

# MODULE FORAGE

## I- INTRODUCTION

Les fluides souterrains sont très précieux et ont une grande importance : Eau, Gaz et Pétrole. Se trouvant à des profondeurs plus où moins importantes, il est toujours nécessaire de forer pour les explorer et les exploiter. Les profondeurs de forages existants varient de quelques dizaines de mètres pour le cas d'exploitation des nappes superficielles, à quelques dizaines de kilomètres pour l'extraction des réserves pétrolières (17,4 Km à Azerbaïdjan, 9 Km à Oklahoma et 3,35 Km à Hassi Messaoud). Les premiers forages ont été des forages de pétroles réalisés en Allemagne en 1857, alors que la première initiative qui rencontra le plus grand retentissement fut cependant celle d'Edwin L. Drake en 1859 en Pennsylvanie pour extraire le pétrole à 23 m de profondeur. La faisabilité de forage est une fonction directe du rapport économique ; les forages d'eau dépassent des fois quelques kilomètres (les forages d'eau peuvent atteindre les 2000m au sud de l'Algérie).

L'implantation des forages d'eau exige des recherches préliminaires géologiques et géophysiques, afin d'assurer le maximum de chances de réussite à l'œuvre et éviter les dépenses aveugles.

## II- LES METHODES

### 1) Prospection géologique

Elles sont basées sur l'observation directe *au niveau des affleurements des roches en surface*. Pour cela, le géologue est amené à étudier non seulement les zones susceptibles, mais aussi les bordures parfois lointaines d'un bassin où affleurent les terrains qui disparaissent en profondeur dans les parties centrales a priori plus intéressantes.

Elles permettent de déterminer la nature, l'épaisseur, le pendage et l'extension horizontale d'une formation, tout ceci en évaluant la possibilité pour ces roches de constituer un réservoir. Les outils utilisés pour mener à bien ces investigations sont :

a-Cartes hydrogéologiques :

b-Cartes structurales

c-Cartes piézométriques :

d- Photos aériennes

e- Télédétection

L'utilisation de la cartographie géologique et hydrogéologique permette d'avoir des informations concernant les caractéristiques (nature et qualité) de l'aquifère et des différentes formations où se trouve. Ces informations sont en particulier :

- l'endroit et l'étendue de l'aquifère
- le type de la nappe (libre, captive, semi captive)
- la structure de l'aquifère (fissures, failles...etc.)

- la structure des limites : toit et substratum

- la liaison et les relations avec les écoulements de surface (cours d'eau, plan d'eau...etc.)

#### 1-1- Cartes hydrogéologiques :

Les données obtenues par études géologiques et structurales conduisent à la réalisation des cartes et coupes hydrogéologiques. Ces coupes hydrogéologiques sont élaborées par la superposition sur des coupes géologiques, des données de l'écoulement souterrain (la surface piézométrique, la surface d'alimentation directe ou indirecte, le drainage et les pertes en surface et en profondeur).

#### 1-2- Cartes structurales :

Les cartes structurales dont leur but est de présenter les formations perméables (réservoir), sont élaborées par la synthèse des données géologiques, des conditions aux limites et des paramètres hydrodynamiques (perméabilité, pente, vitesse, gradient hydraulique). Ce type de cartes permet d'établir la carte isohypse (d'égale altitude), la carte isobathe (d'égale profondeur), et la carte isopaches (d'égale épaisseur de l'aquifère).

#### 1-3- Cartes piézométriques :

Les cartes piézométriques présentes en un temps donné, la distribution spatiale de la charge hydraulique. Elles sont obtenues par les mesures des niveaux piézométriques. L'analyse de la surface piézométrique vise le tracé des lignes de courant et l'indication sur elles le sens d'écoulement ; dont des courbes fermées traduisent des dômes (sommets) caractérisant des zones d'alimentation, ou bien des dépressions des zones de captage. Pour une section constante d'écoulement, le gradient hydraulique est proportionnel au débit d'écoulement dans la nappe, et inversement proportionnel à la perméabilité de la nappe. Pour une largeur constante de l'aquifère, la variation du gradient hydraulique (piézométrique) est le résultat de la variation de la perméabilité, de l'épaisseur de la nappe ou bien du débit (infiltration par exemple). Des ruptures de la piézométrie peuvent être le résultat de présence d'accidents tectoniques. Des accidents sont souvent associés à des alignements de sources artésiennes.

