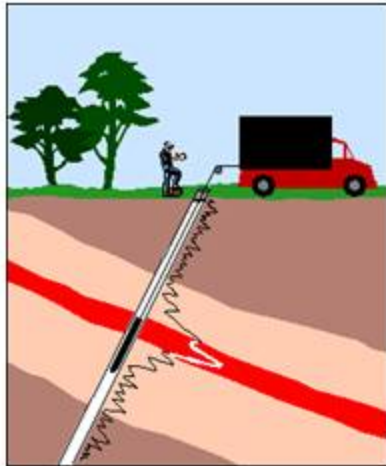


Géophysique en forage



Géophysique en forage

Définition: techniques géophysiques mises en œuvre à l'intérieur d'un forage.



Mesures paramètres physiques $\alpha=f(z)$



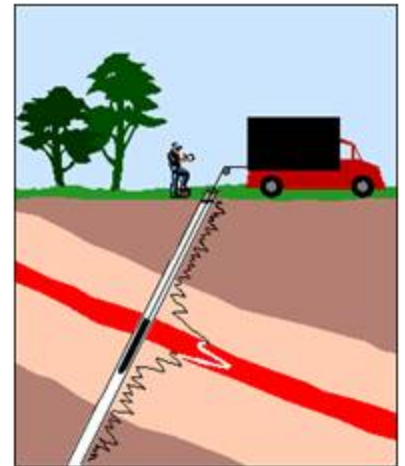
Caractérisation du milieu

+

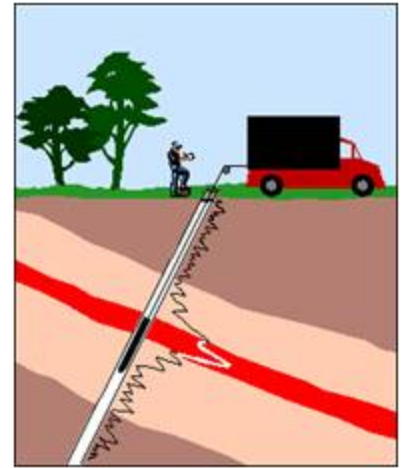
Interprétation des images
géophysiques

Des outils spécifiques sont nécessaires pour l'acquisition des mesures.

Géophysique en forage.



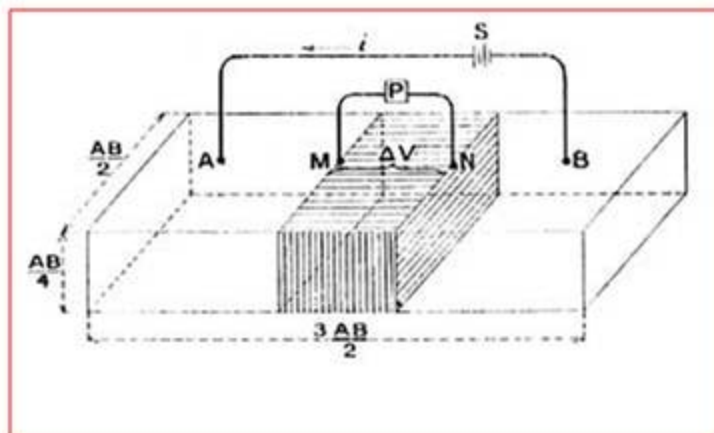
- Introduction générale: historique et problématique
- Formations géologiques, structure et dynamique du système:
 - Méthodes électriques, acoustiques et nucléaire
 - Présentation des outils
- Étude de cas



Historique et Problématique

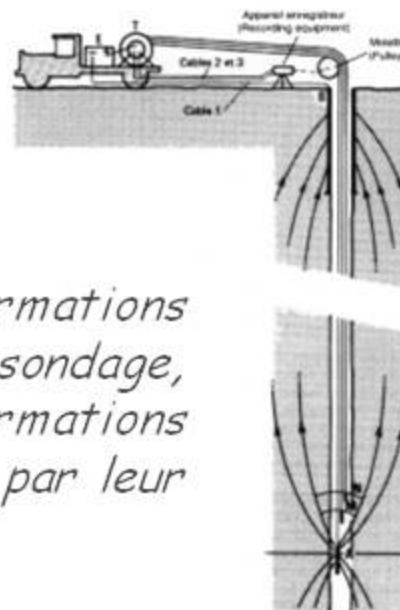
Expériences Géophysiques: mesures de surface et diagraphie

1911: mesure électrique de surface
(prospection minière)

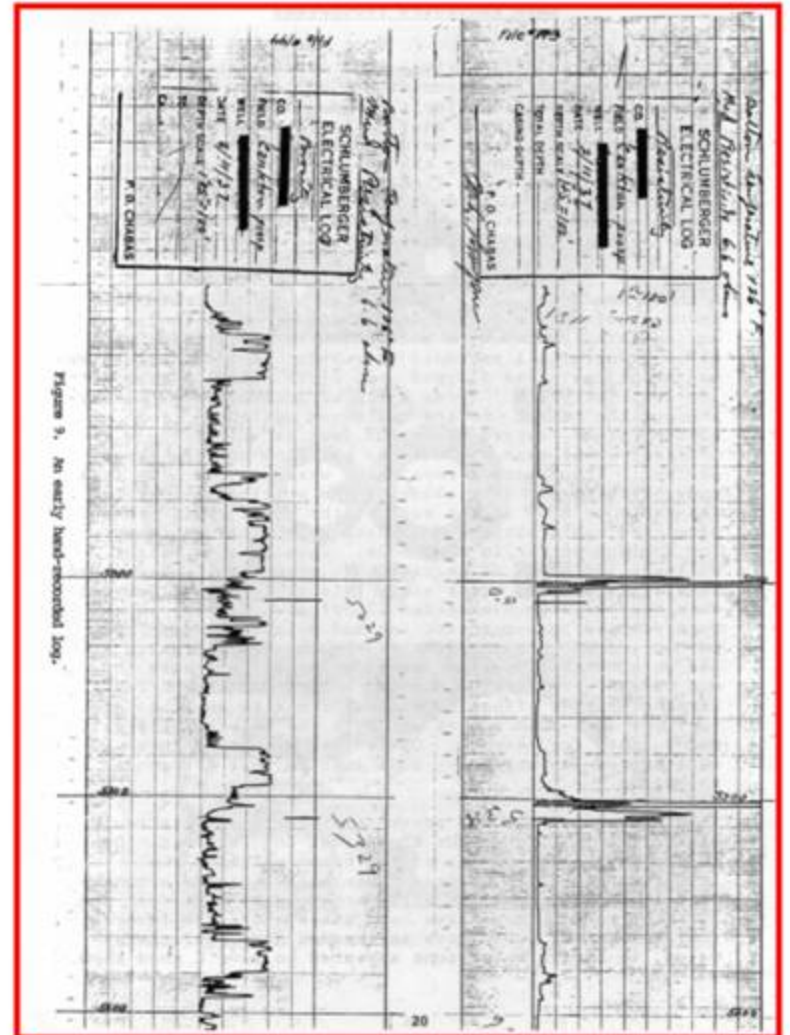


1927: mesure électrique en forage
(prospection pétrolière)

L'équipement de base
des diagraphies.
Reconnaissance de
la nouvelle technique
(1927 - 1932)



Objectif: identifier les formations géologiques traversées par le sondage, et notamment les formations productrices d'hydrocarbures, par leur résistance électrique.

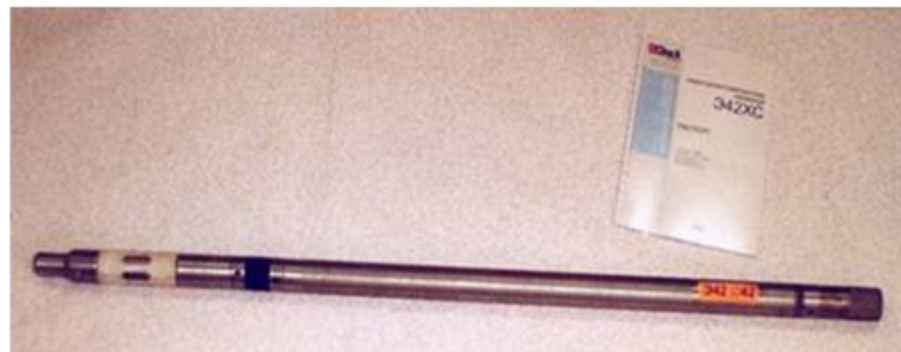


Développement des méthodes de géophysiques en forage:

Du monde pétrolier à la subsurface



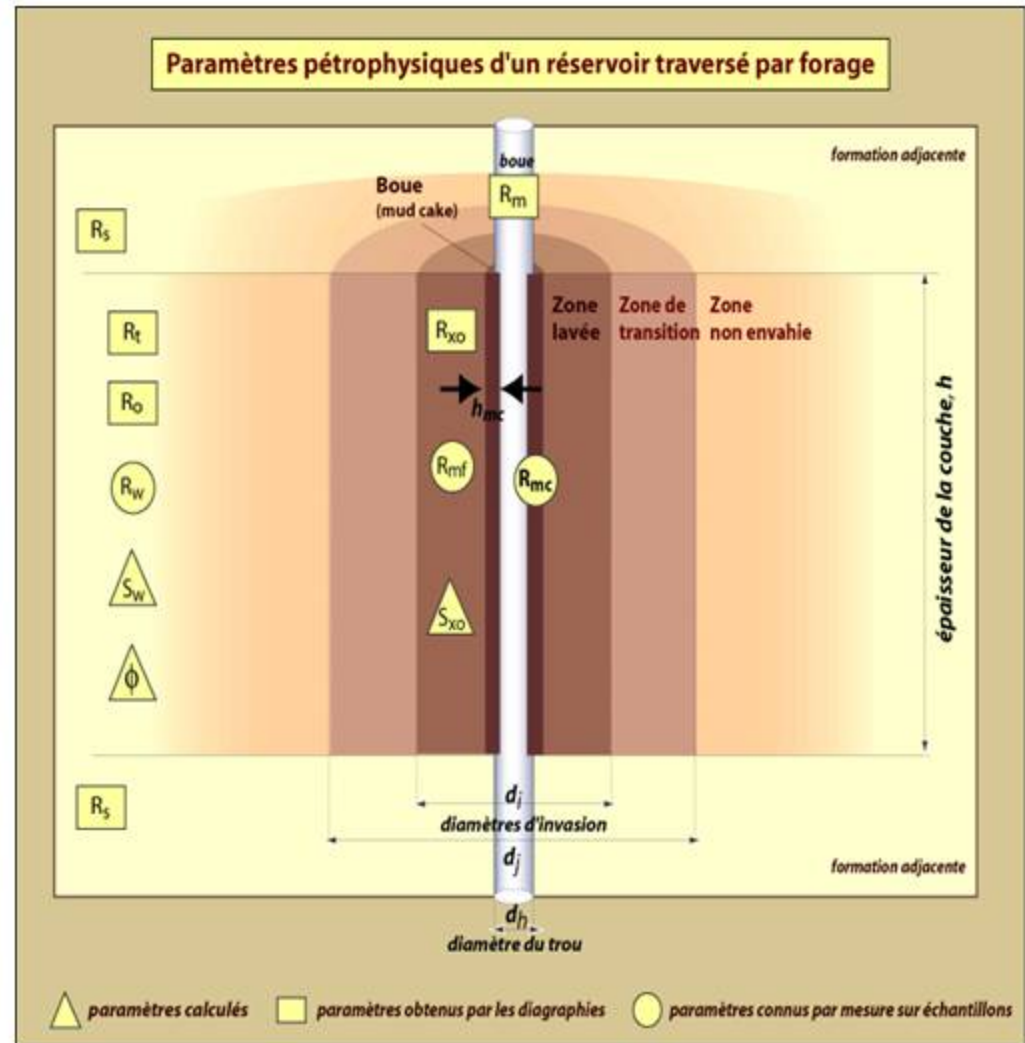
Fourchette des tailles d'un ensemble d'outils de diagraphe.



Le forage et tubage.



Le forage et tubage.



Géophysique en forage

Mesures instantanées :

train de tige équipé dans sa partie basse de capteurs

➔ Mesures mécaniques : tension, rotation, vitesse

➔ Mesures physiques : résistivité, densité, fluides

Mesures importantes dans des structures instables où le forage peut s'effondrer.

Mesures différées :

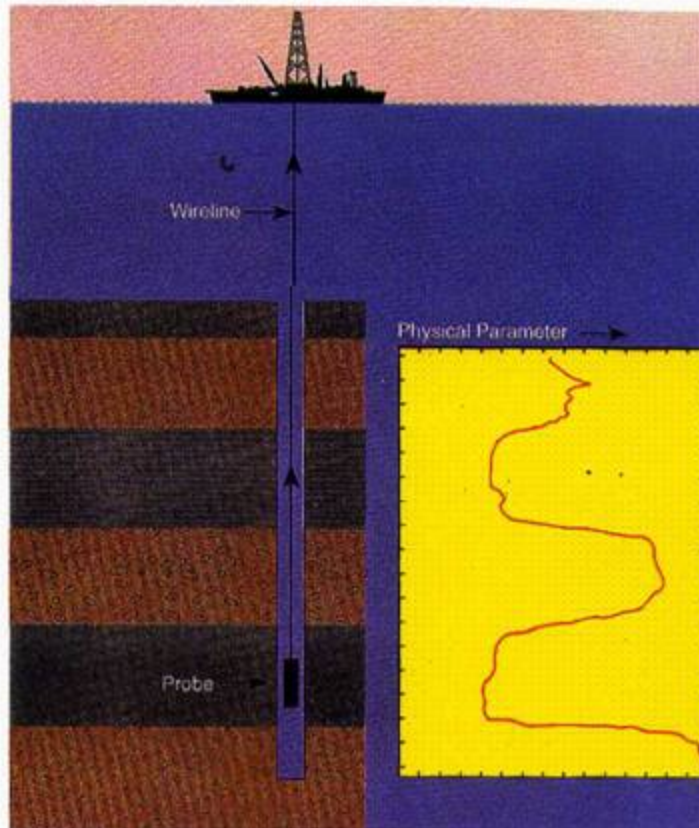
mesures physiques réalisées quand le forage est terminé

➔ Mesures des paramètres physiques

➔ Développement pétrolier / Utilisation hydrogéologie et géotechnique

Principe de la méthode:

Mesures continues de paramètres physiques à travers les formations géologiques rencontrées en profondeur → $p=f(z)$

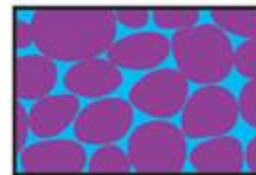


Objectifs :

Caractérisation du milieu

→ matrice + fluides (ϕ)

Sable et gravier



Intergranulaire

Roches ignées



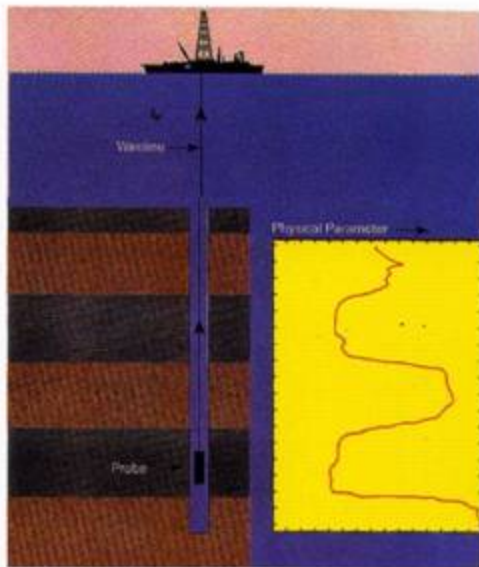
Fissure

Calcaire



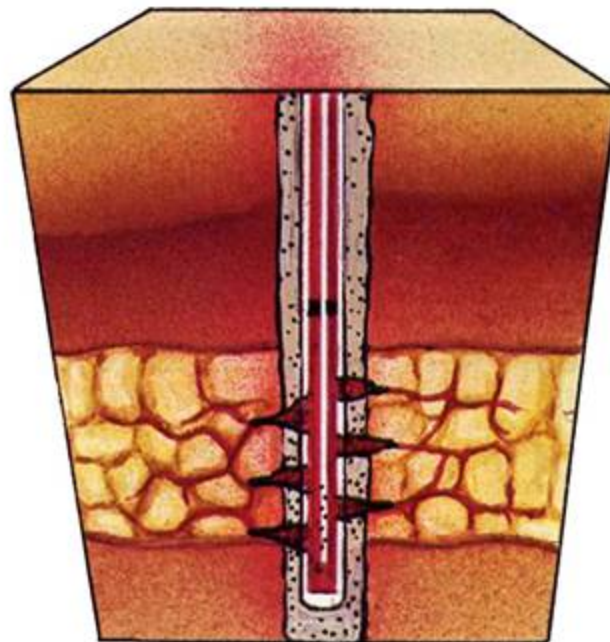
Vide de dissolution

Principe de la méthode :



Objectifs:

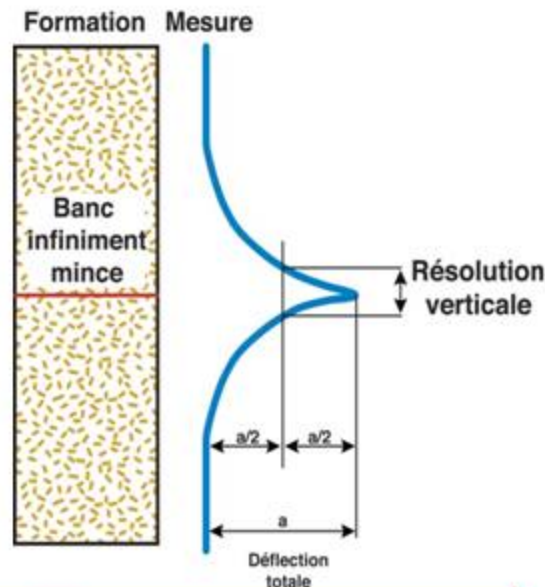
- Identifier les formations
- Caractériser la structure du milieu
- Étudier la dynamique du système



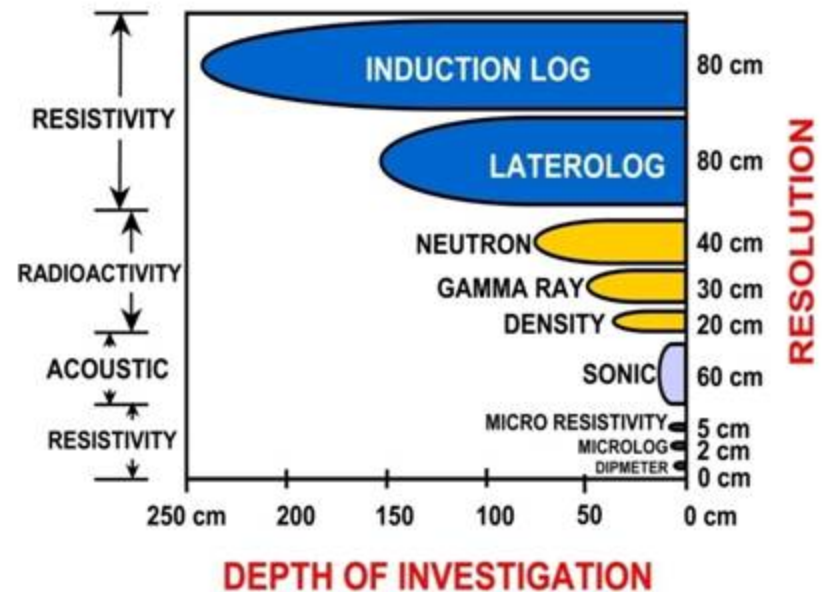
Principe de la méthode:

