de charge quadratiques diminuant par la même le rendement de l'ouvrage. En outre, il peut provoquer un entraînement de particules fines du terrain et un colmatage de la partie captant. On peut utiliser deux méthodes pour calculer le débit critique :
- **La première méthode** (Fig.72) : A partir de l'augmentation de la pente du courbe $s = BQ + CQ^2$. Au débit $63 \text{ m}^3/\text{h}$ la courbe subit une augmentation de la pente causée par une augmentation du rabattement.



○ Figure 72 : Détermination du débit critique (méthode 1)

- **La deuxième méthode** (Fig.73) : C'est Par l'extrapolation de la courbe, on peut estimer que le débit critique atteint quand les pertes de charge linéaire égale les pertes de charge quadratiques.
- Au débit $63 \text{ m}^3/\text{h}$ les pertes de charge linéaire égale les pertes de charge quadratique.
- D'après les graphs, on peut estimer que le débit critique est de l'ordre de $63 \text{ m}^3/\text{h}$ et que lui correspond un rabattement théorique de 23.17 m .



○ Figure 73: Détermination du débit critique (méthode 2)

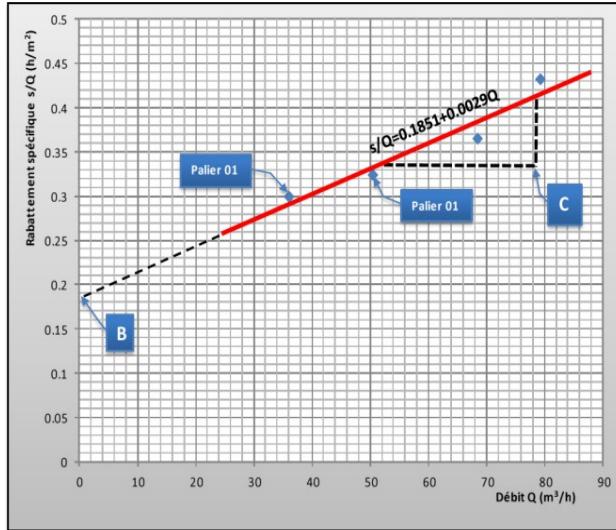
■ Calcul des pertes de charge

- D'après l'équation de Jacob : $s = BQ + CQ^2$
- On devise cette équation par Q , on obtient l'équation suivante : $s/Q = B + CQ$
- Qui est l'équation d'une ligne droite Avec: s/Q : représente le rabattement spécifique en h/m^2 . Le tableau 1 du rabattement spécifique, permet obtenir quatre couples débit-rabattement spécifique (Tab.9) qui nous permettent de tracer la courbe des pertes de charge.

○ Tableau 9 : Calcule rabattement spécifique de forage.

Numéro de palier	Rabattement maximal (m)	Débit (m ³ /h)	Rabattement spécifique (h/m ²)
1	10.79	36	0.29
2	16.35	50.4	0.32
3	24.99	68.4	0.36
4	34.26	79.2	0.43

- La courbe (Fig. 74) est une ligne droite qu'est de l'équation suivante : $s/Q = B + CQ$
- Avec : B : représente le coefficient de perte de charge linéaire (c'est le point de l'intersection de la droite avec l'axe des y). C : représente le coefficient de perte de charge quadratique (c'est la pente de la droite).
 - Figure 74: La droite des pertes de charge dans le forage.
- D'après le graph les coefficients de perte de charge est : $B = 1.85 \cdot 10^{-1} \text{ h/m}^2 = 6.66 \cdot 10^2 \text{ s/m}^2$



$$C = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ h}^2 / \text{m}^5 = 3.76 \cdot 10^4 \text{ s}^2 / \text{m}^5$$