L'analyse des fluctuations temporelles de la piézométrie des nappes libres donne des informations sur la recharge par infiltration, sur la réserve disponible et sur les niveaux et débits d'étiage des cours d'eau. D'autres cartes sont encore utiles : la carte topographique, la carte hydrologique, la carte pédologique et la carte d'occupation de sol.

#### 1-4- Photos aériennes :

La photographie aérienne peut fournir des informations qui ne peuvent pas être directement observées sur le terrain ; certaines failles et anciens lits de rivières. Elle forme aussi un moyen efficace pour l'identification et l'analyse des fractures, qui constituent des lignes naturelles d'une taille infra-kilométrique sur la photo aérienne, les traces linéaires dont la largeur dépasse l'ordre de kilomètre sont appelées linéaments ; qui représentent fréquemment des zones de grande perméabilité. Elle indique aussi des informations essentielles pour l'implantation des forages et puits.

## 1-5- Télédétection :

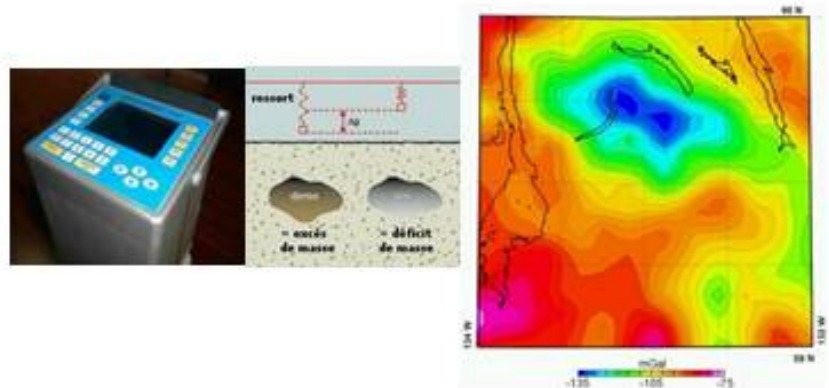
Réalisée par des images satellitaires, elle permet le traitement numérique des images pour mieux systématiser et simplifier le traitement de l'information, et en même temps la reconstitution de documents à des échelles différentes. Elle permet encore l'identification des structures géologiques et des matériaux de surface, l'identification des zones humides (résurgences, affleurements de nappes, zones de recharge), et l'obtention et la mise à jour de l'occupation de sol pour l'évaluation de la vulnérabilité des nappes. La nouvelle génération de satellites qui présente une bonne résolution au sol est formée par : Spot-France, ERS-1-Europe, Landsat-TM-USA, Radarsat-Canada, J-ERS-1-Japon, IRS-1C-Inde...etc.

## 2) Méthodes géophysiques :

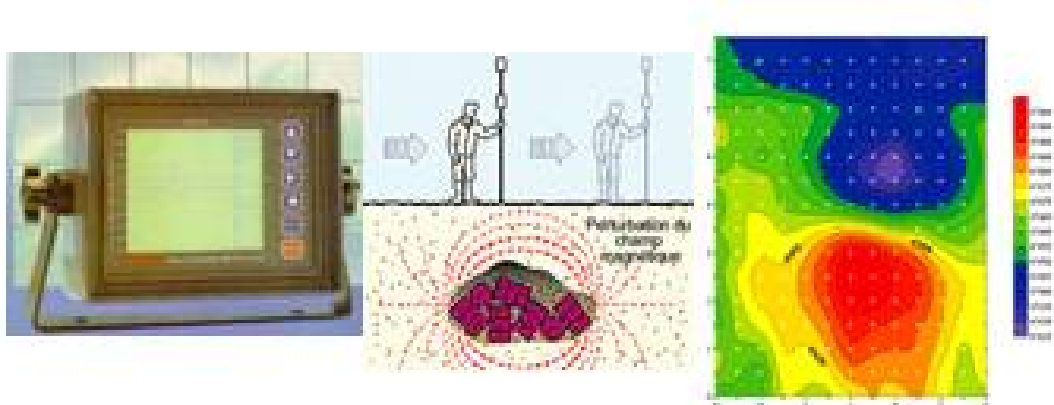
Comme l'exploration en surface est impuissante à déceler tous les secrets de l'écorce terrestre, le géologue pétrolier va donc utiliser les techniques de la géophysique pour mesurer certaines caractéristiques physiques du sous-sol. Ces techniques sont aussi variées que peuvent l'être les grandeurs physiques 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.

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.