Données disponibles : données 1D (scalaire) et images 3D

Mesures géophysiques



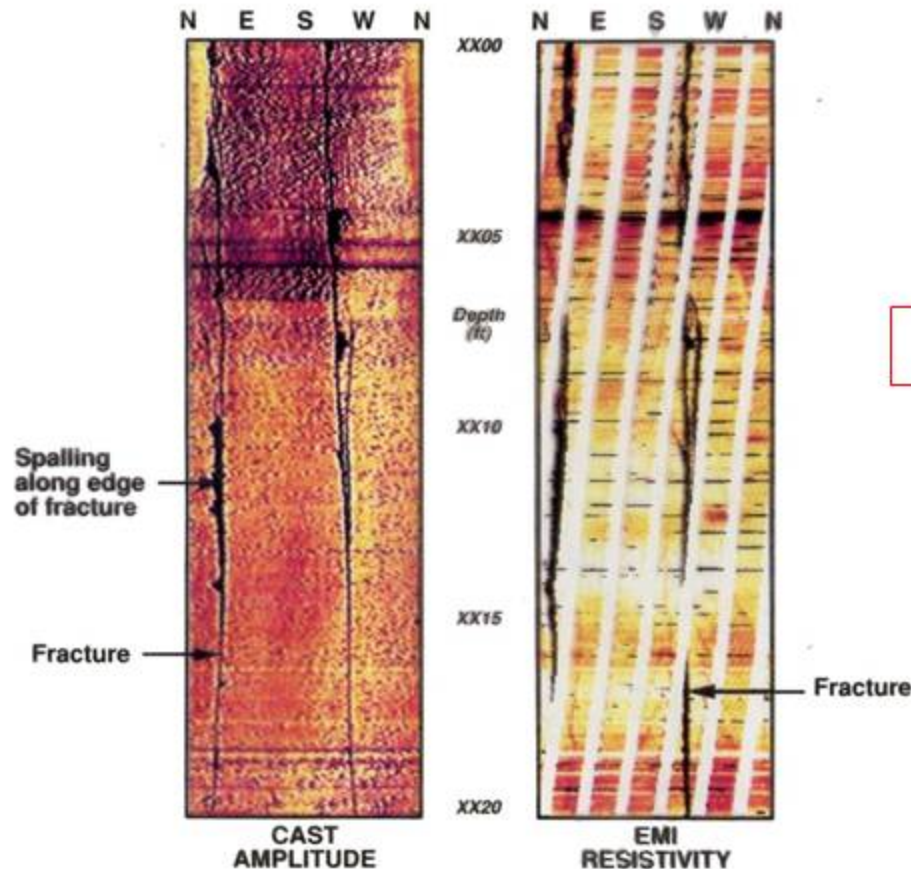
Résolution verticale



Principe de la méthode:

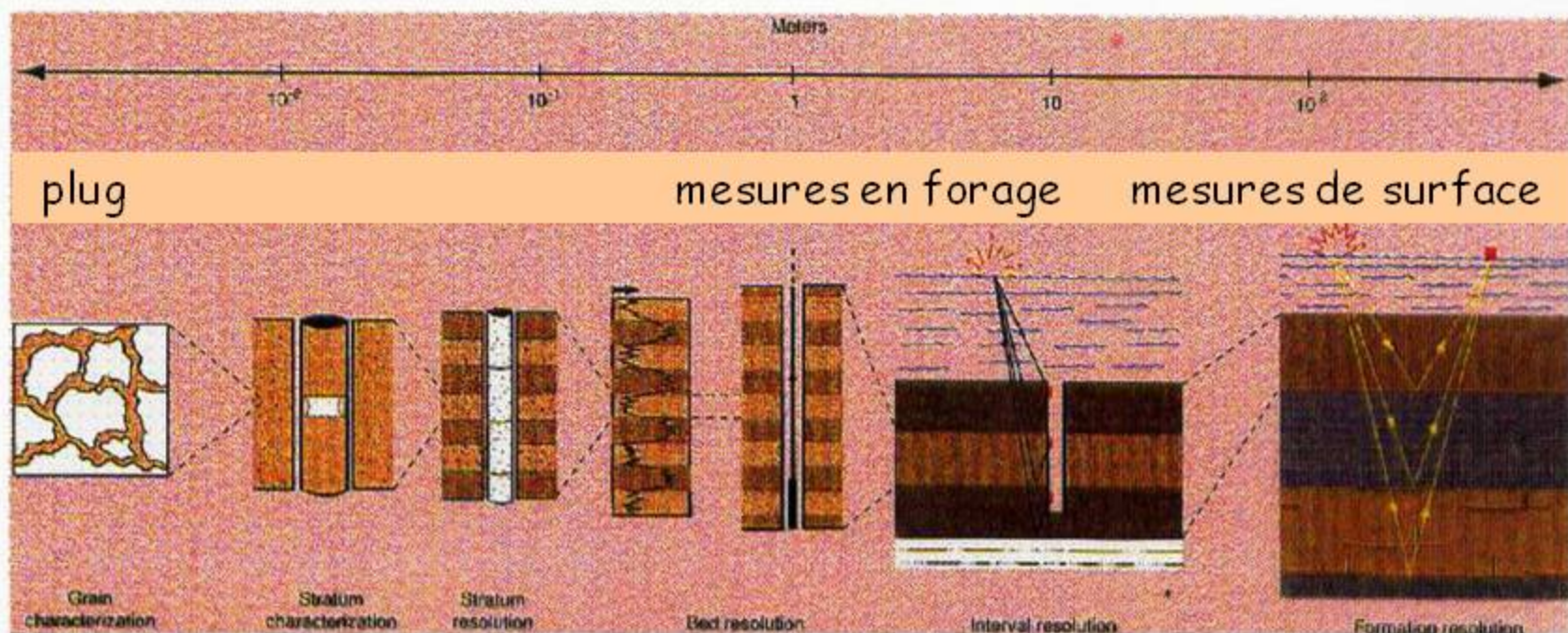
Données disponibles : données 1D (scalaire) et images 3D

Imagerie



Résolution : cm

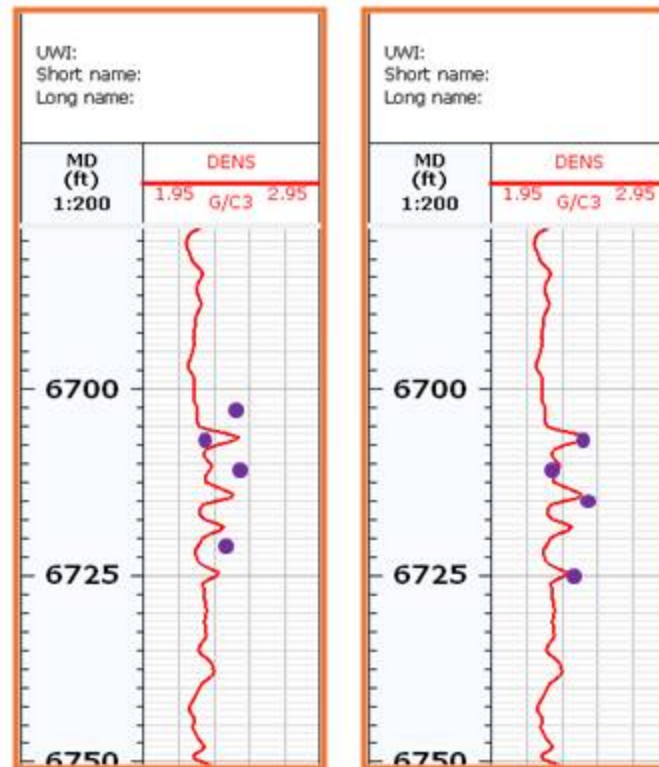
Principe de la méthode :



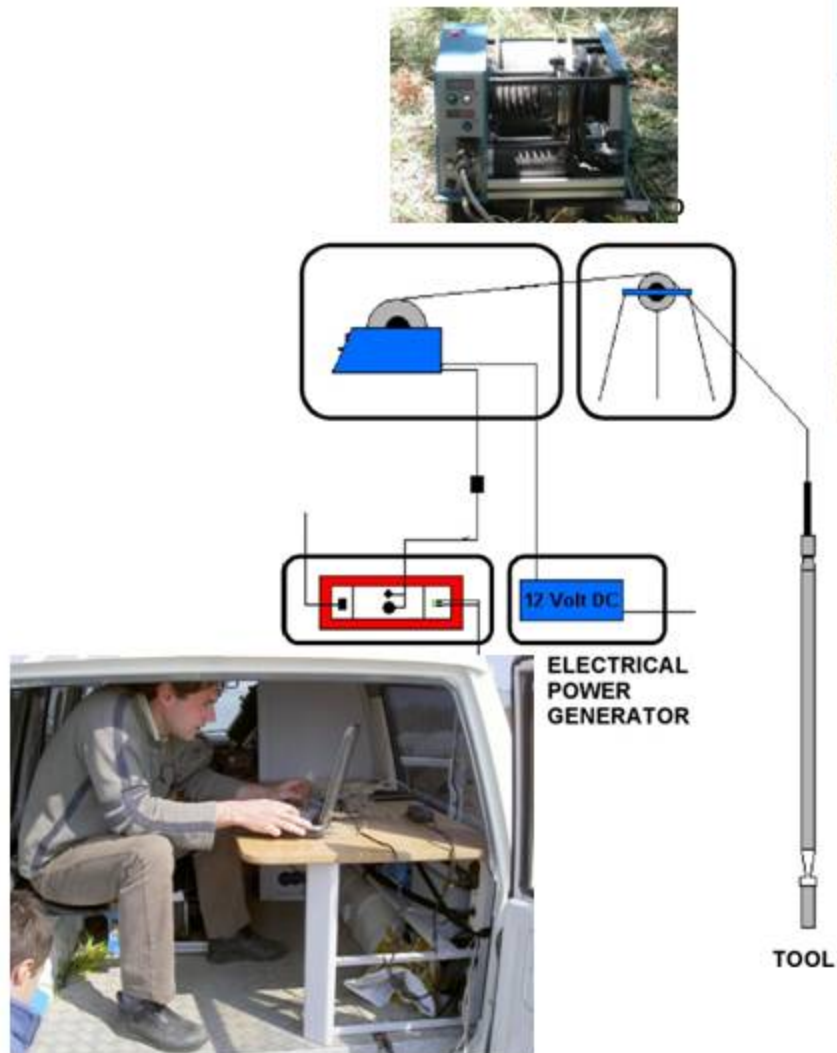
Principe de la méthode :

Mesures ponctuelles dans l'espace → calage en profondeur

Depth-shift

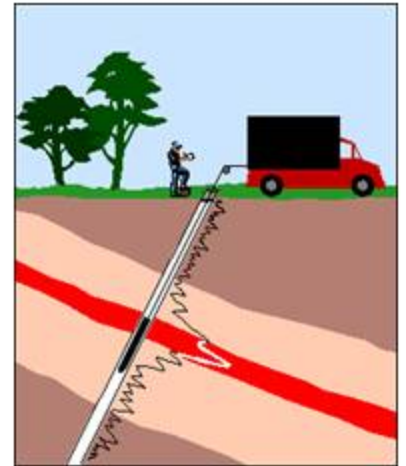


Principe de la méthode:



TMP Maguelone





Présentation des méthodes

- Formations géologiques
 - Structure du milieu
- Dynamique du système

Les méthodes nucléaires

Log Gamma Ray

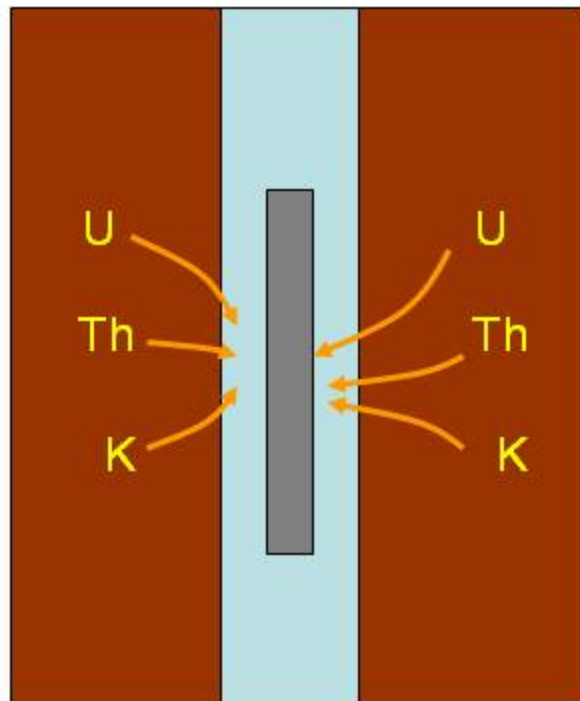


Radioactivité naturelle

Log Neutron, Log γ - γ



Radioactivité provoquée



Les méthodes nucléaires

Log Gamma Ray

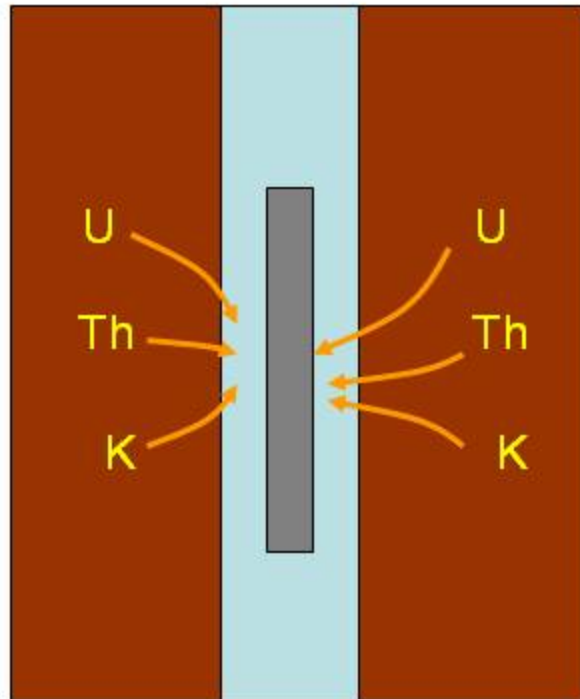


Radioactivité naturelle du milieu

Log Neutron, Log γ - γ



Radioactivité provoquée du milieu

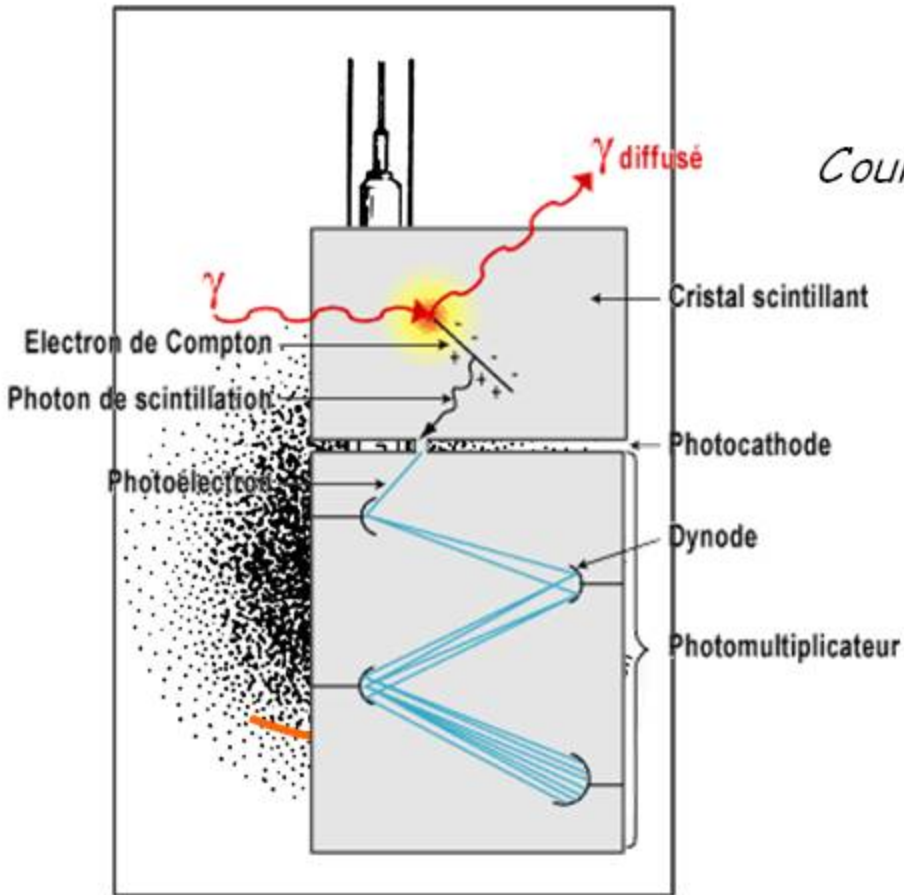


Très utilisées en prospection :

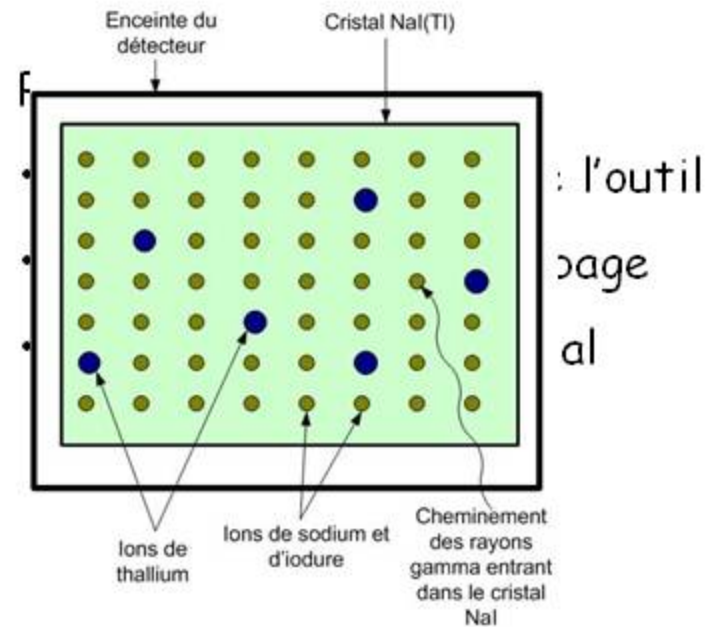
- Trous ouverts / tubés
- Trous vides / remplis
- Tous types de fluides

1- Log gamma ray

Photons gamma → cristal (NaI) → courant électrique → courbe : $GR=f(z)$ (cps ou api)

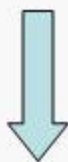


Courant électrique $\leftrightarrow$ Rayonnement incident



1- Log Gamma Ray

Radioactivité naturelle



Lithologie

Roches à radioactivité élevée :