- Alors l'équation de courbe caractéristique s'écrit : $s = 1.85 \cdot 10^{-1}Q + 2.9 \cdot 10^{-3}Q^2$ avec : Q : en m^3 / h et s en m.
- Ou bien : $S = 6.66 \cdot 10^2 Q + 3.76 \cdot 10^4 Q^2$
- avec : Q : en m^3 / s et s en m.
- La valeur du coefficient C, exprimée en mine/ms, reflète la condition du puits pompe. Une valeur de C inférieure à 0,5 mine/ms indique un puits correctement conçu et bien développé. Une valeur de C comprise entre 0,5 et 1,0 $\text{min}^2 / \text{m}^5$ indique un puits soft assez mal conçu soft légèrement colmate ou détériore. Une valeur de C comprise entre 1,0 et 4,0 $\text{min}^2 / \text{m}^5$ indique un puits soit très mal conçu soit sévèrement colmate ou détériore. Une valeur de C supérieure à 4,0 $\text{min}^2 / \text{m}^5$ indique un puits extrêmement mal conçu ou Si sévèrement colmate ou détériore qu'il sera difficile de le restaurer.
- Dans le cas de notre forage la valeur du coefficient $C=0.174 \text{ min}^2/\text{m}^5$ qui indique un puits correctement conçu et bien développé.
- A partir de l'équation $s = f(Q)$ il est possible d'établir la répartition théorique des pertes de charge en fonction des débits (Tab.10).

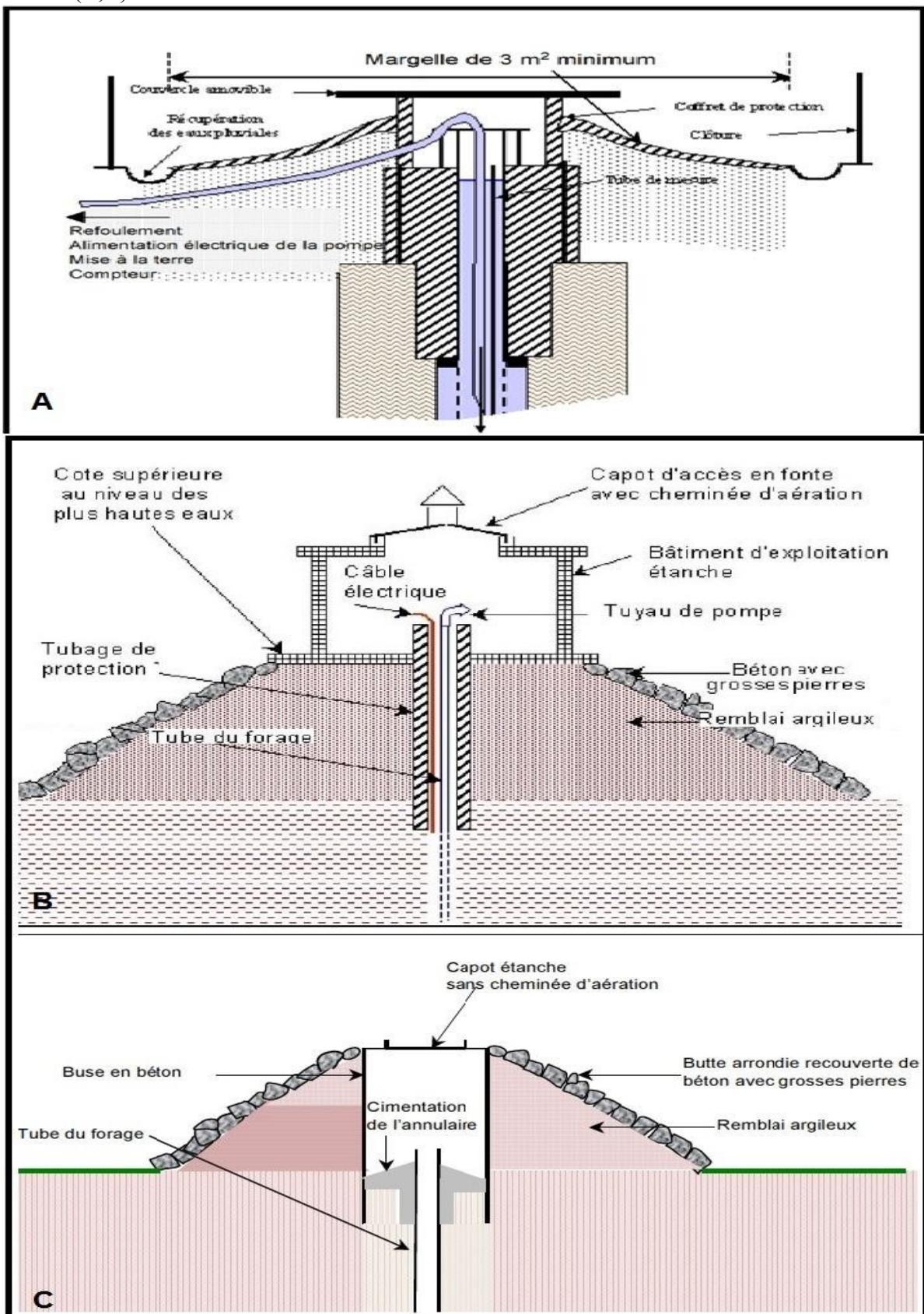
- Tableau 10: Calcule des pertes de charge dans le forage en fonction de débit pompé.