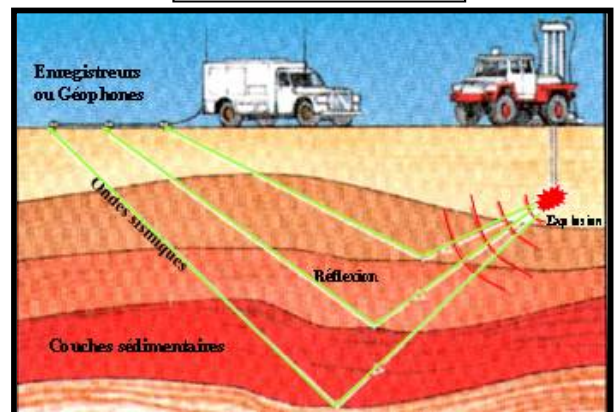
Les informations recherchées par ces méthodes sont :

- 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

a- 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 portés en graphique en fonction des distances de ces géophones Si au point d'explosion E (point d'ébranlement : point d'impact).

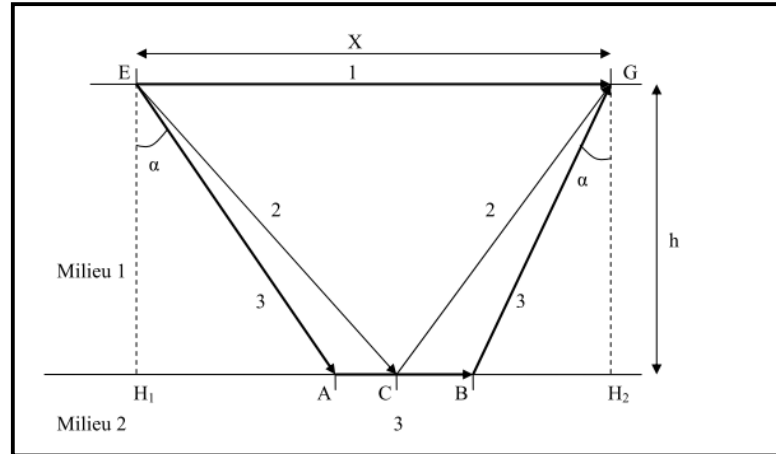
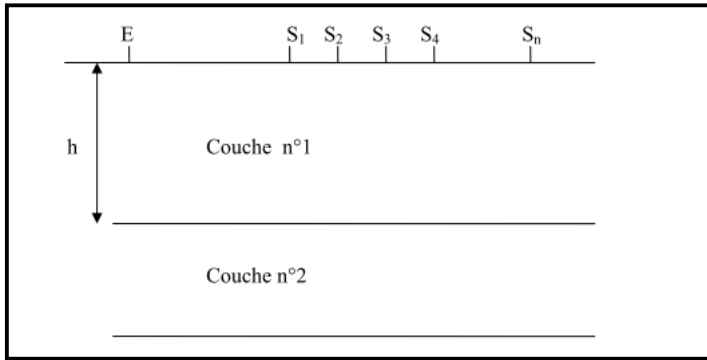
### Principe sismique



**L'onde sismique est réfléchi, une fois, elle rencontre un contraste d'impédance (densité X vitesse)**

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 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 :

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

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

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

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

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 :

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

Et puisque  $AB = X - AH_1 - BH_2$

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

$$\rightarrow AB = X - 2 \cdot h \cdot \text{tg}(\alpha)$$

et :

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

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

Et puisque :