- granites
- argiles

Roches à radioactivité moyenne :

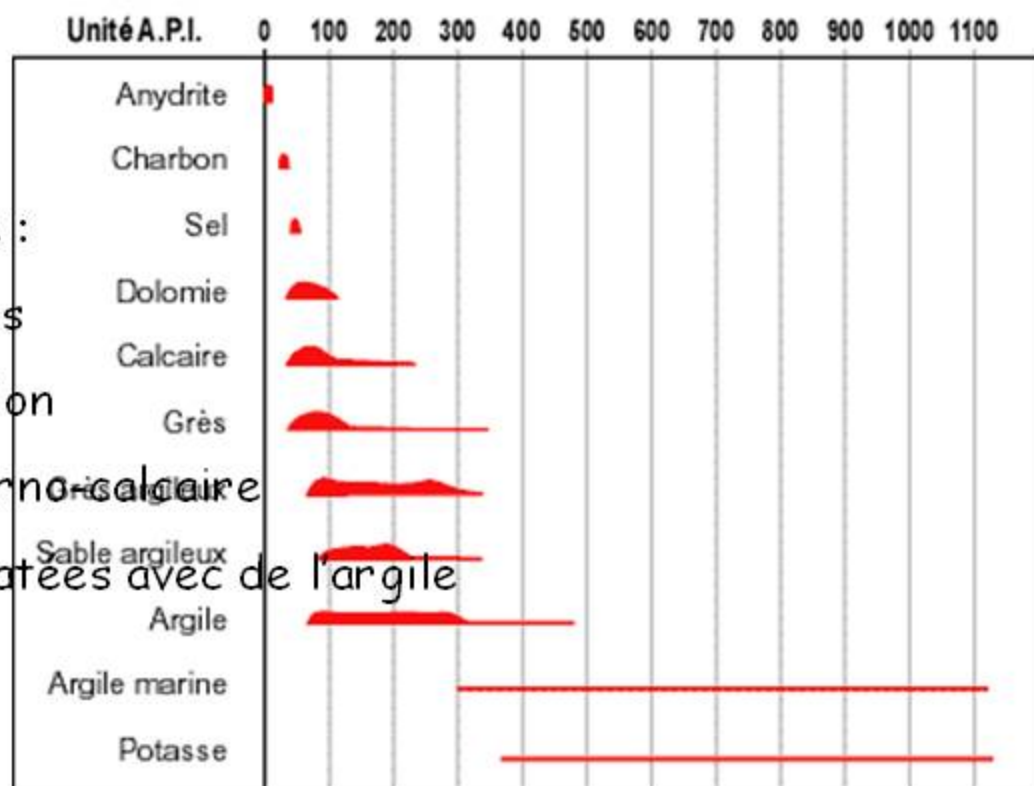
- grès et sables

Roches à radioactivité faible :

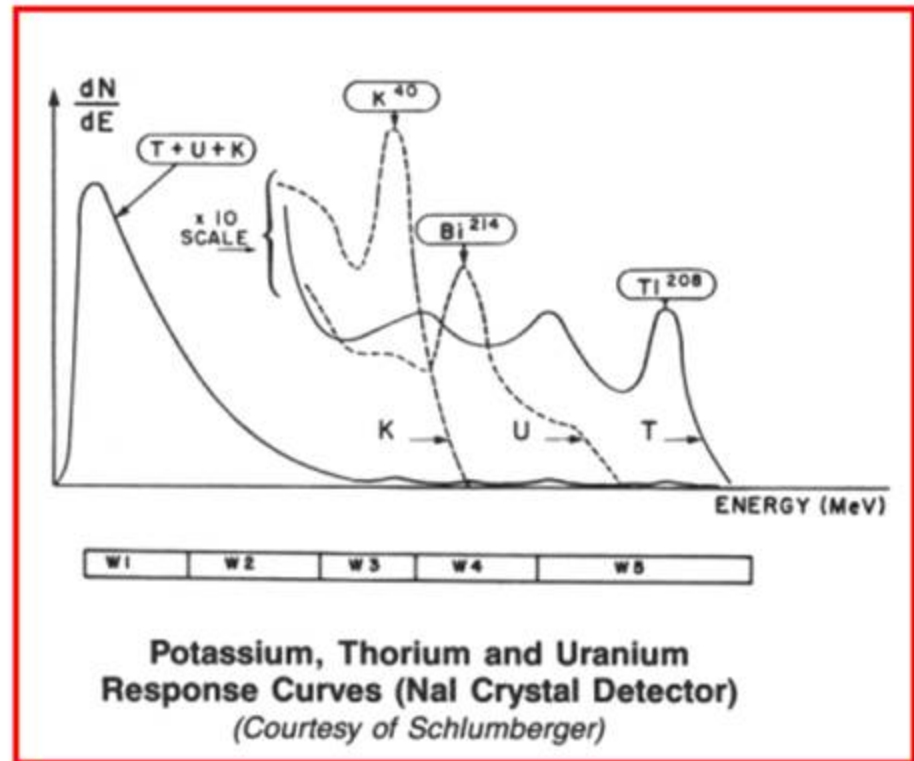
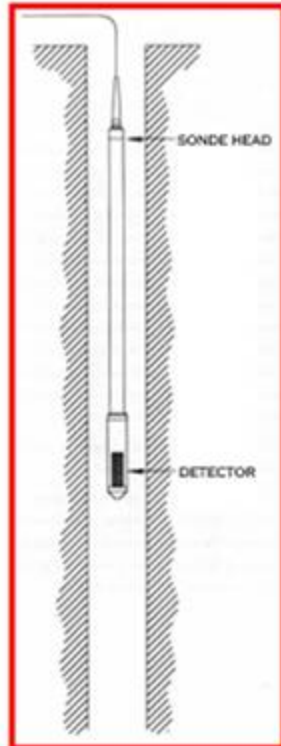
- calcaires

Mise en évidence :

- zones argileuses
- zones d'altération
- alternances marne-calcaire
- fractures colmatées avec de l'argile

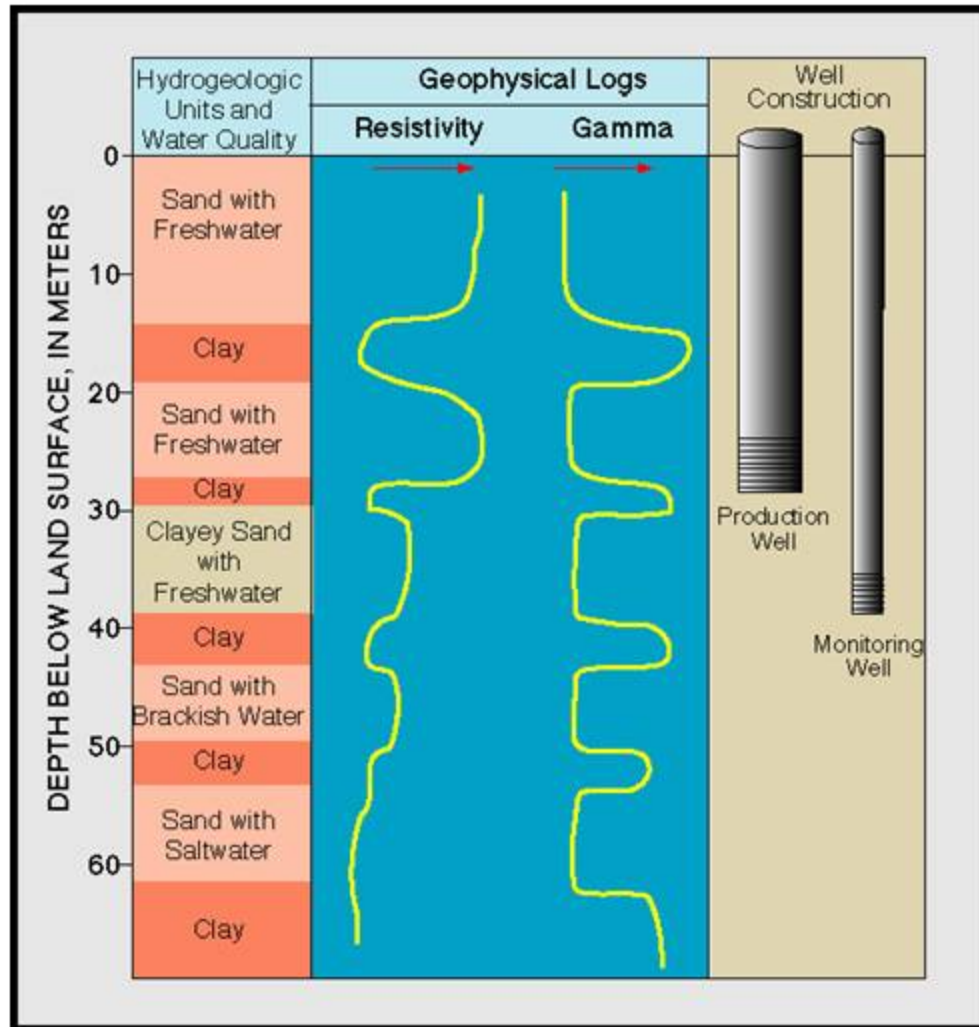


1- Log Gamma Ray



- Gamma ray total : Th+U+K+...
- Gamma ray spectral: (Th,U,K) → (Th+U+K)

1- Log Gamma Ray

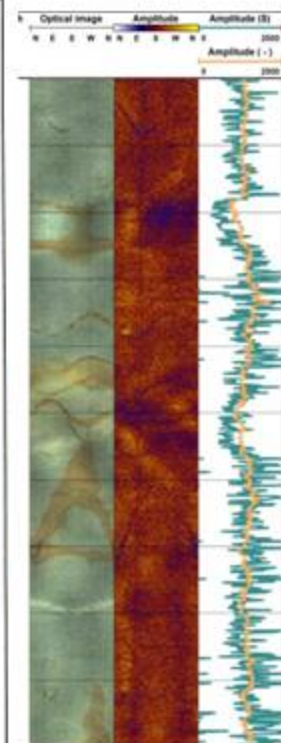
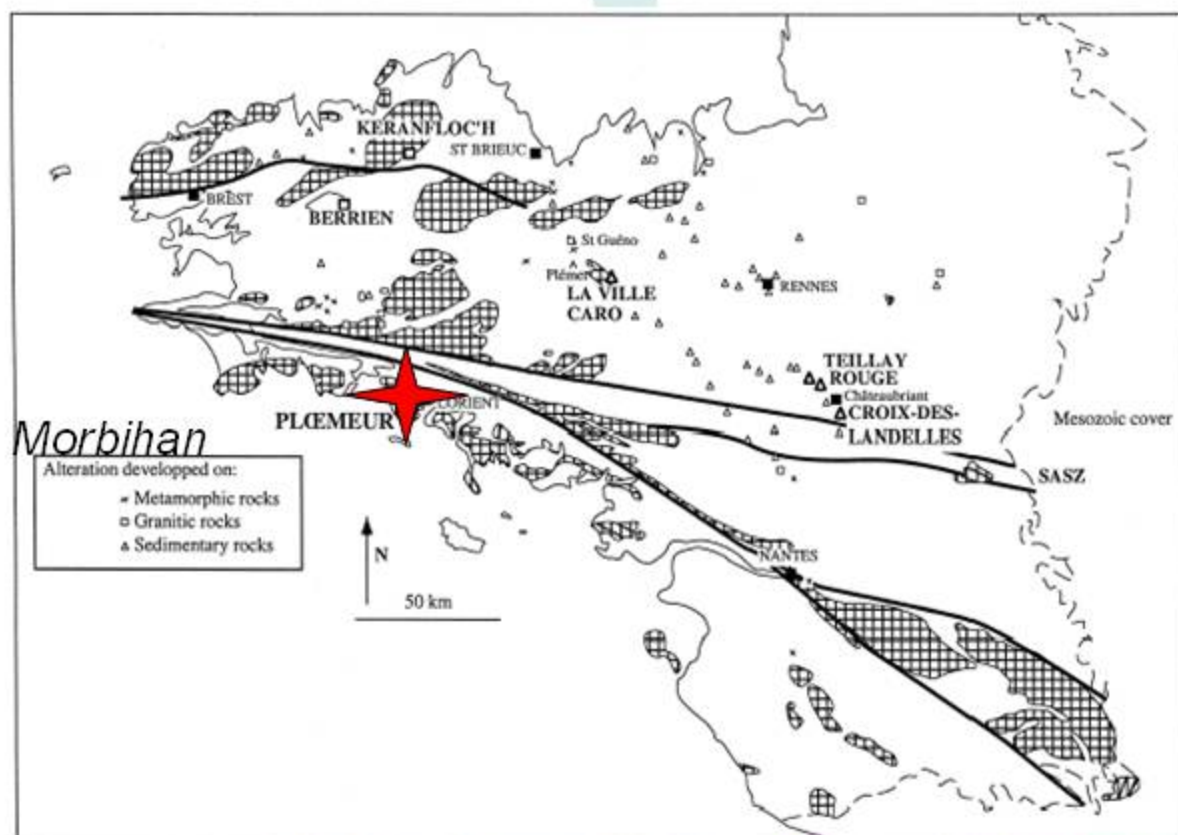


- Cartographie des lithologies
- Présence de barrières imperméables
- Formation riches en éléments radioactifs

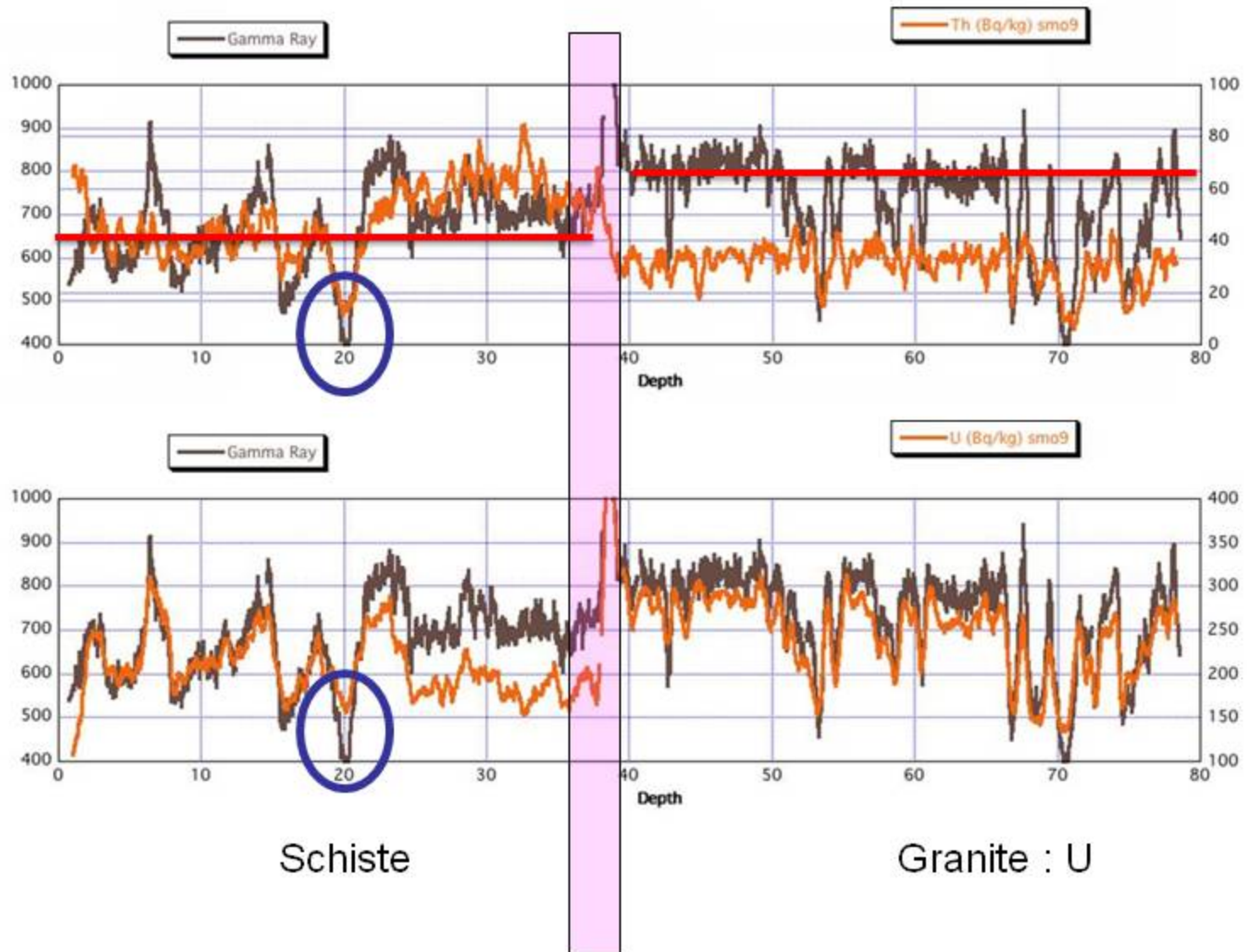


Site de Ploemeur (4 puits)

Structure Géologique + Cartographie des structures transmissives



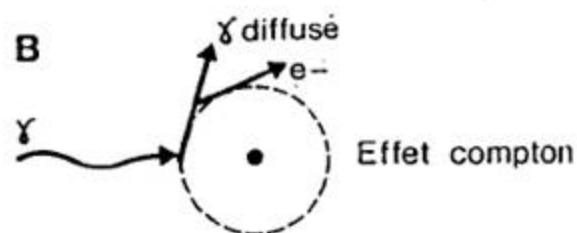
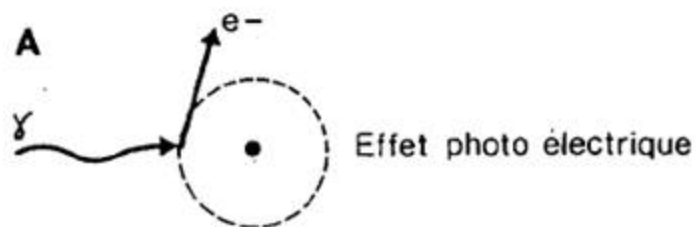
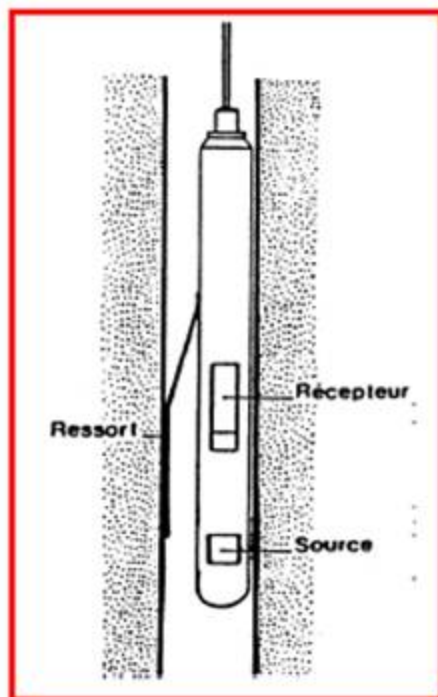
1- Log Gamma Ray Exemple du réservoir fracturé de Ploemeur



2- Radioactivité provoquée

Réponse du milieu à un bombardement radioactif.