Débit m ³ /h	Pertes de charge laminaires		Pertes de charge quadratiques	
	m	%	m	%
36	6.664	63.94	3.75	36.06
50.4	9.329	55.88	7.36	44.12
68.4	12.66	48.27	13.57	51.73
79.2	14.66	44.63	18.19	55.37

- **Détermination du débit d'exploitation autorisé :** La courbe caractéristique montre un écoulement turbulent permanent aux débits supérieurs à 63 m³/h. De plus les pertes de charge quadratiques s'accroissent de façon considérable à ce débit. En conclusion, le débit d'exploitation autorisé est inférieur à 63 m³/h. Le débit d'exploitation sera fixé à 10% en dessous de ce débit critique. Alors le débit d'exploitation maximal autorisé sera 56.7 m³/h, qui correspond à un rabattement théorique de 19.8 m.
- **Essai de pompage à débit constant :** Une fois que ce test a permis d'estimer le débit de production, il faudrait le confirmer en pompant à un débit constant pendant au moins 24 heures (pour les forages à haut débit, le pompage durera 48 heures), la durée la plus communément admise est de 72 heures. C'est ce qu'on appelle un test à débit constant. Le rabattement devrait être mesuré à intervalles réguliers tout au long du test. À la fin du test, dès que la pompe est arrêtée, le niveau de l'eau devrait être surveillé à mesure qu'il remonte (jusqu'au niveau statique de l'eau). Si le niveau de pompage se stabilise à un niveau sans danger au-dessus des crépines et de l'orifice d'aspiration, cela signifie que ce débit de production est approprié.
- De nombreuses publications traitent de l'analyse des données des essais de pompage et de leur applicabilité à la modélisation d'aquifères. Même si un programme de forage particulier ne requiert pas ce type d'analyses, les données du terrain devraient être considérées comme une ressource précieuse et conservées, car elles pourraient être utiles à l'avenir. Par exemple, si un des forages connaît une baisse de rendement et doit être réhabilité, les résultats d'un essai de pompage effectué après la réhabilitation pourraient alors être comparés avec le premier essai afin d'évaluer le degré de détérioration permanente.
- **Equipement d'exhaure dans le forage**
- L'équipement de l'ouvrage doit permettre d'extraire l'eau de la nappe que l'on souhaite exploiter tout en préservant cette eau des pollutions depuis la surface ou par les eaux d'autres nappes. Pour ne pas aborder l'ensemble des équipements, je les regroupe dans deux catégories : tête de forage et équipements nécessaires au pompage.