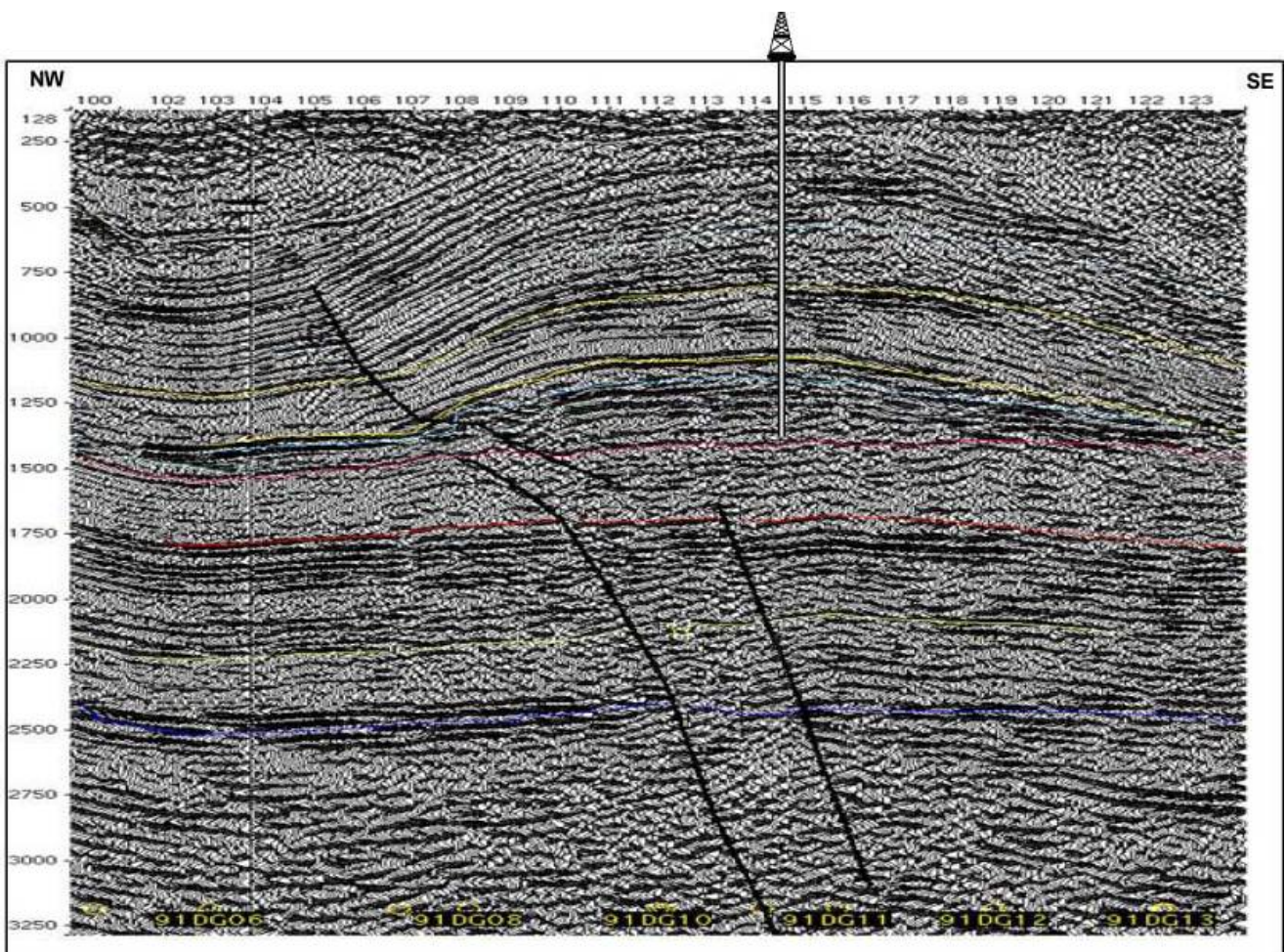
$$\sin(\alpha) = V_1 / V_2$$

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

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

### 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 :

N° du géophone	Distance du point d'impact (m)	Temps (ms : $10^{-3}$ s)
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.

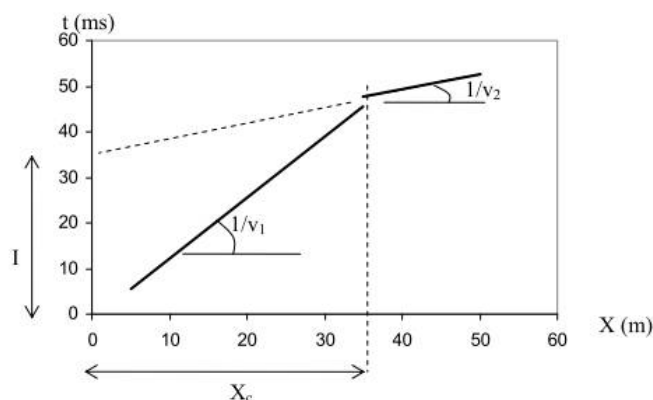
b-Déterminer la vitesse de propagation de l'onde dans chaque couche.

c-Déduire la distance critique et l'intercepte.

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 graphe il s'agit de deux (02) couches.