Log γ - γ

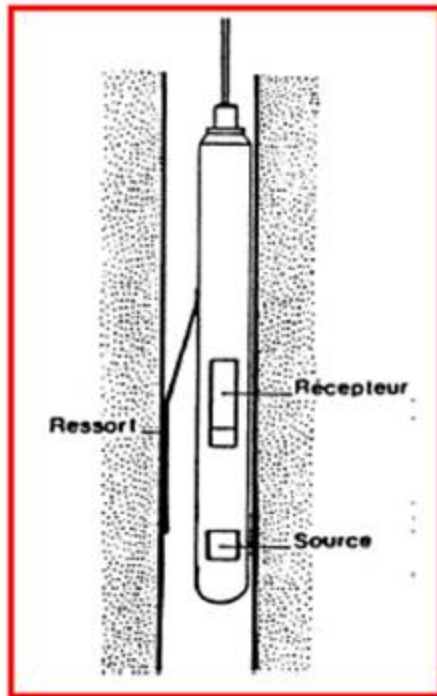


Fonction de l'énergie du photon gamma incident

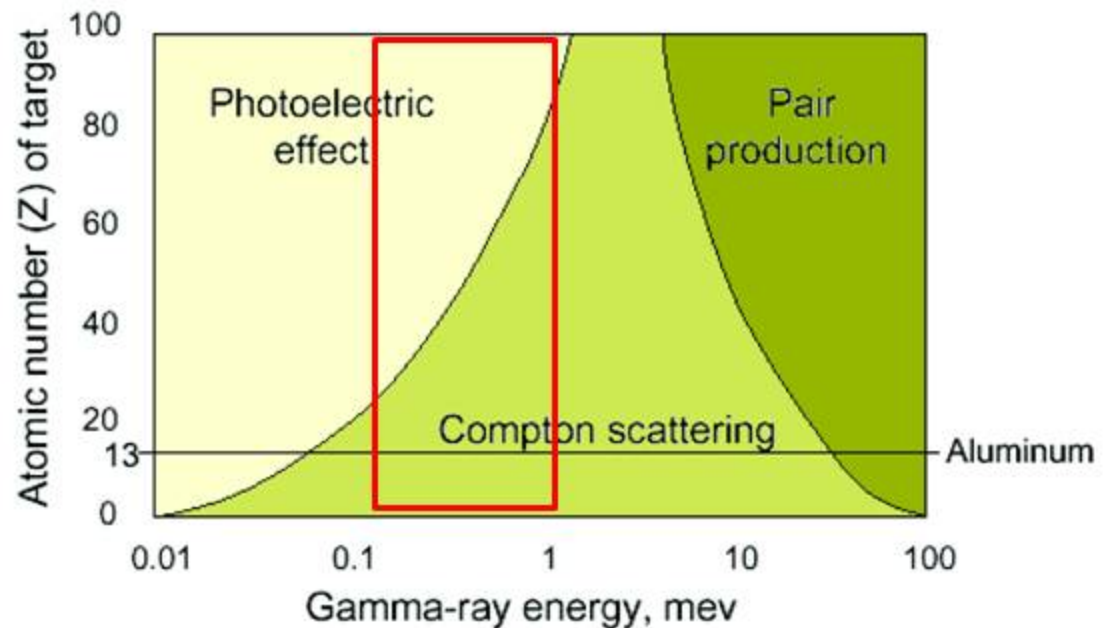
2- Radioactivité provoquée

Réponse du milieu à un bombardement radioactif.

Log γ - γ



Source = 0.1 à 1 Mev



Nb photons diffusés $\rightarrow$ densité électronique $\rightarrow$ densité de la formation

Log densité

2- Radioactivité provoquée

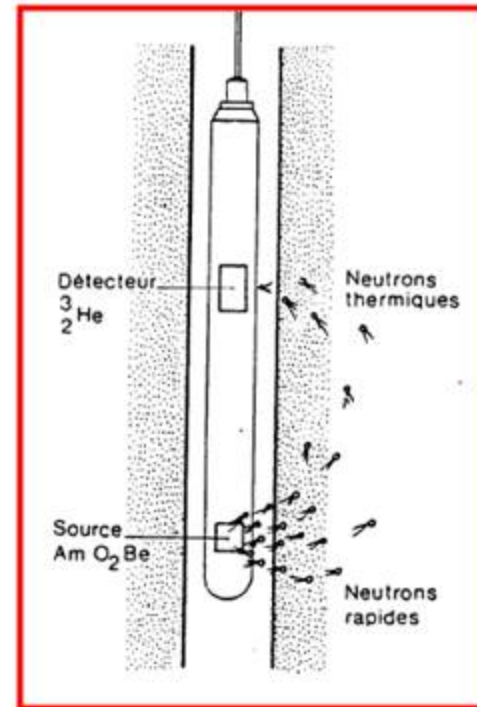
Réponse du milieu à un bombardement radioactif.

✓Émission de neutrons : interaction avec les molécules qui contiennent de l'hydrogène.

✓Huile ou l'eau : même quantité d'hydrogène par unité de volume, la réponse du neutron donnera donc une idée de la porosité.

✓Référence :
100 % pour de l'eau douce
0% pour un calcaire compact
($\text{CaCO}_3 = 0$ hydrogène).

Log Neutron

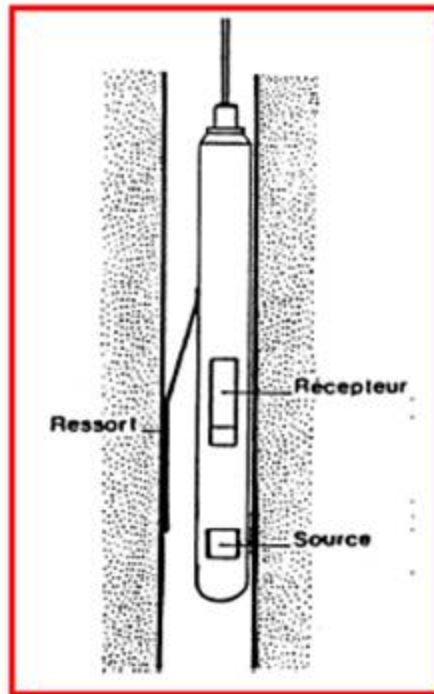


Log porosité

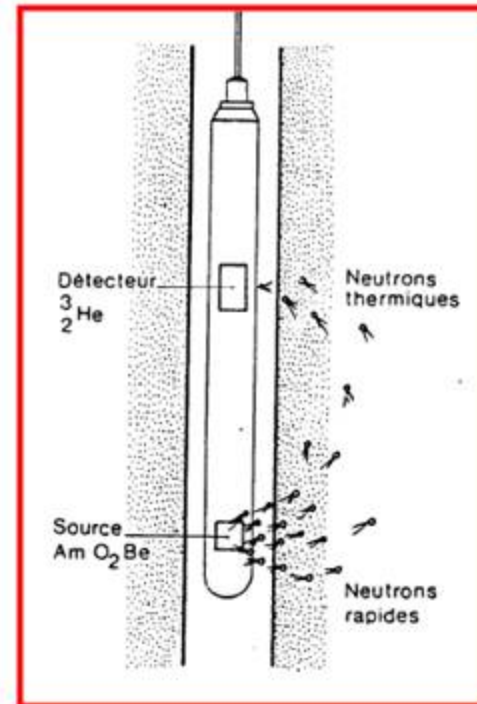
2- Radioactivité provoquée

Réponse du milieu à un bombardement radioactif.

Log γ - γ



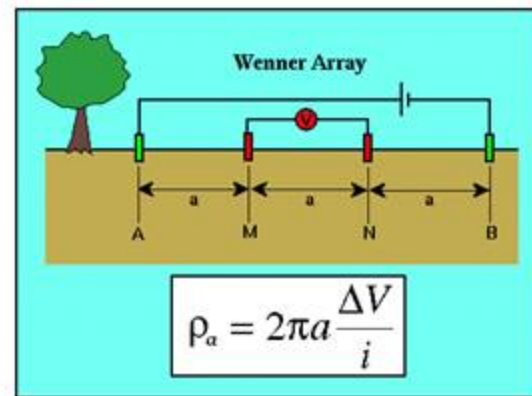
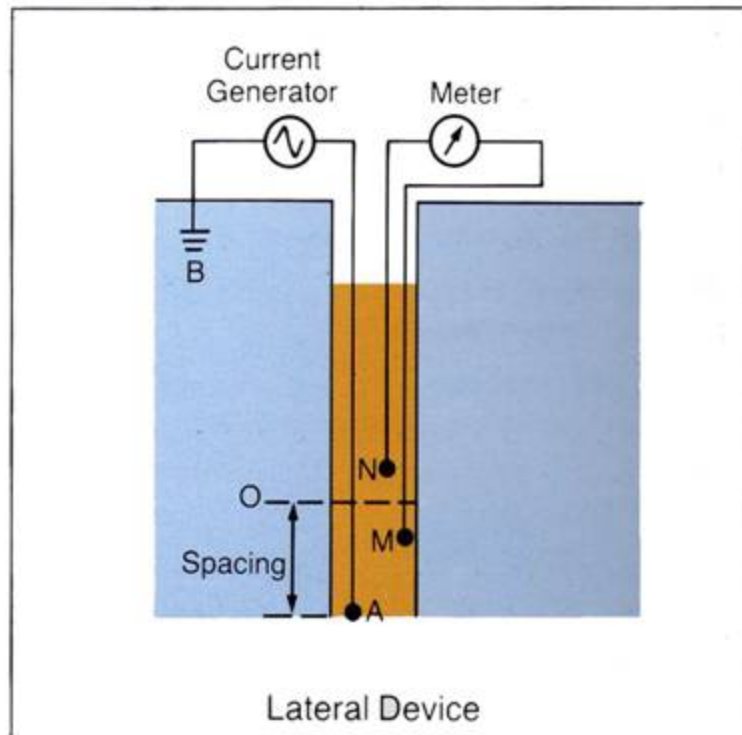
Log Neutron



Les méthodes électriques

Objectif: mesurer la résistivité des formations ➔ matrice + fluides (nature, ϕ)

Lateral Device

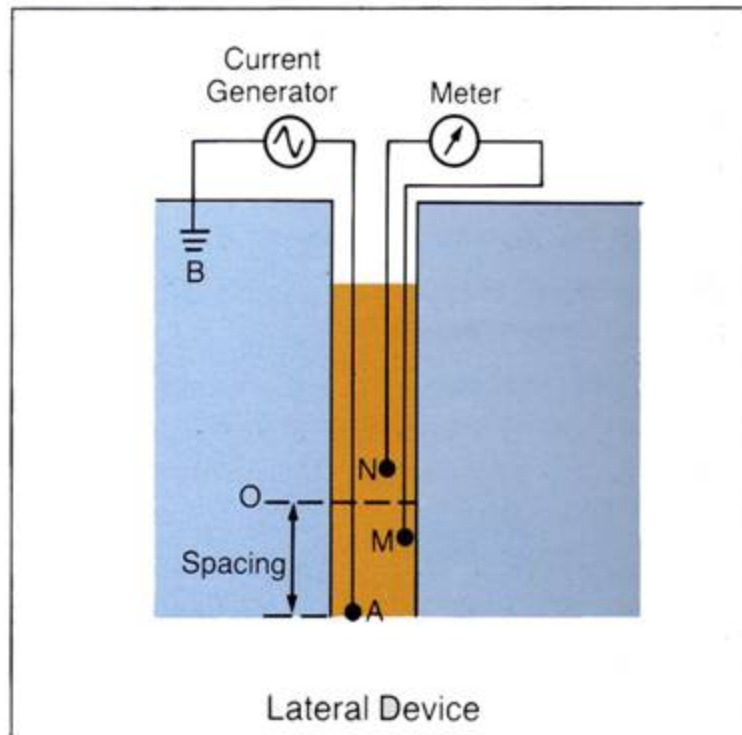


Enregistrement de la réponse du milieu à une injection de courant.

Les méthodes électriques

Objectif: mesurer la résistivité des formations ➔ matrice + fluides interstitiels

Lateral Device



$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$



K : coefficient de sonde

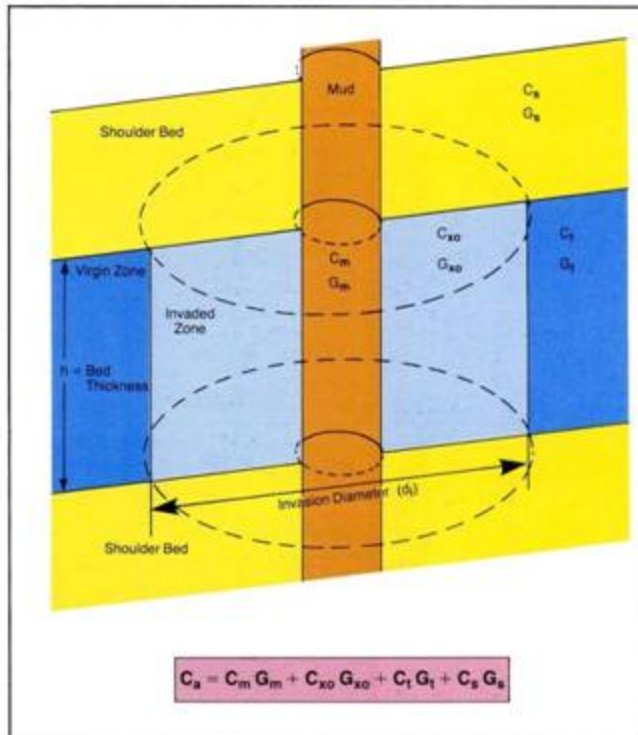
L : espacement entre électrodes

Plus L est grand, plus la profondeur d'investigation sera grande

Les méthodes électriques

Résistivité = formation géologique
+ boue de forage

Geometrical Factor



Résistivité formation géologique

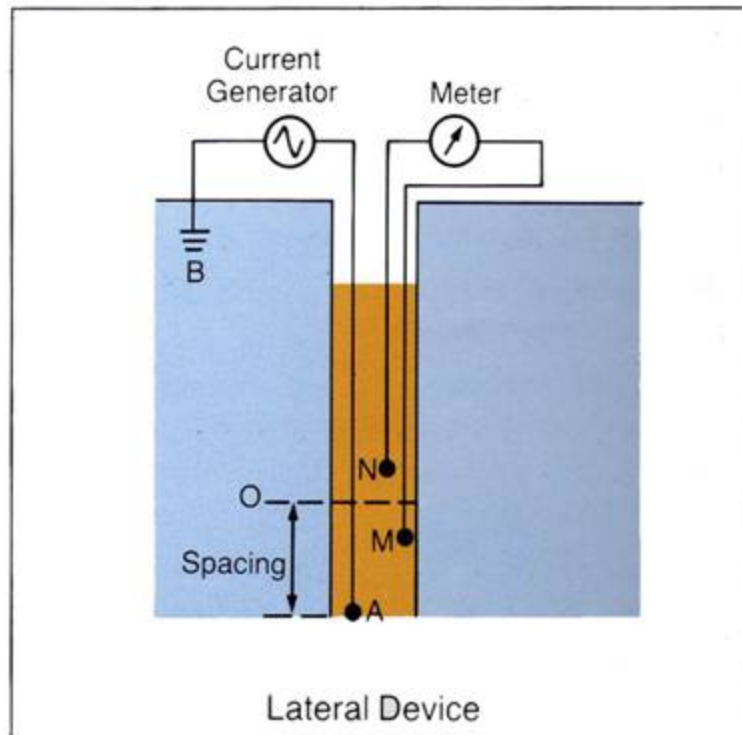


$L \gg$ zone envahie

Les méthodes électriques

Objectif: mesurer la résistivité des formations ➔ matrice + fluides interstitiels

Lateral Device



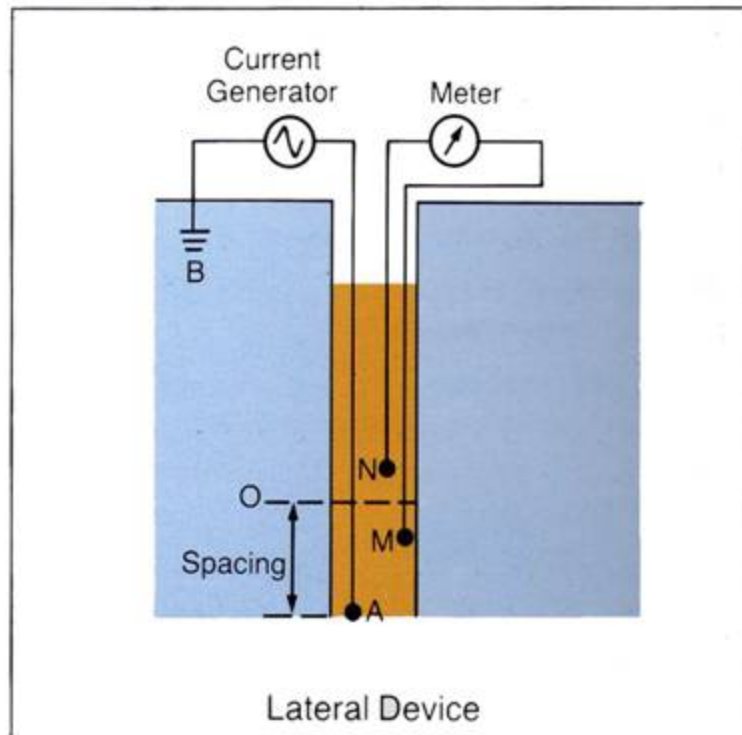
La résistivité varie avec:

- Lithologies
- Porosité
- Fracturation
- Fluides (salinité: $R_w=0.2$ pour eau de mer et $R_w= 10$ à 100 pour eau douce)

Les méthodes électriques

Objectif: mesurer la résistivité des formations ➔ matrice + fluides interstitiels

Lateral Device



Mise en œuvre:

- Absence de tubage métallique ou plein
- Forage plein (fluide conducteur)