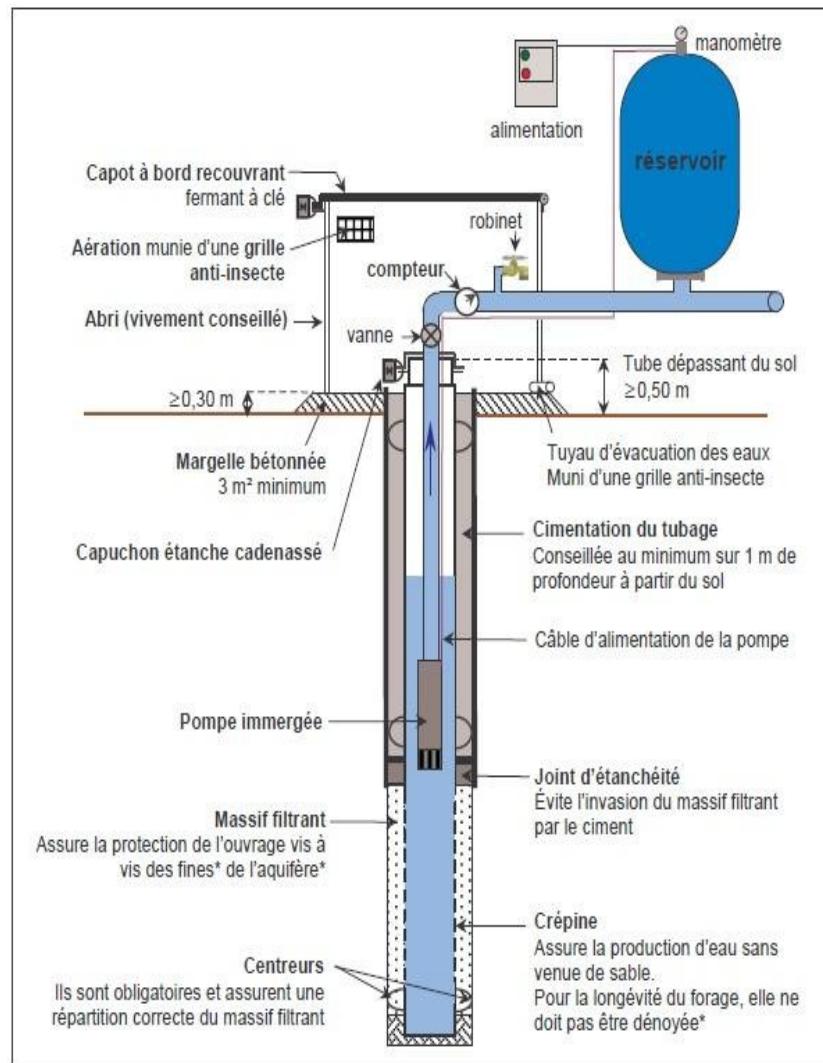
- **La tête de forage :** A la fin des essais de pompage, le responsable devrait confirmer la profondeur totale du forage et le niveau dynamique de l'eau à l'aide d'une sonde piézométrique pour déterminer les conditions de la mise en place de la pompe. Enfin, c'est l'équipement de la tête de forage qu'il faut réalisée. Elle est pour objectifs :
 - Empêcher les eaux de surface, de ruissellement ou d'inondation, éventuellement polluées le long de la face extérieure du tubage ou de pénétrer à l'intérieur du forage et d'entrer ainsi en contact avec la nappe
 - Empêcher l'introduction d'objets divers ou de substances dans le forage
 - Contenir les éventuels phénomènes d'artésianisme
 - Adapter le type de protection retenue de manière à ce qu'elle soit compatible avec la liaison entre le forage et l'installation de la pompe à chaleur.
 - La tête de forage présente les caractéristiques suivantes :
 - **Hauteur au-dessus de sol**
 - La tête du forage située à l'extérieur ou dans une chambre de comptage s'élève au moins à 0,50 m au-dessus du terrain naturel (Fig.75A) ou du fond de la chambre de comptage dans lequel elle débouche
 - La tête du forage située dans un local s'élève au moins à 0,20 m au-dessus du fond du local dans lequel elle débouche
 - La tête est cimentée sur 1 m de profondeur à partir du sol (niveau du terrain naturel)
 - En zone inondable la tête est rendue étanche ou située dans un local lui-même étanche (Fig.75 B, C).
 - **Dalle**
 - Le tubage de forage doit être correctement étanché, cimenté et scellé dans une margelle bétonnée (dalle de propreté étanche).
 - Dimension de la dalle : une surface minimale de 3 m² et une hauteur de 0,30 m au-dessus du niveau du terrain naturel (conçue de manière à éloigner les eaux de la tête du forage).
 - Elle doit être sans fissure et permettre par ses pentes d'évacuation de l'eau de pluie vers l'extérieur.
 - **Capot de fermeture**
 - Un capot constitué d'un bouchon étanche est obligatoire.
 - Une ouverture doit être prévue pour le passage du guide sonde et munie d'un bouchon vissé.