**b** - d'après le graphe toujours :

$$I/V_1 = i_1 = 0.00125$$

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

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

$$\text{et } 1/V_2 = i_2 = 0.000333$$

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

**c** - la distance critique :

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

**d** - l'épaisseur de la première couche :

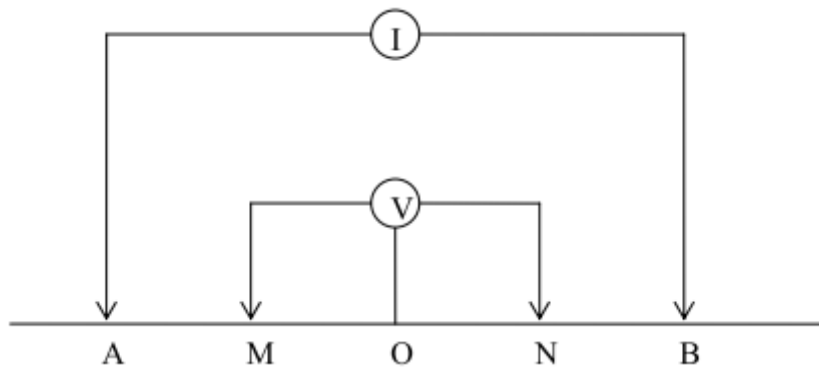
$$\text{nous avons : } I = 2.h.(V_2^2 - V_1^2)^{0.5} / (V_1.V_2)$$

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

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

b- Prospection électrique :

La prospection électrique permet d'étudier les variations latérales et verticales de la résistivité apparente du sous sol  $\rho_a$ . 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  $\Delta V$ , 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 :

$\rho_a = k.\Delta V / I$  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 :

$$Z = 0,17.AB$$

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

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 :

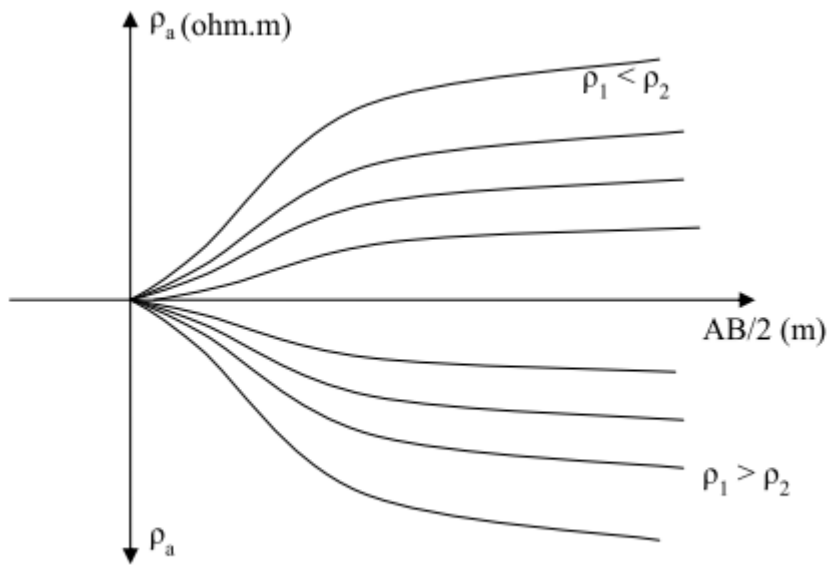
➤ profil de résistivité : effectué pour la reconnaissance latérale d'un terrain où la profondeur d'investigation sera constante. On déplace le long d'un profil, le même dispositif AMNB (écart invariant) : la profondeur d'investigation reste la même, et on explore une tranche du sous sol d'épaisseur sensiblement 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  $\rho_a$  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

$\rho$  : résistivité de la couche

$n$  : porosité

$f$  : fraction de pores contenant l'eau

$\rho_w$  : 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:

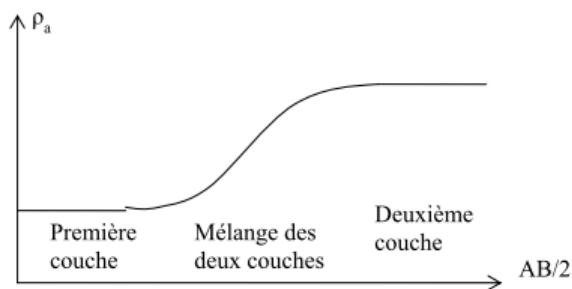
On reporte sur papier bi logarithmique les valeurs la résistivité apparente (en ordonnées) en fonction des valeurs de  $AB/2$  (en abscisse) ; on obtient ainsi la courbe expérimentale du sondage. Un sondage électrique réalisé dans un terrain à une seule couche isotrope donne une courbe expérimentale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