Les méthodes électriques

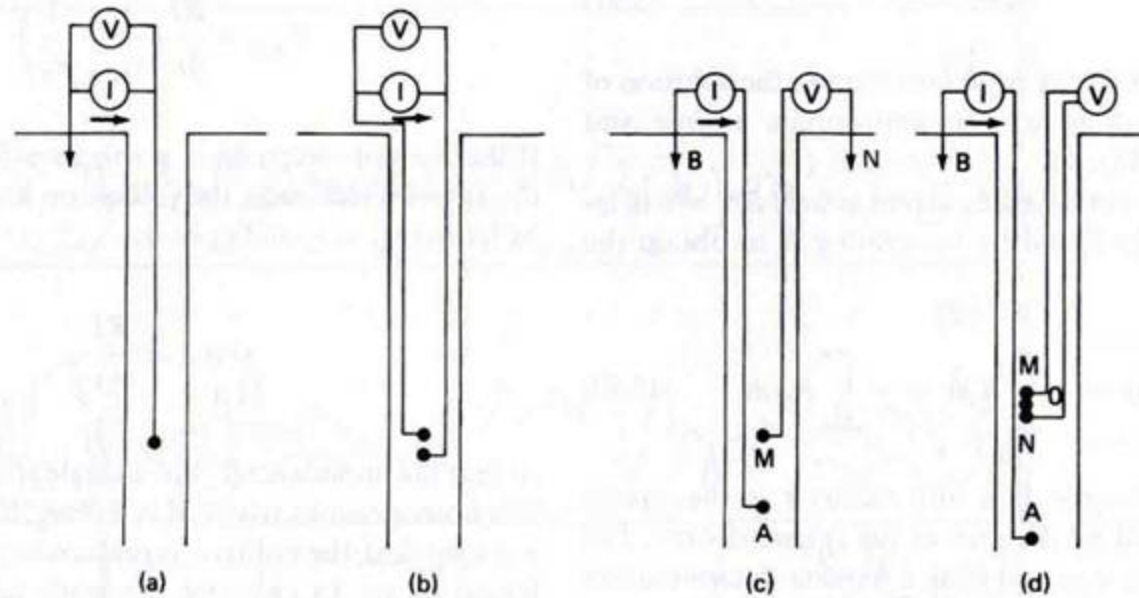
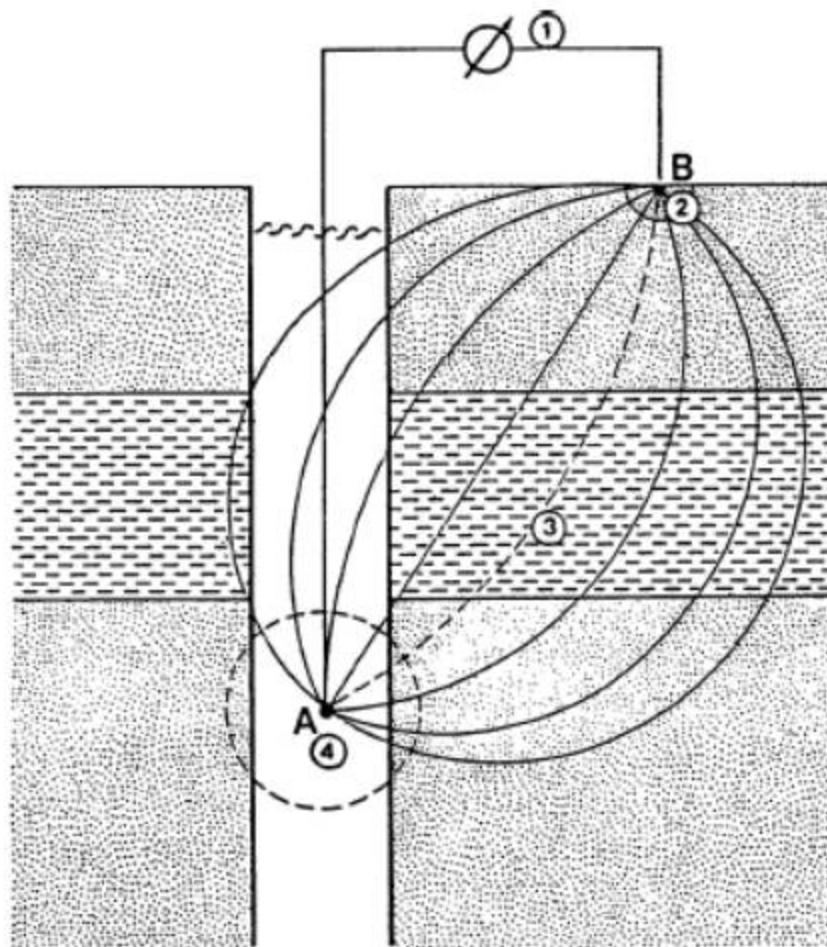


Figure 5.30 Electrode arrangements of four common arrays with current source I and voltage measurement V :
(a) single-point resistance; (b) differential resistance; (c) normal array; (d) lateral array

1- Dispositif « Single Point »

Résistivité entre une électrode en surface et une électrode dans le forage.



Très bonne résolution verticale

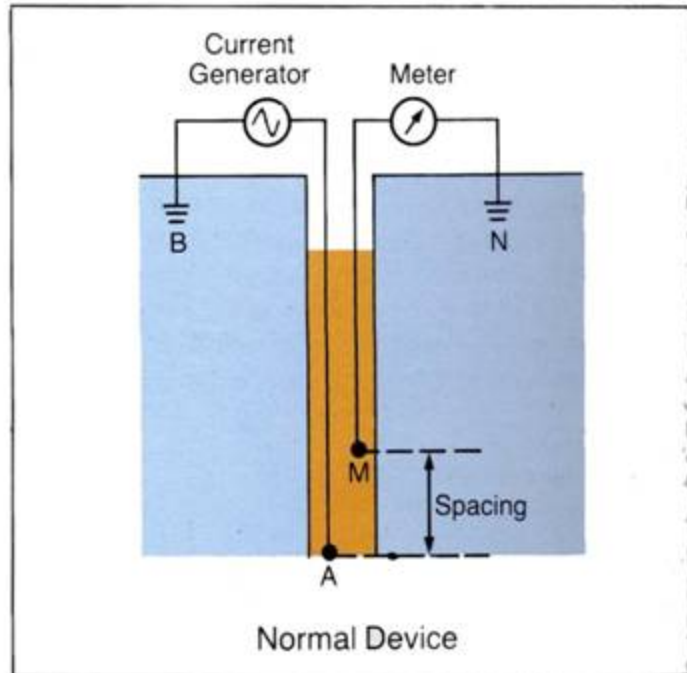
La courbe est symétrique par rapport au milieu du banc et les limites des couches aux points d'inflexions.

PB : mesure très influencée par R_m et caliper.

2- Dispositif « normal »

Résistivité des formations autour du forage.

Normal Device



Potentiel M est issu de A avec (B, N) à l'infini

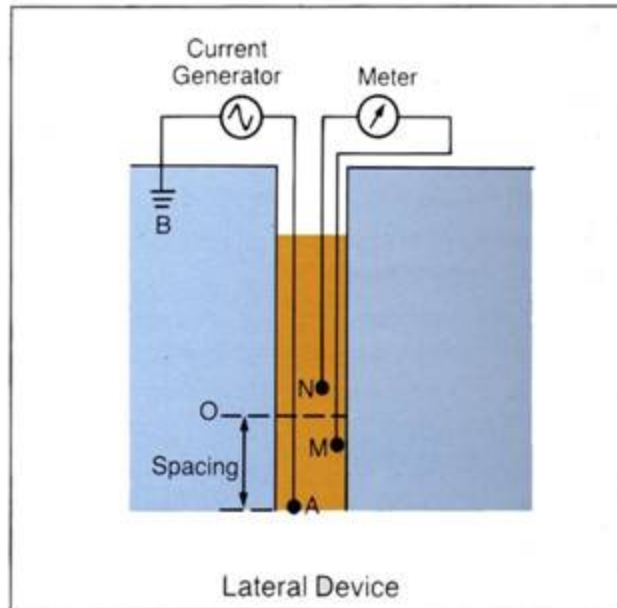
- Rayon d'investigation = $2AM$
- Résolution verticale = $2AM$

➔ Short normal 16" ($AM=40$ cm)

➔ Long normal 64" ($AM=160$ cm)

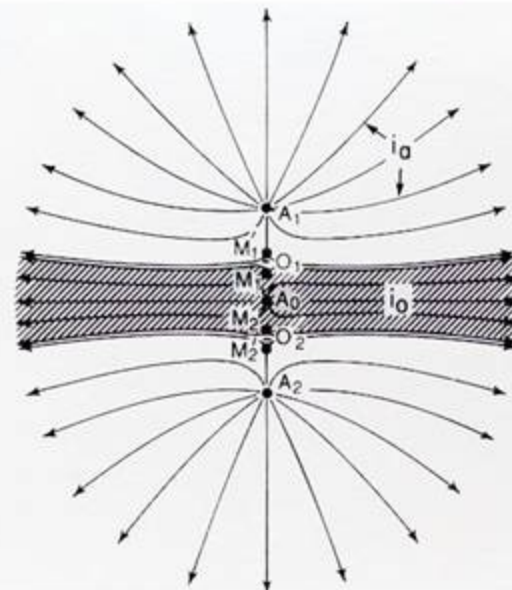
3- Dispositif « latéral »

Lateral Device

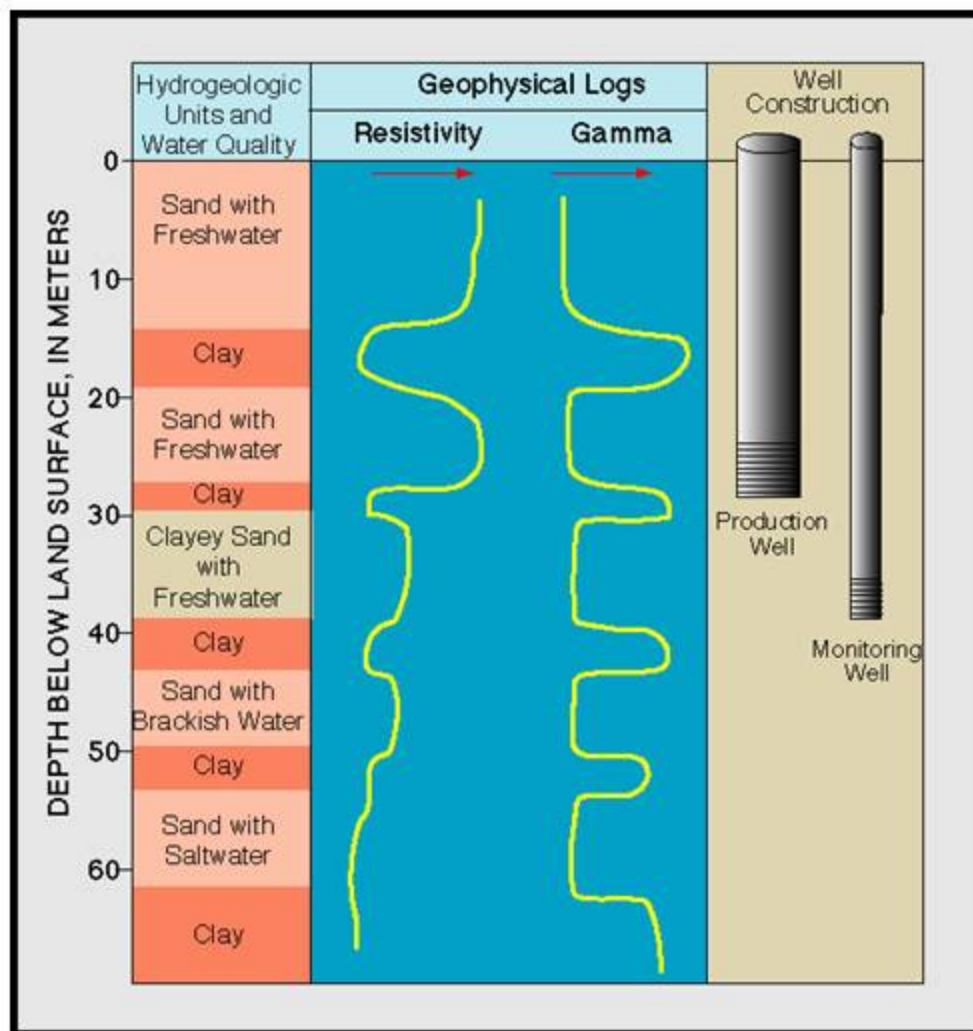


- Rayon d'investigation = AO
- Résolution verticale = AO

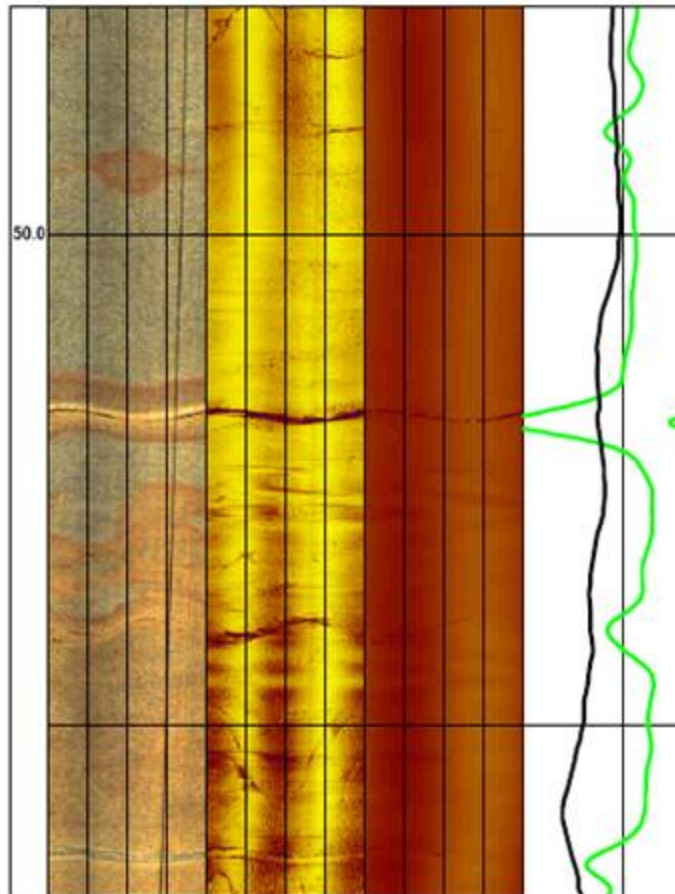
« outil focalisé » pour diminuer l'influence des couches adjacentes



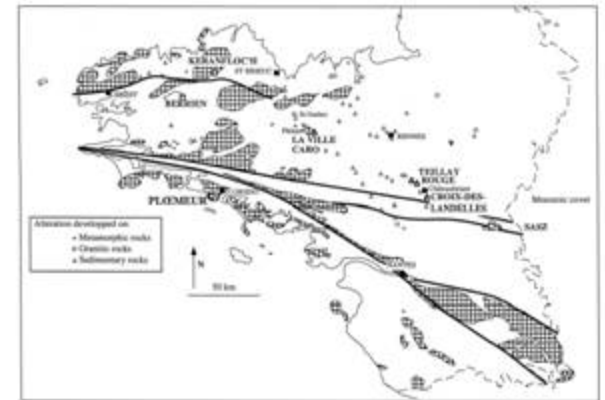
Résistivité: détection des zones poreuses



Résistivité: détection des fractures



Page 7

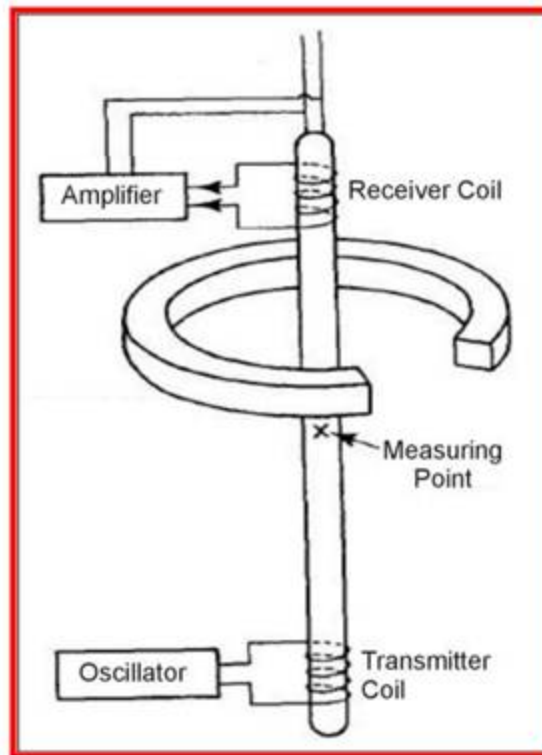


Fractures fermées?



4- Autre dispositif : induction électromagnétique

Trou rempli d'air → méthode électromagnétique



Conductivité



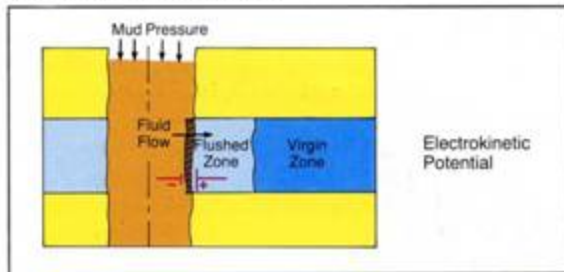
Résistivité

Porosité, perméabilité, argile

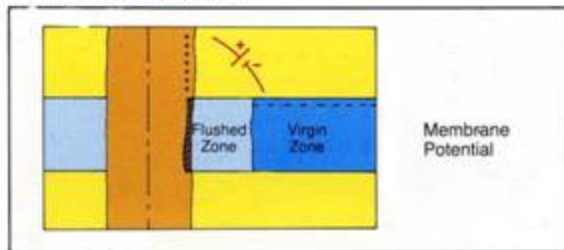
4- Potentiel spontané: lithologie et fluides

Enregistrement des différences de potentiel dont l'origine est naturelle.