- La tête de forage doit disposer de protection verrouillage contre l'introduction des objets ou substance, avec ouverture impossible sans une clé ou un outil spécial.
 - Figure 75: Schémas des têtes de forage en terrain naturel (A) et en terrain inondable (B,C).



○ **Les équipements nécessaires au pompage :** Les équipements de forage (Fig.76) comprennent :

- la pompe, généralement immergée dans le forage, et toujours équipée d'un clapet antiretour,
- la colonne de refoulement,
- les câbles d'alimentation de la pompe,
- un capot permettant le passage de la colonne, des câbles et du tube guide-sonde ; les passages doivent garantir l'étanchéité,
- un compteur totalisant les volumes prélevés.



○ Figure 76: Schéma d'un forage correctement aménagé.

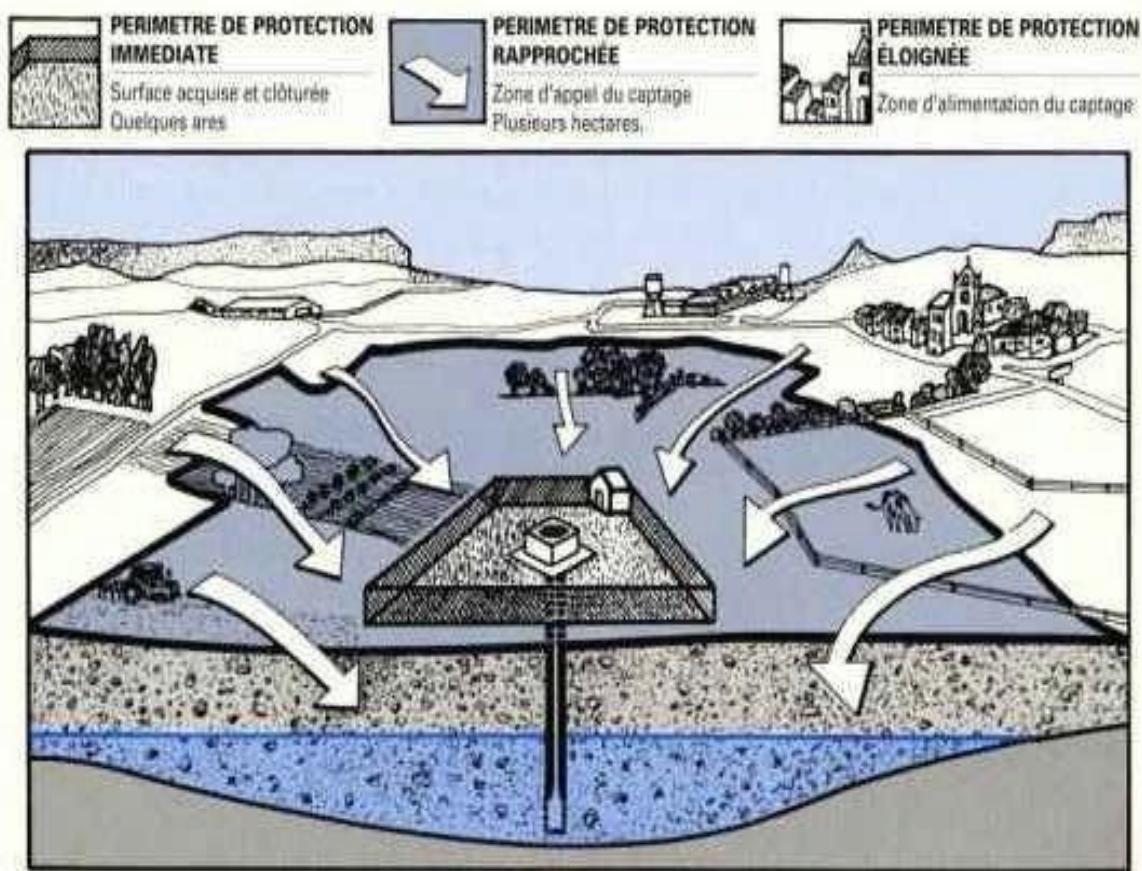
• **Nettoyage et désinfection**

- Dans le cadre d'un forage AEP pour lequel la ressource ne peut être traitée avant distribution, la plus grande attention sera prise pour éviter toute rétro pollution par la surface. Cela passe par un nettoyage et une désinfection des matériaux introduits dans l'ouvrage à demeure ou en provisoire et des mesures d'hygiène renforcées de la part des intervenants sur site.

- Les produits mis en œuvre doivent présenter une compatibilité alimentaire sans rémanence d'action à long terme. Leur sélection tiendra compte de la physico-chimie des eaux. On peut préconiser du chlore industriel, pour ces opérations, le temps de contact ira de 30 minutes à 2 heures.
- La quantité de chlore nécessaire dépend du volume d'eau contenu dans le forage. Il faut incorporer 1 litre de solution chlorée à 0,2% par 100 litres d'eau du puits (ou 1 litre de solution à 0,27% de HTH à 65% de pureté). L'eau du puits doit être mélangée avec la solution chlorée et reposer au moins 30 minutes.