Courbe d'un terrain à une seule couche

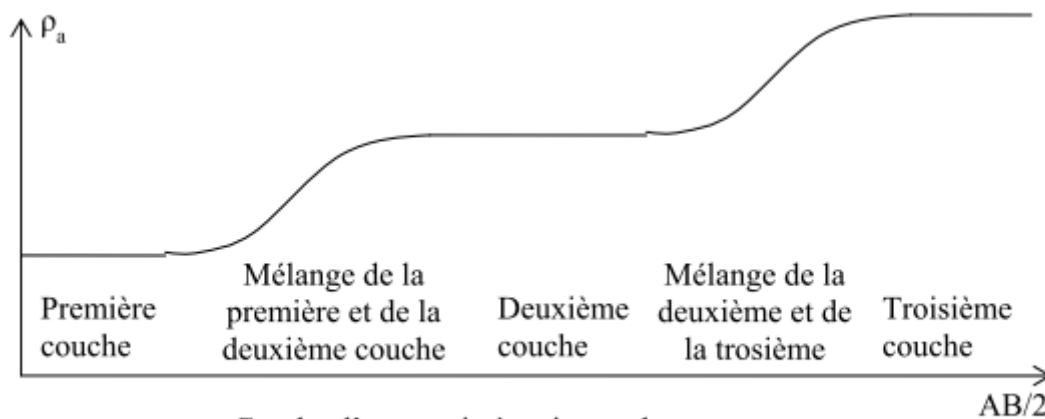
Un sondage électrique réalisé dans un terrain à deux couches donne une courbe à deux paliers ; et la pente de la zone d'influence des deux couches est donnée par le rapport  $\rho_1/\rho_2$

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



Courbe d'un terrain à deux couches

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



Courbe d'un terrain à trois couches

### 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.

### 3) La Diagraphie :

La difficulté d'établir une coupe géologique précise des sondages mécaniques à partir des débris ramenés par le fluide de forage et, d'autre part le coût élevé du prélèvement de carottes ont conduit au développement de nombreuses techniques d'exploration géophysique des sondages tels que les diagraphies. 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).

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.

➤ 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 les sondages.

➤ Types de diagraphies:

On étudie les principes d'application et d'interprétation des diagraphies utilisés dans le domaine de la recherche 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 diagraphies acoustiques:

➤ Applications des diagraphies:

L'étude des diagraphies 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 complétion : (Délimitation et contrôle des perforations ...).

d- Paramètres physiques des principales roches :

ROCHE	COMPOSITION	r ma	f N	dt ma	GRAPI
Sables et Grès	Quartz : SiO <sub>2</sub>	2,65	0-1,5	51-56	0 - 15
Calcaire	Calcite : CaCO <sub>3</sub>	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	-

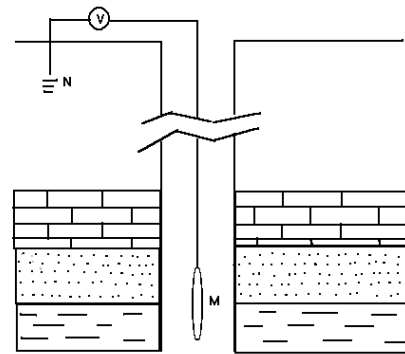
rma : La densité de la matrice

fN : L'indice d'hydrogène

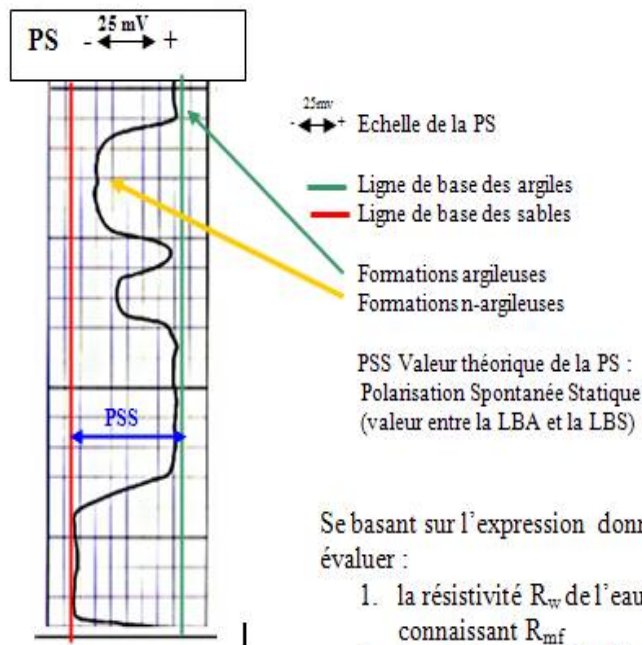
dt : La vitesse de propagation de l'onde acoustique en  $\mu\text{s}/\text{ft}$

➤ 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 milli - voltmètre.