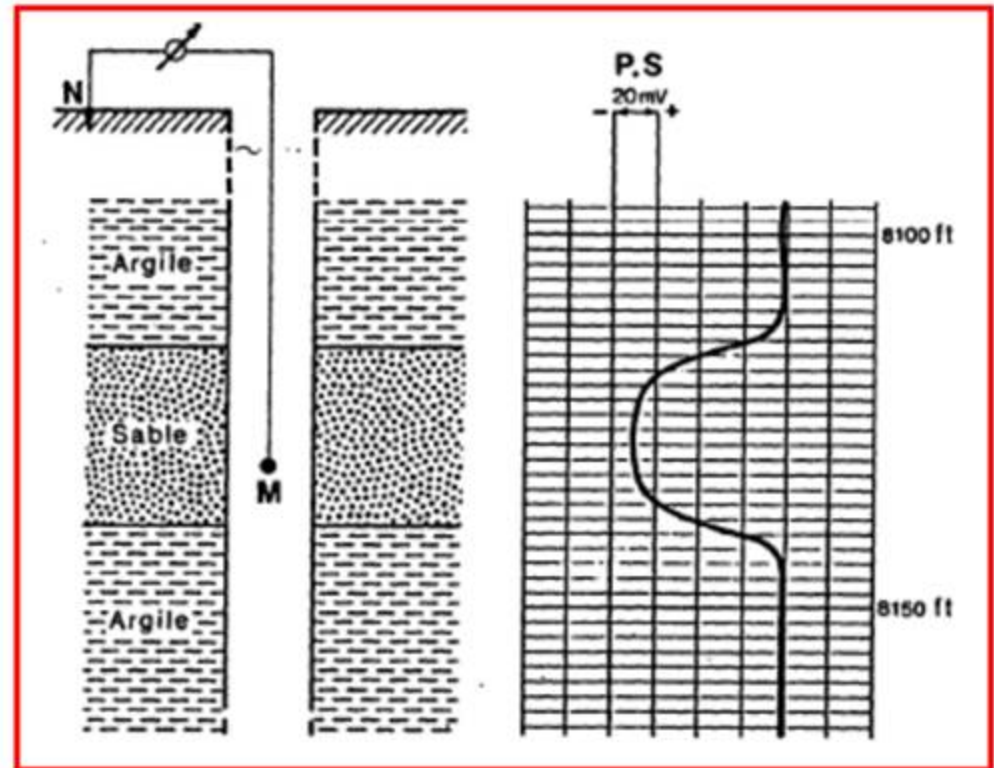
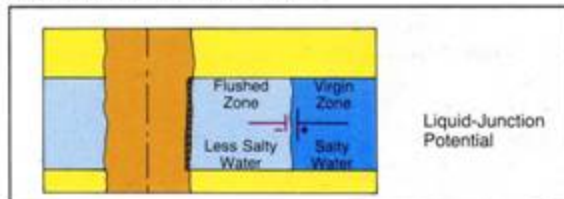
Electrokinetic Potential



Membrane Potential

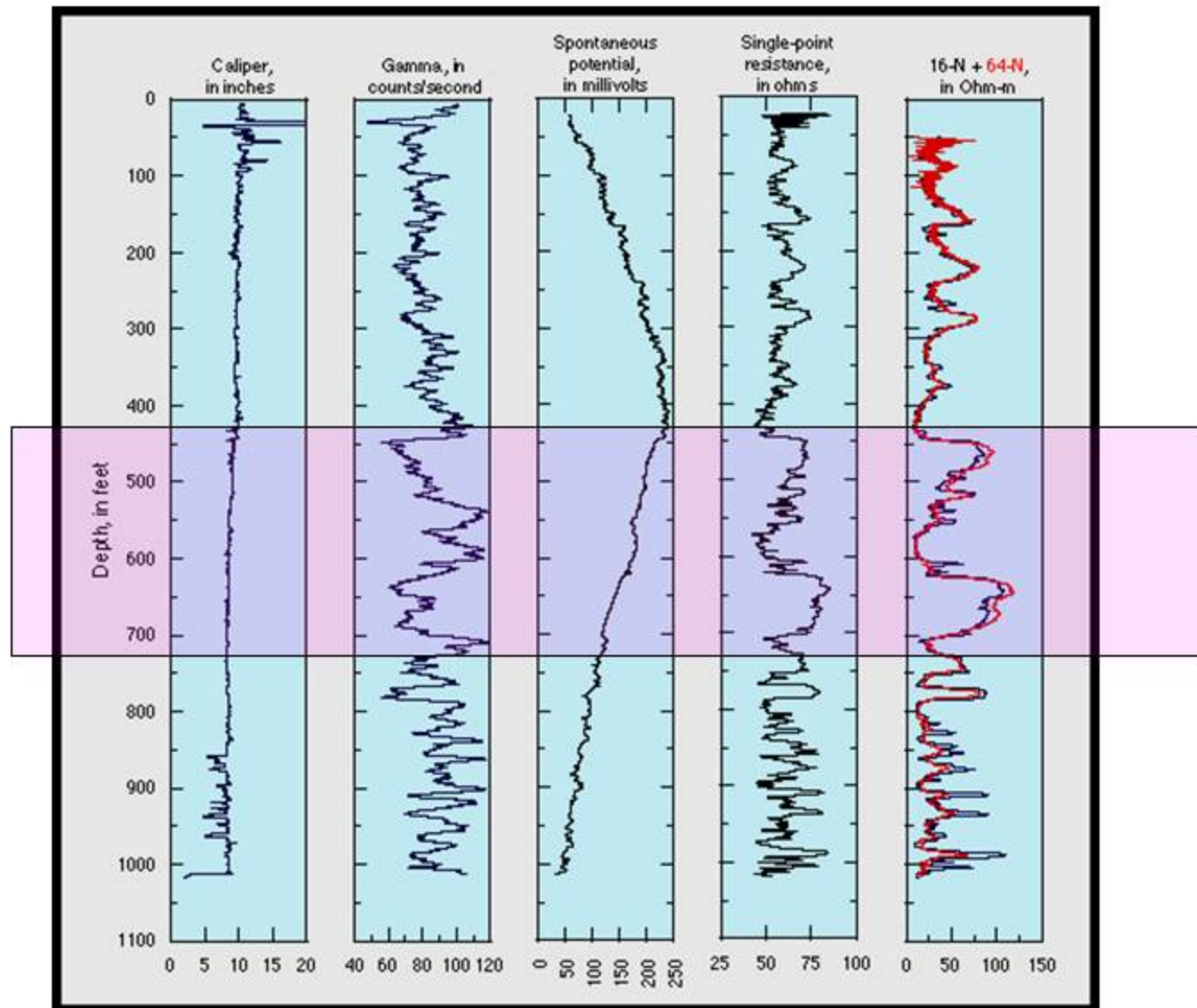


Liquid-Junction Potential

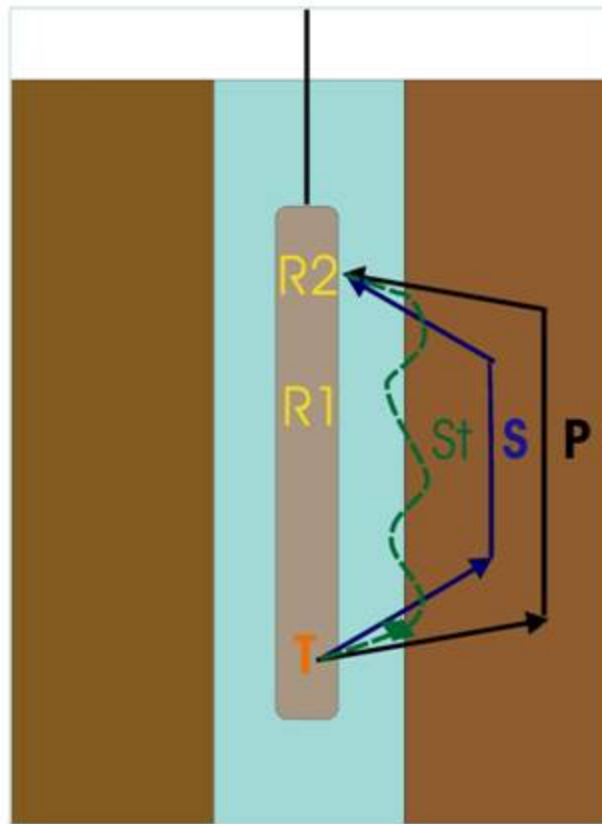


- Présence d'argile
- Écoulements

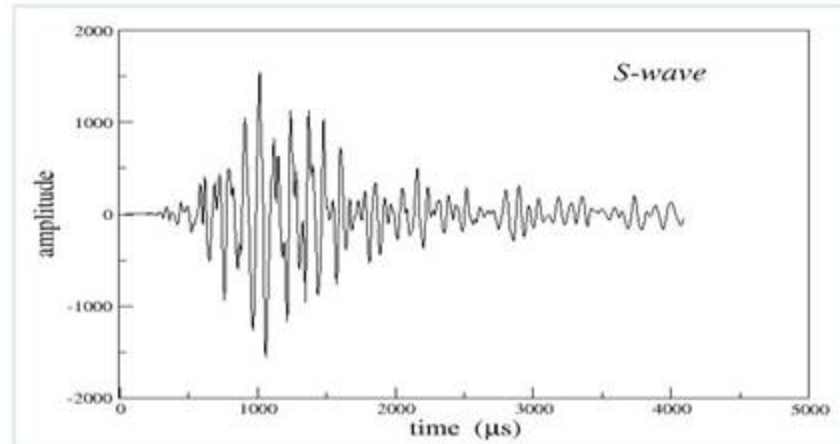
Exemple d'un aquifère dans un bassin alluvionnaire



Les méthodes acoustiques



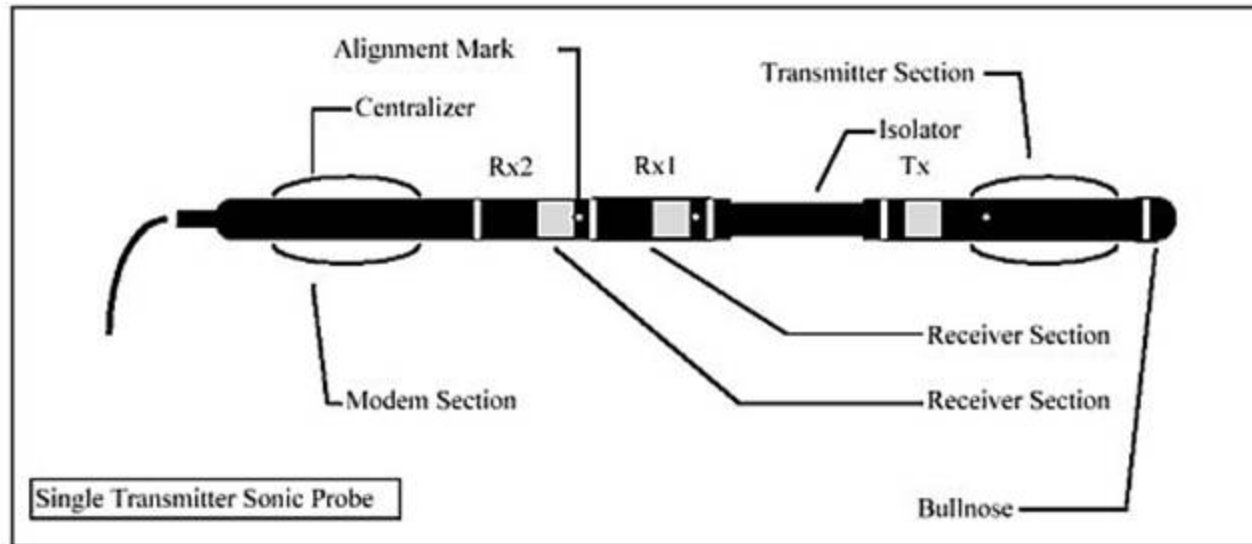
Outil sonique



Objectif: caractérisation du milieu

- Lithologie
- Fractures
- Propriétés élastiques

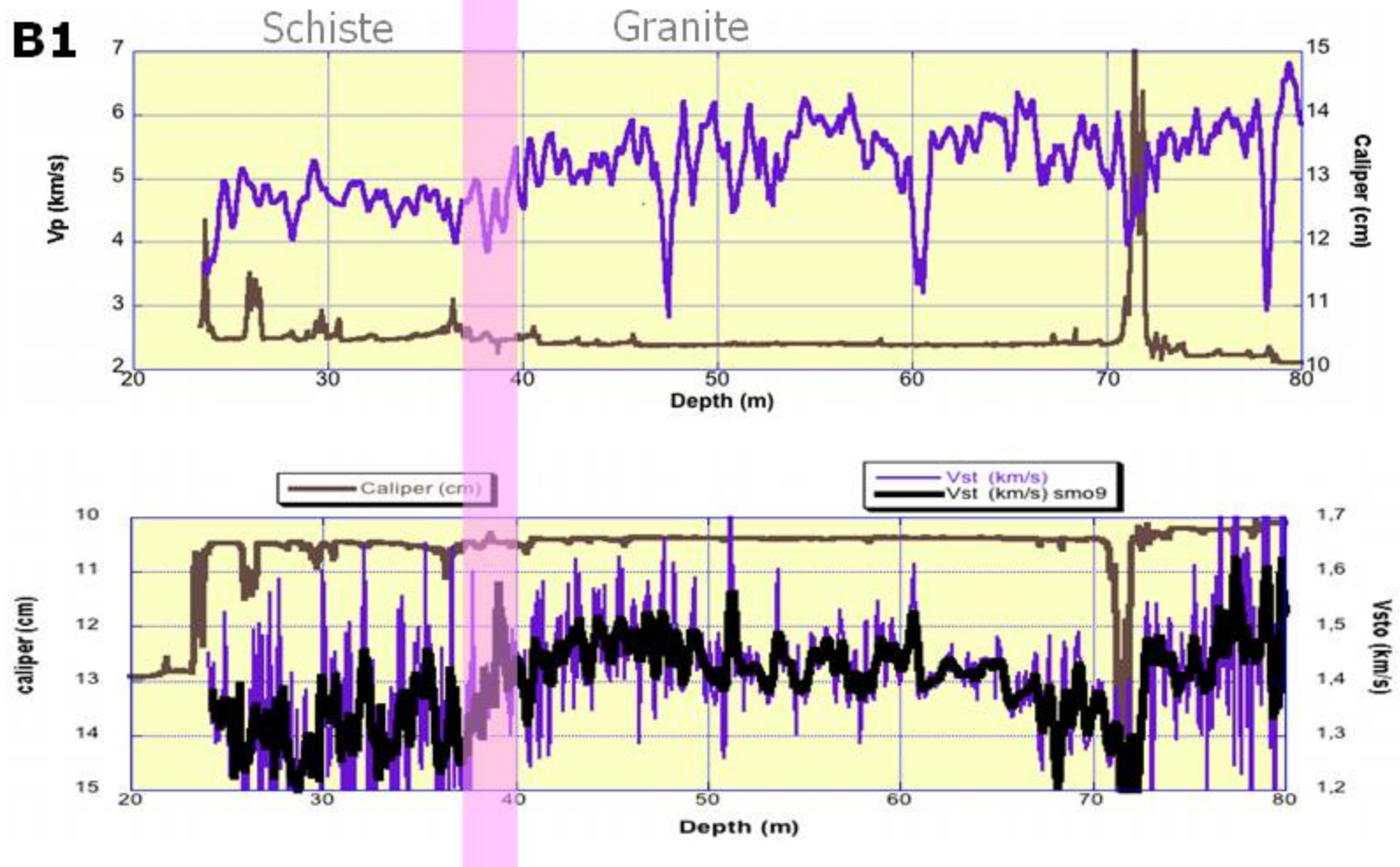
La méthode sonique



- Monopôle (10-30 kHz) / Dipôle (1 -3 kHz)
- Fréquences = 1 à 30 kHz

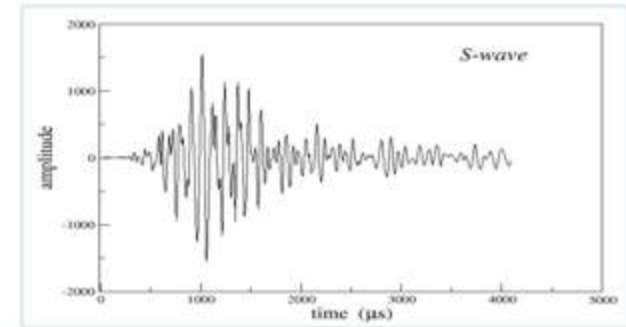
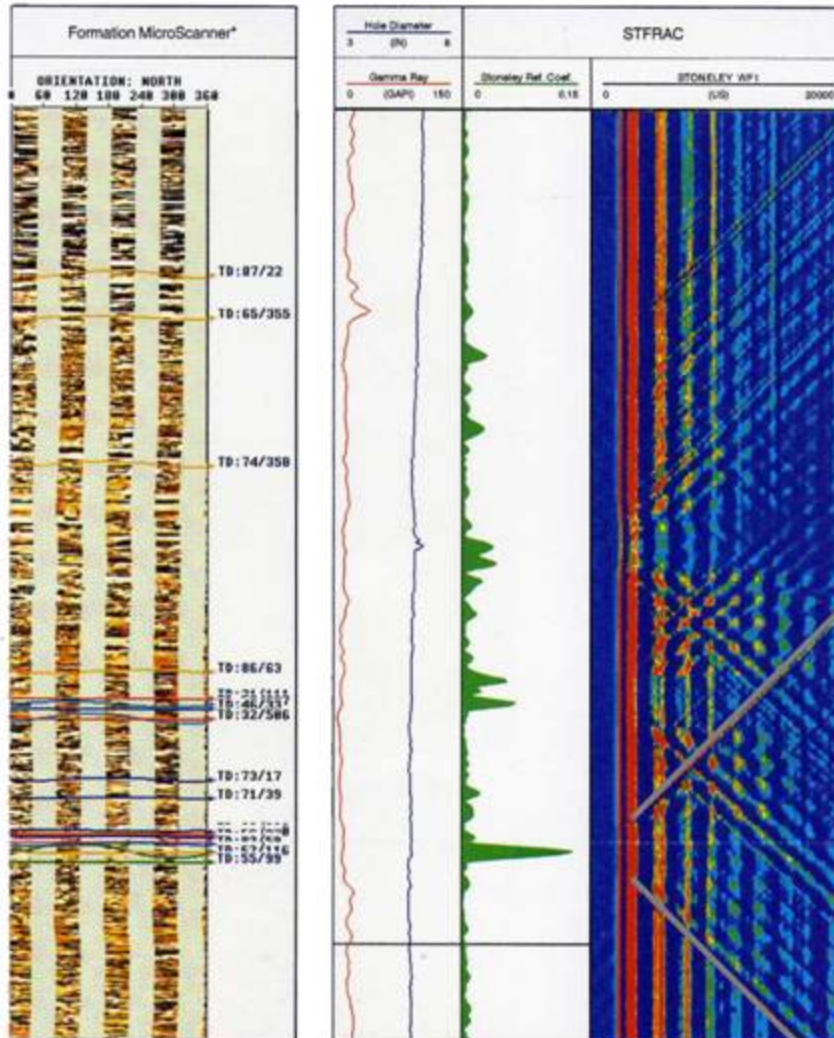
La méthode sonique Exemple du réservoir fracturé de Ploemeur