- Le volume de solution chlorée doit être calculé en fonction des paramètres dimensionnels du puits
- Les produits de désinfection sont généralement des produits dangereux à amenés concentrés sur sites, les opérations de dilution, d'injection et de gestion des rejets nécessitent des précautions d'usage (communication des fiches produits, procédures préalables, matériel et vêtements de sécurité). On se référera à la fiche technique sur la Fabrication de solutions chlorées.
- Il faut faire des contrôles avant et après l'emploi du produit, ces contrôles doivent comporter des mesures terrains de concentration des produits, ainsi que des prélèvements et mesures sur l'eau (physico-chimiques et bactériologiques).
- **Suivi et rapport de forage**
- A la fin des travaux les informations essentielles seront reprises sur le rapport de forage, qu'il soit sec ou en eau. La rédaction de ce document est de la responsabilité de l'hydrogéologue, responsable de la campagne ou de l'entreprise de forage. Ces rapports sont une source d'information précieuse pour le projet, mais aussi pour constituer une banque du sous sol. Ils doivent donc être centralisés au niveau du projet mais également remis aux autorités locales compétentes qui peuvent dans certains cas préconiser une forme standard pour tous les intervenants travaillant sur une zone. Ces rapports sont archivés par forage, dans lesquels se trouvent également toutes les informations techniques sur ce point d'eau :
- Déroulement général du chantier : dates des différentes opérations, difficultés et anomalies rencontrées.
- Nombre de forages effectivement réalisés en indiquant pour chacun d'eux s'ils sont conservés, leur localisation précise sur fond de carte IGN au 1/25000, les références cadastrales de la parcelle sur laquelle ils sont implantés.
- Coordonnées géographiques (en Lambert II étendu), cote NGF de la tête du forage.