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 :

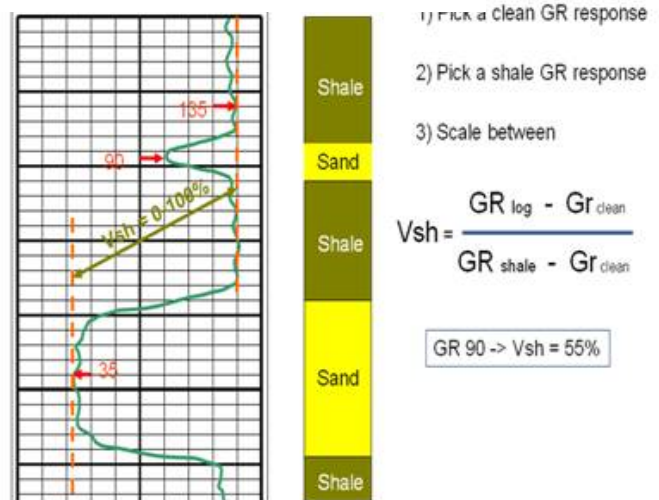
1. la résistivité  $R_w$  de l'eau de formation connaissant  $R_{mf}$
2. le pourcentage (%) d'argile ayant la PSS corrigée

➤ 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 : gamma 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 diamètreur :

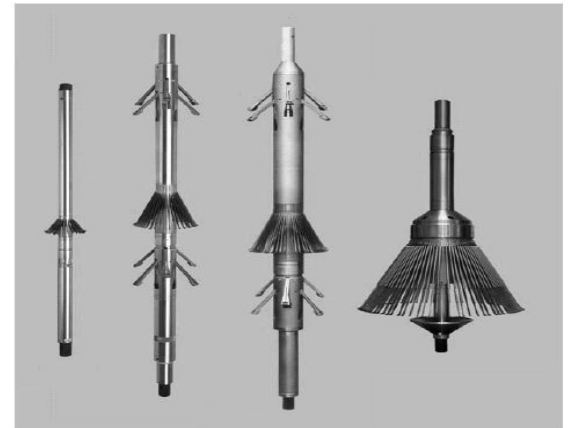
Il donne la variation du diamètre du trou et permet donc la loca

g) Les diagraphies acoustiques:

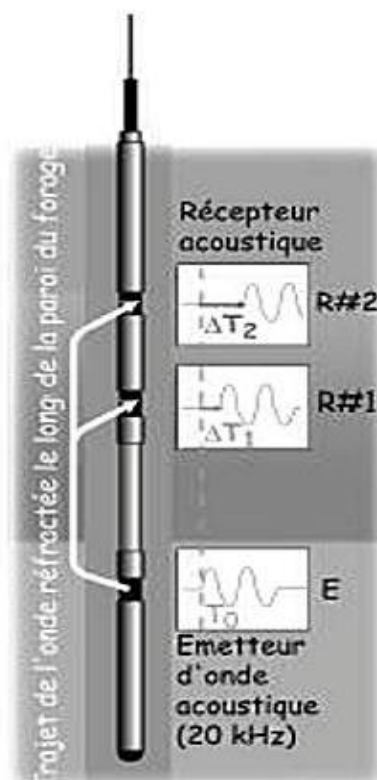
:

C'est une sonde qui permet :