B1



La méthode sonique

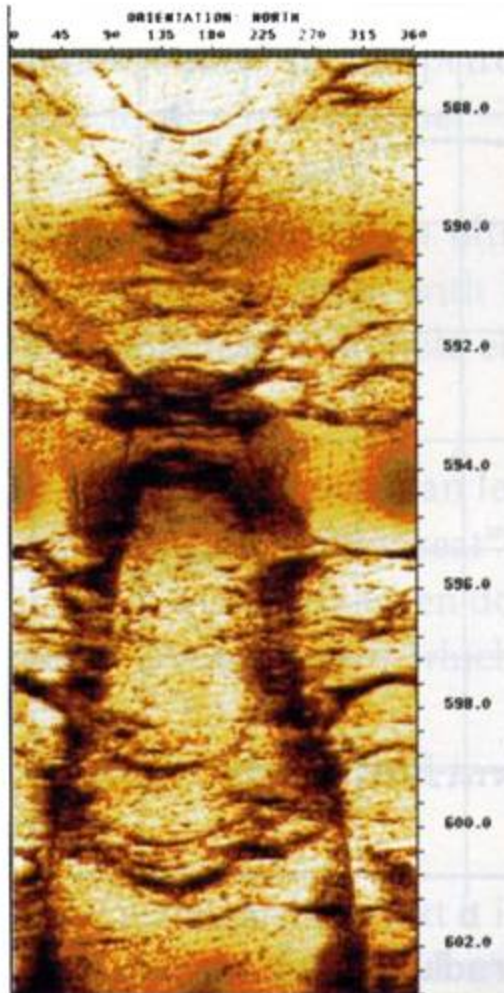
DSI Fracture Imaging



Réflexion dans la fracture

Les méthodes d'imagerie de parois

Objectif: image 3D des parois du forage



Imagerie de parois

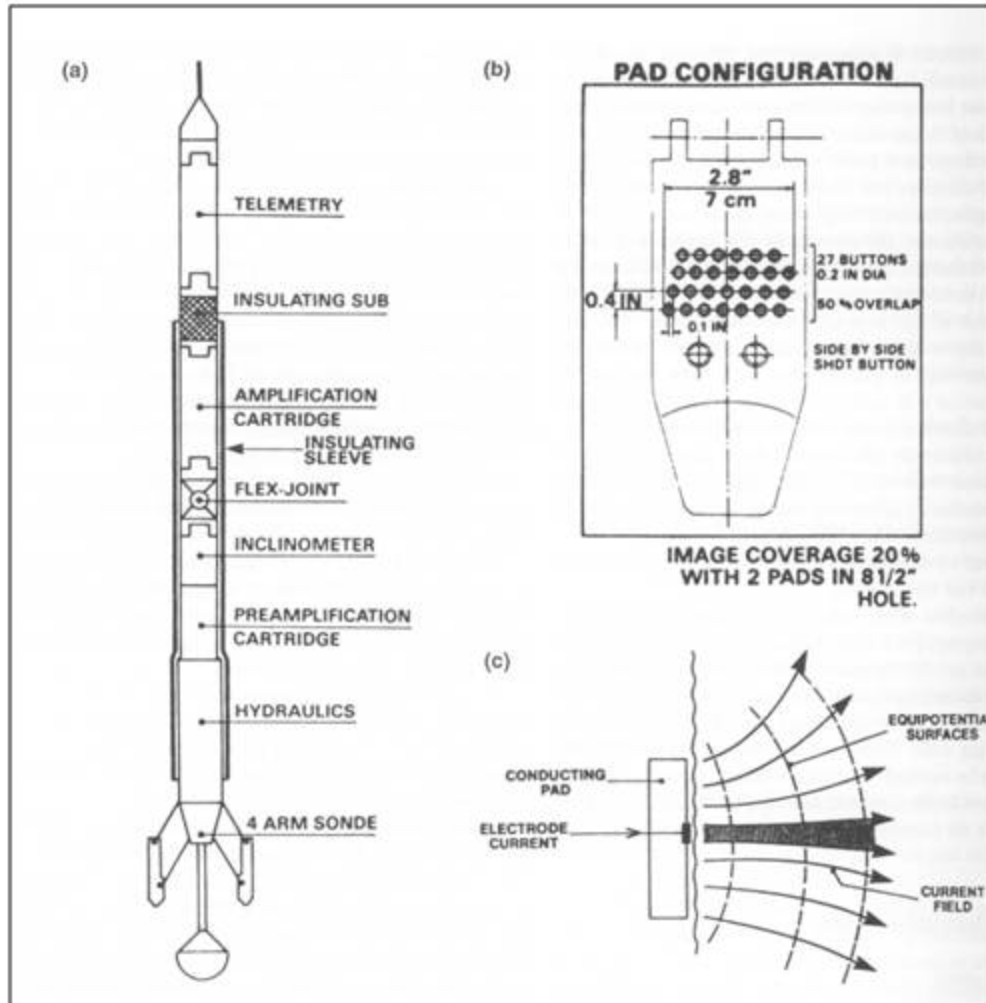


Scanner



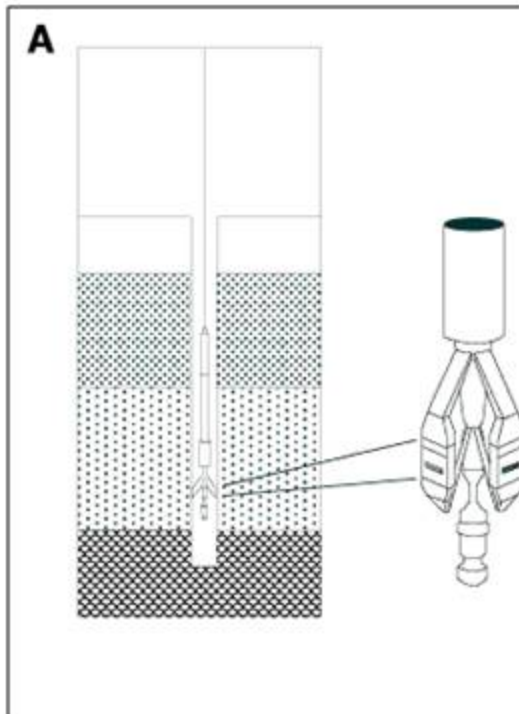
- Fractures
- Forme du forage
- Lithologie / Texture de la roche

1- La méthode électrique



FMS : Formation MicroScanner à 2 ou à 4 patins

1- La méthode électrique

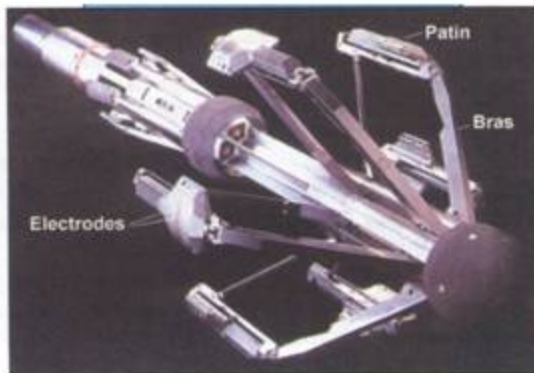


Microscanner des résistivités:

- couleurs claires = fortes résistivités
- couleurs sombres = faibles résistivités

➔ Résolution = 5 mm

Objets géologiques très petits

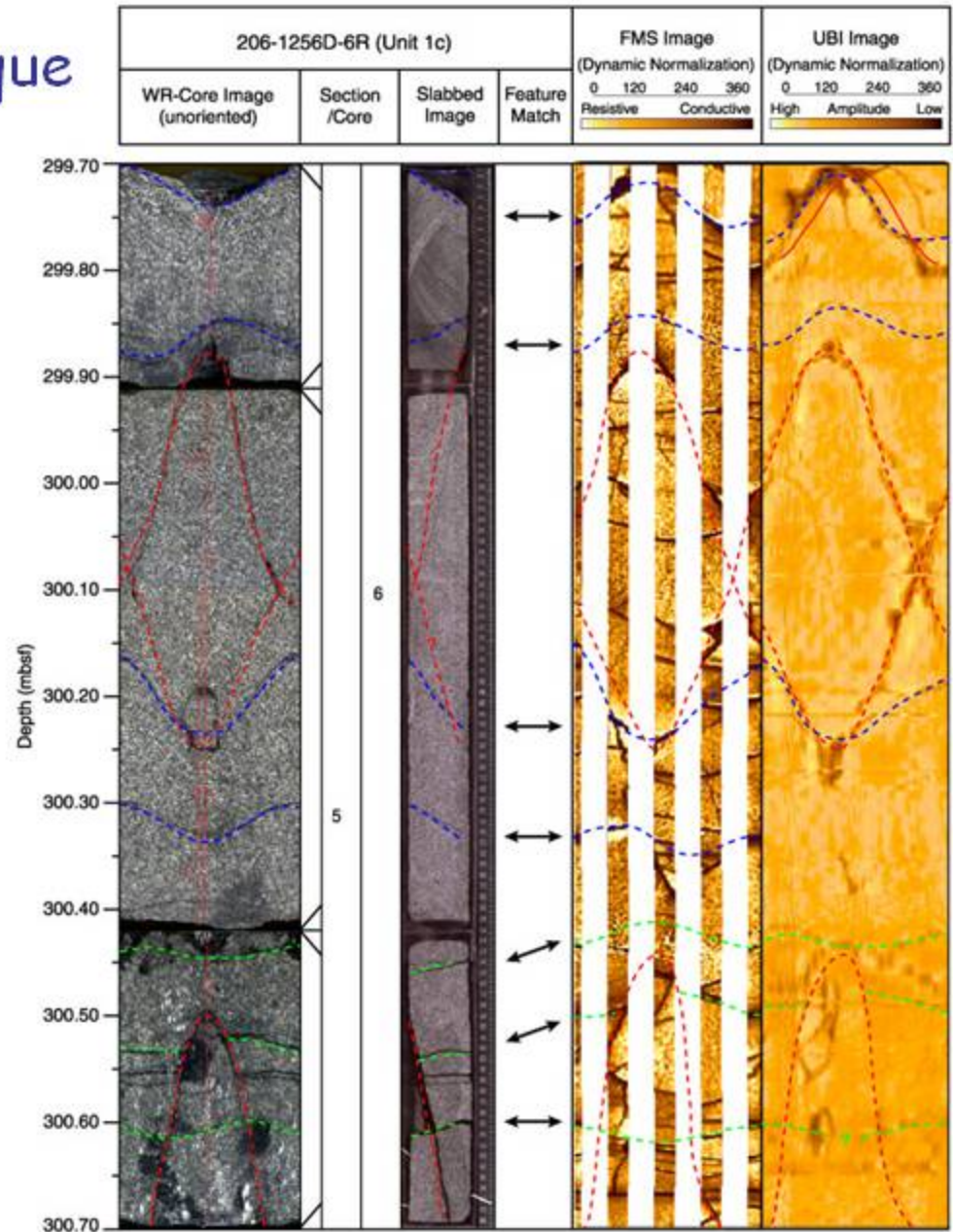


FMI: Fullbore Formation MicroImager

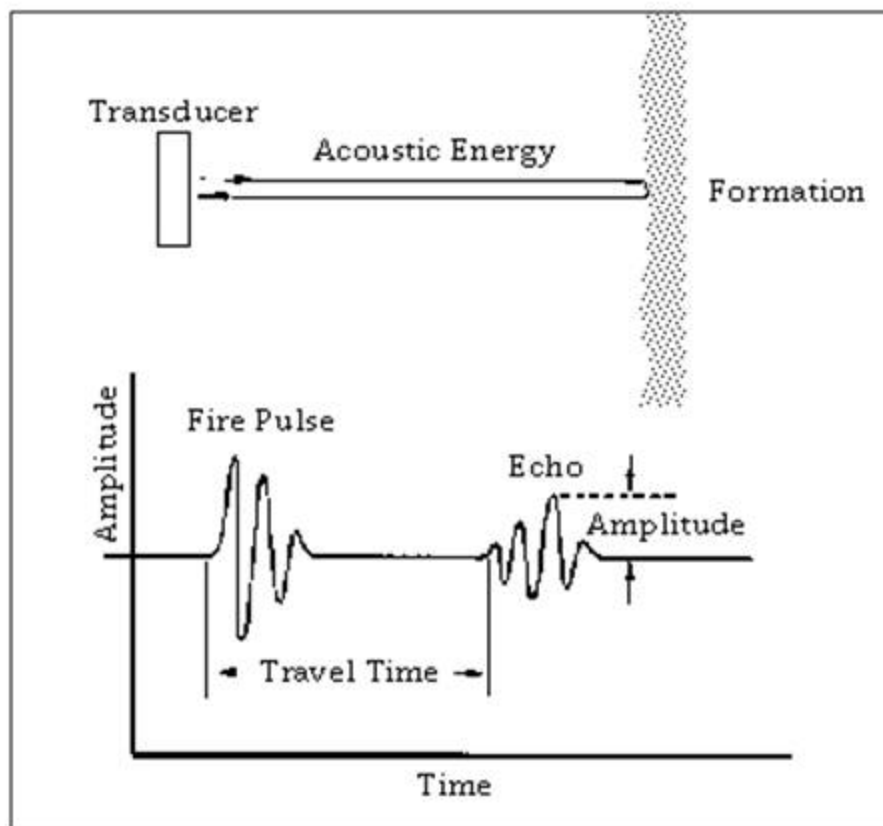
(4 patins + 4 rabats - 24 électrodes)

1- La méthode électrique

- Formations et dépôts,
- Fractures,
- Inclinaison, ...



2- La méthode acoustique



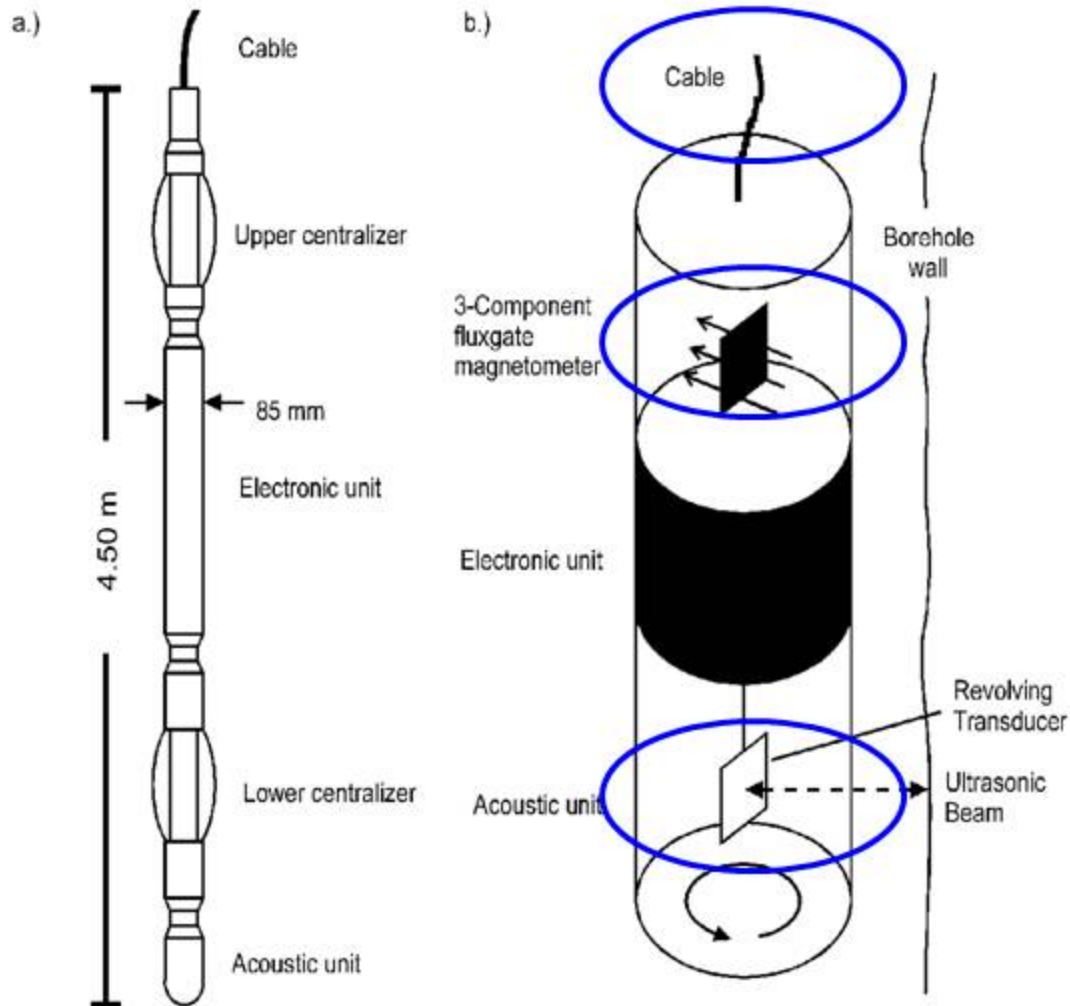
Principe:

- Réflexion
- Fréquences : 200 - 500 kHz - MHz
- Faible pénétration
- Compromis entre HR et atténuation (boue)

Mesures = temps de parcours et amplitude

- t → forme du forage
- A → variation lithologie

2- La méthode acoustique



Moteur

$600 \text{ tr/s} \rightarrow 1^\circ$

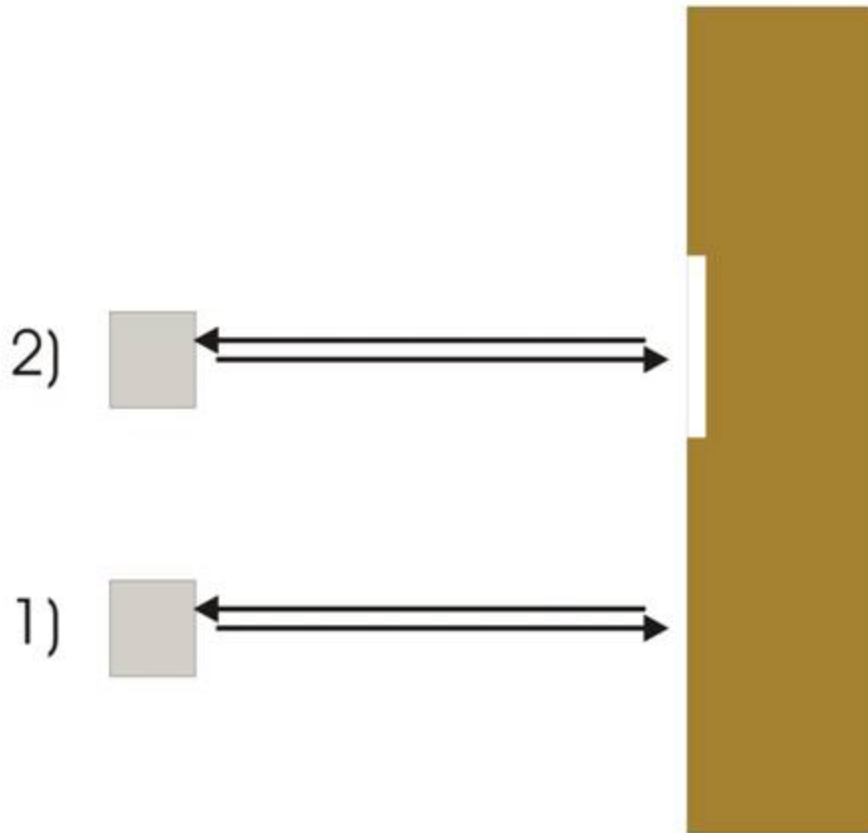
Magnétomètre

$\rightarrow$ *Orientation azimuthale*

Émetteur - Récepteur

BHTV: Borehole Teleseismic Viewer

2- La méthode acoustique



Le temps de transit est fonction de la distance entre le capteur et la paroi.