- Pour tout forage, coupe géologique avec indication du ou des niveaux des nappes rencontrées et coupe technique de l'installation précisant les caractéristiques des équipements: diamètres et nature des cuvelages ou tubages, conditions de réalisation (méthode et matériaux utilisés lors de la foration, volume des cimentations, profondeurs atteintes, développement effectués...).
- Modalités d'équipement des ouvrages conservés.
- Compte rendu des travaux de comblement des ouvrages abandonnés.
- Résultat des pompages d'essais, interprétation et évaluation de l'incidence de ces pompages sur la ressource en eau souterraine et sur les ouvrages voisins.
- Résultats d'analyses d'eau le cas échéant.
- Informations relatives aux sondages de reconnaissance pour un forage destiné à l'AEP.
- **Protection des captages d'eau souterraine**
- Des périmètres de protection sont instaurés autour des captages publics d'eau destinée à la consommation humaine. Ils correspondent à un zonage établi autour des points de captage d'eau potable (Fig.77). Ils constituent le moyen privilégié pour prévenir et diminuer toute cause de pollution locale, ponctuelle et accidentelle qui peut altérer la qualité des eaux prélevées. Les interdictions, prescriptions et recommandations sont proposées en conséquence:
 - **Périmètre de protection immédiat (PPI)** : Ce périmètre correspond au site de captage. Il est acquis en pleine propriété par le maître d'ouvrage. Autant que possible, ce périmètre doit être clôturé par un grillage infranchissable, muni d'un portail fermant à clés. Son rôle est d'empêcher la détérioration des installations et le déversement de substances polluantes à proximité du lieu de prélèvement. Hormis les opérations d'entretien, aucune activité n'est permise. Le périmètre et ses abords doivent être déboisés, les racines des arbres pouvant déteriorer la maçonnerie des galeries de captage doit être enlevées. Ils doivent être entretenu, débroussaillé et tondu mécaniquement ou thermiquement sans apport de pesticides. Les débris végétaux ne doivent en aucun cas stationner dans ce périmètre.
 - **Périmètre de protection rapproché (PPR)** : Ce périmètre est défini comme la zone de fort rabattement de la nappe. Dans ce PPR, toutes nouvelles recherches d'eau par un privé ou une collectivité est interdite. De nombreuses servitudes ou réglementation sont mises en place en fonction de l'environnement du captage. Toute activité pouvant modifier les écoulements ou dégrader la qualité de l'eau (extraction de matériaux du sous-sol, implantation d'installations classées, d'assainissement non collectif, d'activités provoquant des rejets ou

- stockages de lisiers, fumiers ou boues) sont strictement prohibées. D'autres activités seront adaptées ou réglementées selon l'avis de l'Hydrogéologue Agréé.
- De même, les prairies et les cultures recevront exclusivement des épandages d'engrais organiques et chimiques selon des plans d'épandages raisonnés. Les cultures intensives grosses consommatrices d'engrais et de phytosanitaires, laissant un sol nu en hiver, seront exclues du périmètre de protection rapprochée et si possible remplacées par de la prairie naturelle. L'occupation des sols dans les zones forestières et pastorales ne sera pas modifiée.
 - **Périmètre de protection éloigné (PPE)** : Ce périmètre n'est pas obligatoire. Elle est rendue nécessaire lorsque la réglementation générale est jugée insuffisante et que certaines activités présentant des risques sanitaires doivent être encadrées pour réduire leur impact. Il a pour vocation de renforcer la protection de la ressource en permettant une gestion de l'espace dans laquelle coexistent aménagement du territoire et protection de l'eau. Aucune interdiction ne peut être promulguée dans ce périmètre, néanmoins, diverses activités agricoles, industrielles ou urbaines vont y être réglementées selon l'avis de l'Hydrogéologue Agréée.
- Ce périmètre correspond à la zone d'alimentation du captage mais peut s'étendre à l'ensemble du bassin versant.



- Figure 77: Délimitation des périmètres de protection de captage d'eau