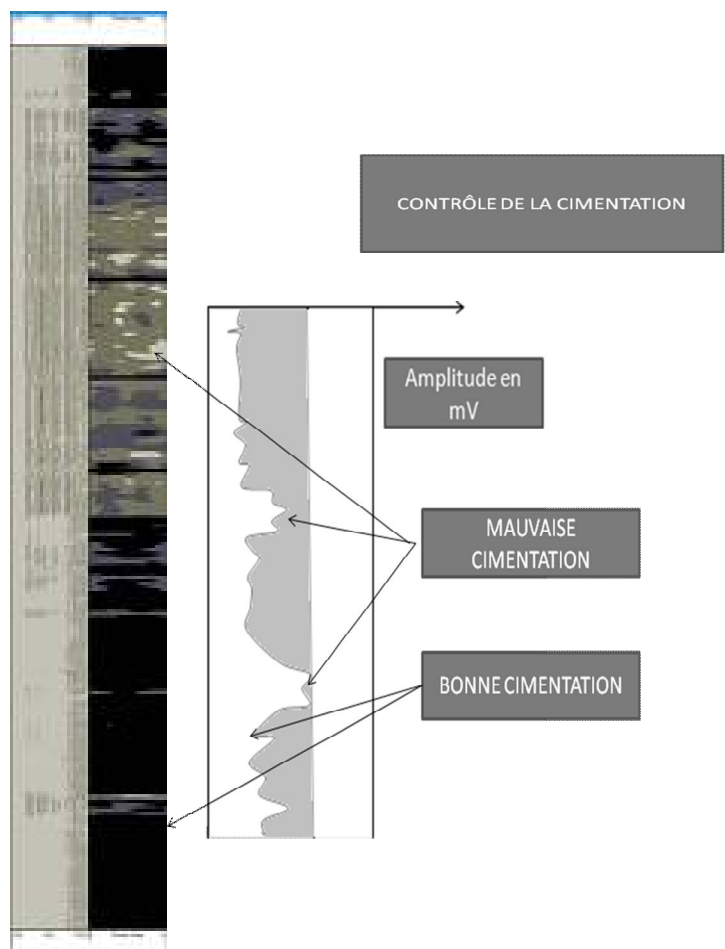
- La détection des joints de tubages métalliques
- L'indication de la côte des crépines
- L'estimation de l'état de corrosion du tubage
- La localisation les zone sans cimentation entre le tubage et l'espace annulaire (free pipe).



Types de diamètreur



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, compresseurs 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 complétion, des précautions à prendre pour éviter toute dégradation de cet 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 surgisse 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 influent sur les paramètres prescrits lors du forage (exp; 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 être rencontrés 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 peut 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 (exp. Les accidents de travail, les endommagements d'ouvrage et leurs conséquences sur l'entreprise, l'environnement et sur la population).

Aussi avant d'entamer 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 cour du forage ou après l'achèvement, coupes litho-stratigraphiques, débits et niveaux statiques, nature des aquifères qu'abrite cette région, la nature et le potentielle hydrique des ressources en eau de la région)

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

- longueurs et diamètres des différentes parties du forage,
- position, profondeur, longueurs et le 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'exploité les eaux souterraines, le choix de la technique de forage employé doit:

- Assuré une performance de point de vue avancement, sécurité
- Assuré 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 a 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 (exp:nappe à forte potentiel hydrique impose l'utilisation des fluides a forte densité, un forage qui pourra traverser une formation salifère impose l'utilisation des boues salées saturées.

a). Tubages :

A fin d'assuré une longévité de l'ouvrage le maitre d'ouvre doit doté ce dernier par une architecture qui sera en fonction de la nature du terrain, la profondeur de la nappe. En générale les forage sont conçus sous trois formes . (Fig.01)

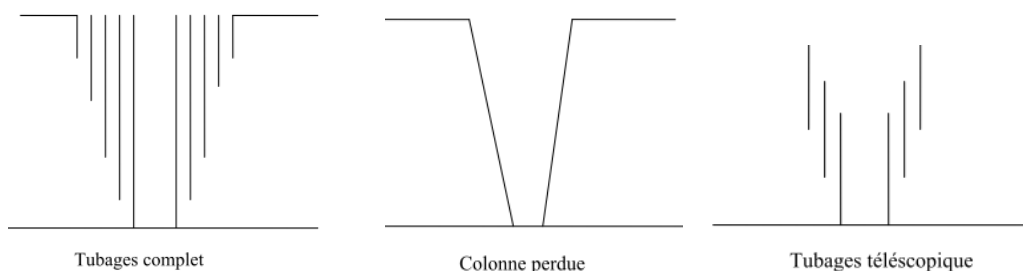


Fig:01.Différents types de tubages

b) Contrôle de la rectitude et de la verticalité :

Le contrôle périodique de la verticalité au cour du forage est obligatoire, et cela pour évité les déviations qui pourra entrainé des difficulté pour la mise en place du tubage ou meme 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 sortie le trépan en surface et l'extraction des déblais. Tandis que le forage rotary les déblais sort en surface avec la remonté 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 utilise 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 a découpé dans la formation, un cylindre appelé carotte, et de le 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'ANAYSE DES ECHANTILLONS:**

Les déblais de forage procure aux maitre 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 crépines 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 à induit à l'apparition des types de fluides qui sont choisie 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 exerce une pression hydrostatique légèrement supérieur à celle du gisement, et cela pour éviter toute éruption mais aussi d'évité l'apparition des parte (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 m<sup>2</sup> 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 éliminé.

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 évacué 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 le 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 réduire 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 part 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.