Élargissement = Retard

t → forme du forage

2- La méthode acoustique

A → impédance → variation lithologie

$$Z = \rho V$$

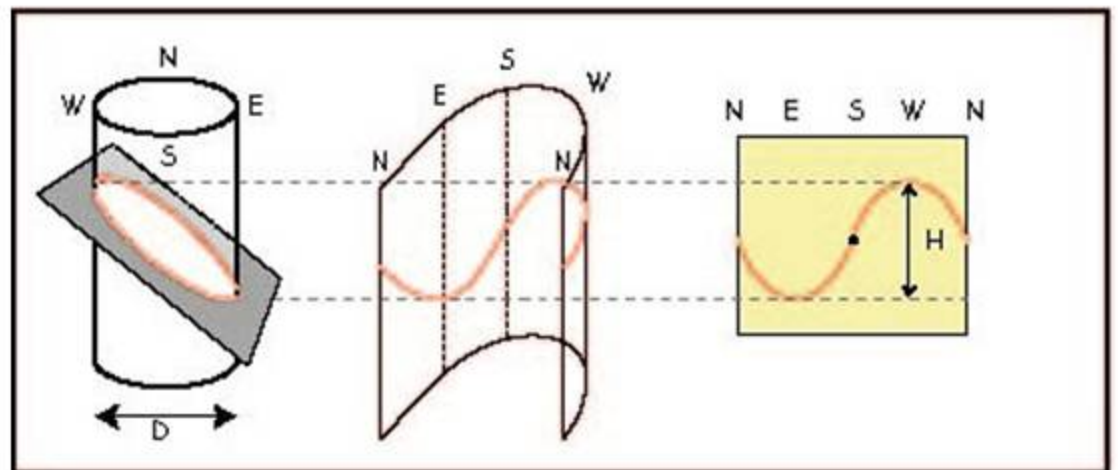
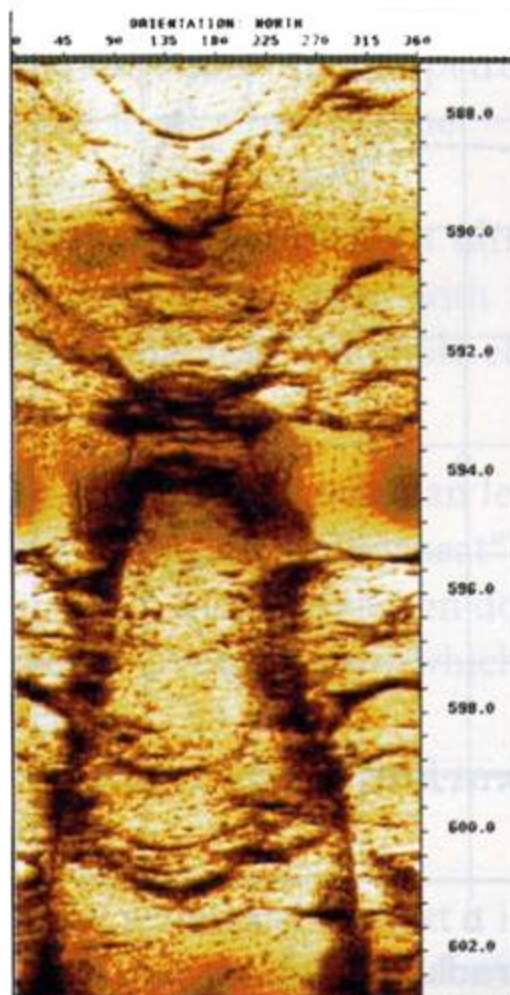
Table 2.3.2 Acoustic properties of some materials (modified from Hayman et al., 1991)

Material	Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Acoustic velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	Acoustic impedance (MRayl)
Air (1-100 bar)	1.3 – 130	330	0.0004 – 0.04
Water	1000	1500	1.5
Drilling fluids	1000 – 2000	1300 – 1800	1.5 – 3.0
Shales	1900 – 2450	2300 – 3400	4.5 – 8.3
Sandstone (20 %)	2320	3900	9.0
Limestone (20 %)	2370	4200	10.0
Dolomite (20 %)	2520	4950	12.5
Anhydrite	2960	6100	18

1- La méthode acoustique

Interprétation des images: fractures

- Diminution amplitude
 - Calcul orientation
- ➔ **Cartographie** (profondeur, angle, direction)

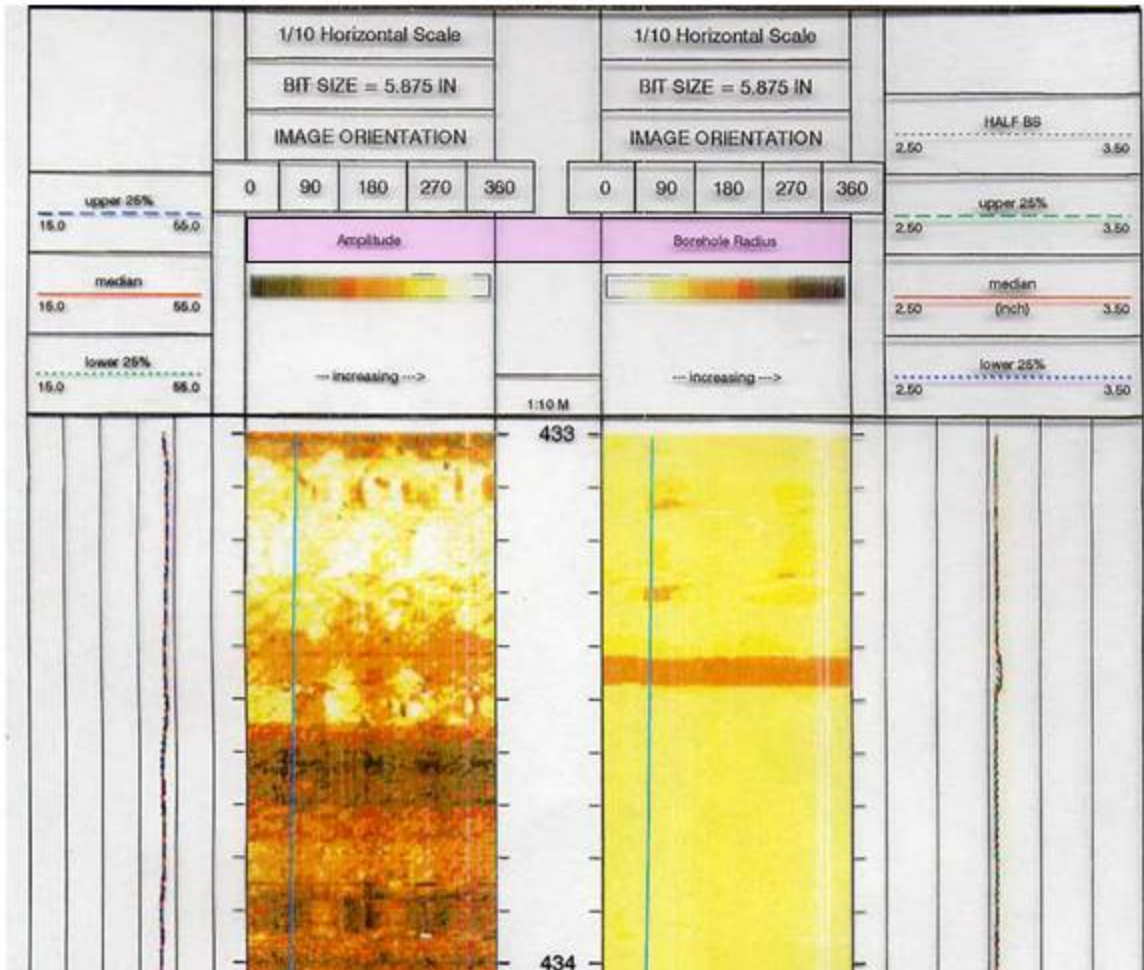


$$\text{pendage} = \tan\left(\frac{H}{D}\right)$$

2- La méthode acoustique

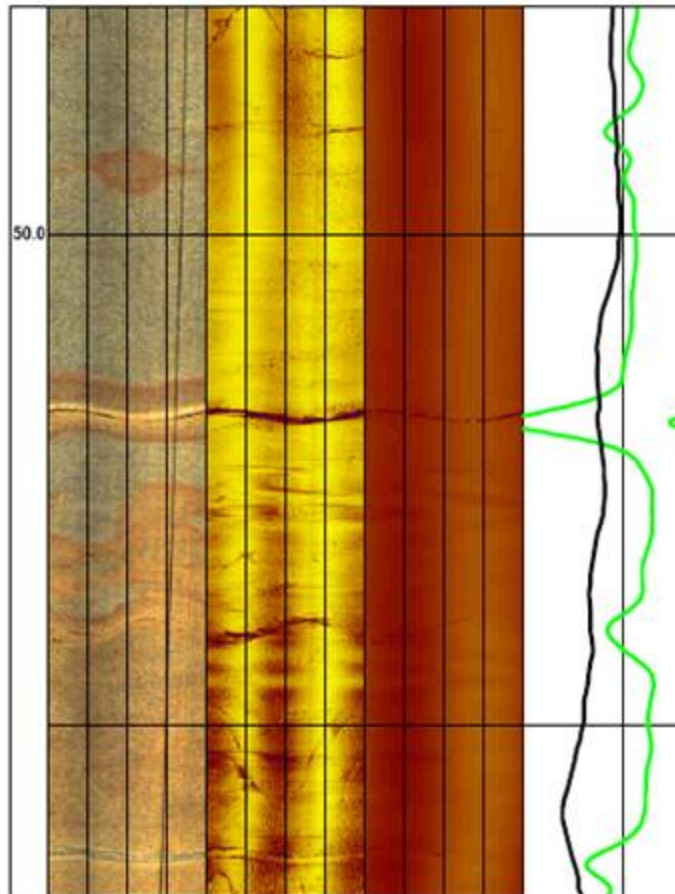
On obtient 2 images:

Ces deux images sont orientées par rapport au N (ici de 0 à 360°) et les informations sont codées en couleurs

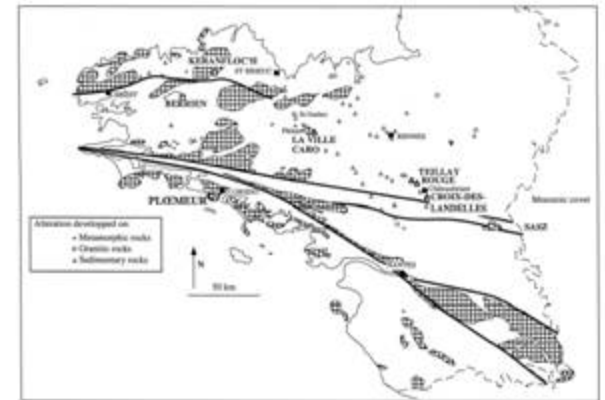


- 1) Amplitude
- 2) Travel time ou Borehole radius

1- La méthode acoustique: détection des fractures



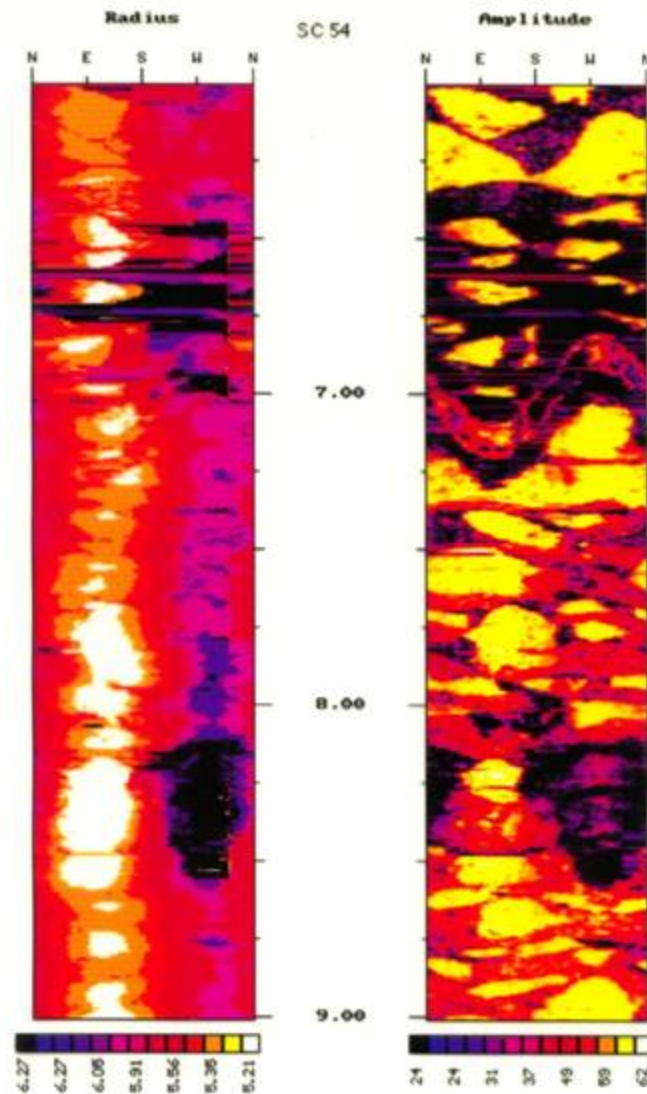
Page 7



Fractures fermées?



1- La méthode acoustique : exemple PAM



2- La méthode acoustique

« Breakout »

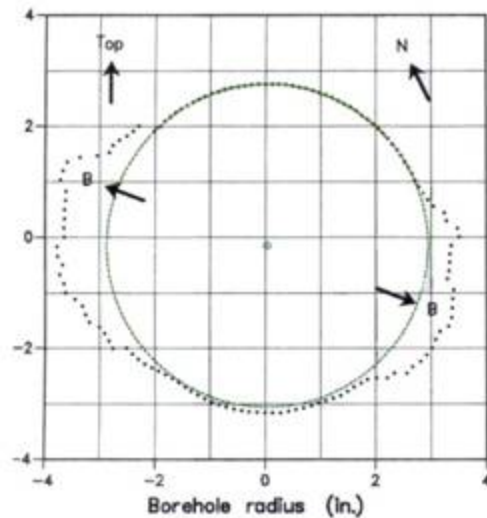
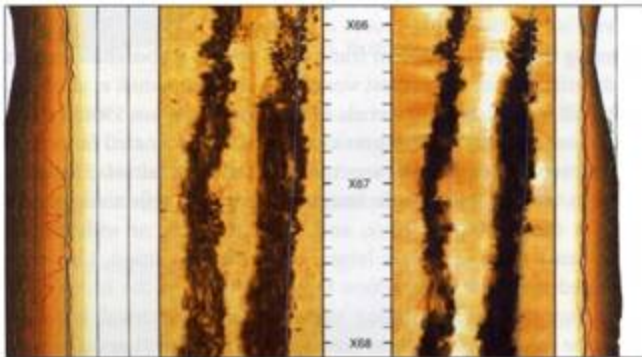
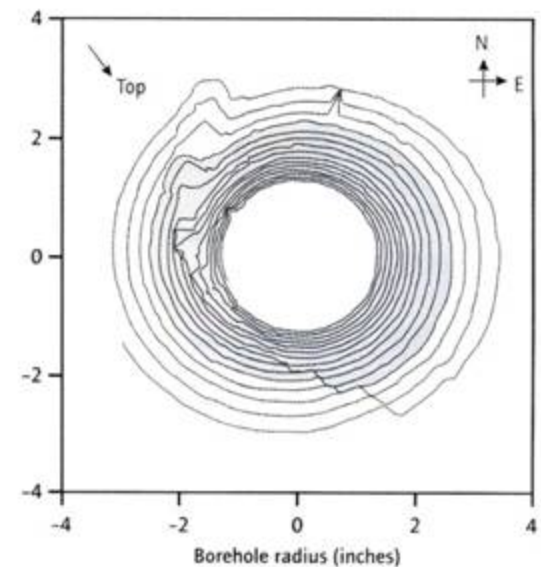
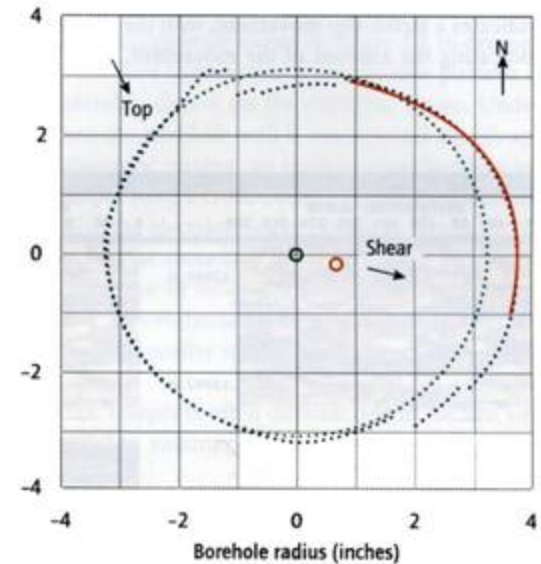


Figure 2.3.11. Breakouts seen on the reflected amplitude and transit time images (top) and in a borehole cross-section constructed from a transit time scan (bottom). Notice slight azimuthal rotation with overall E-W direction of the breakouts.

« zone de faille »

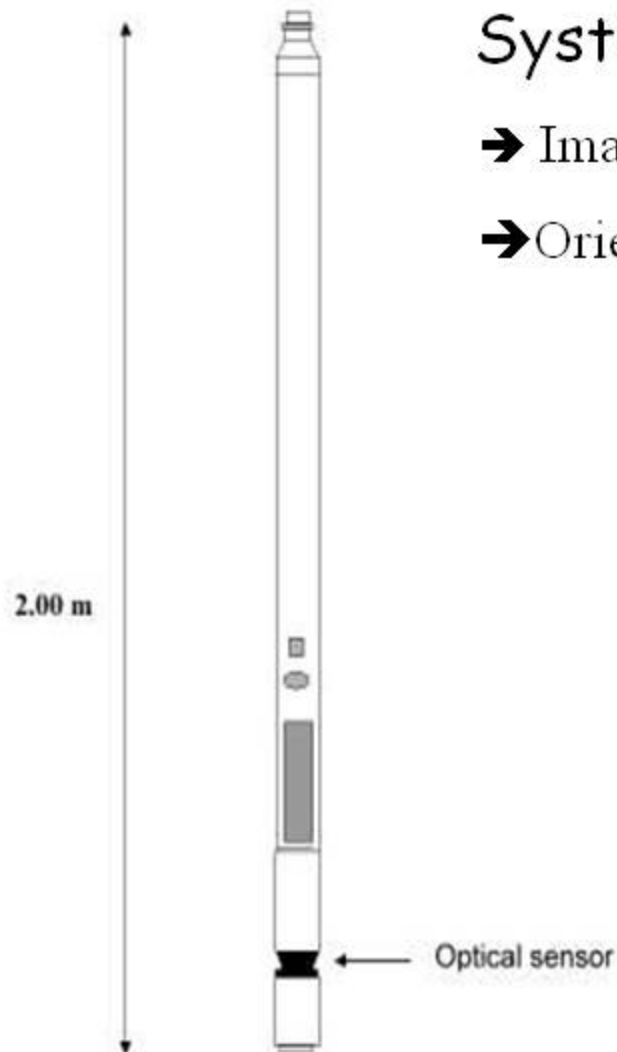


3- La méthode optique

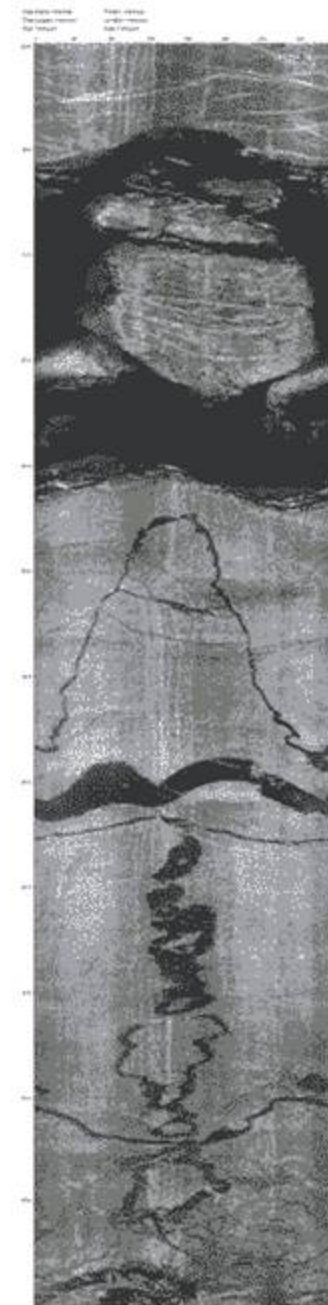
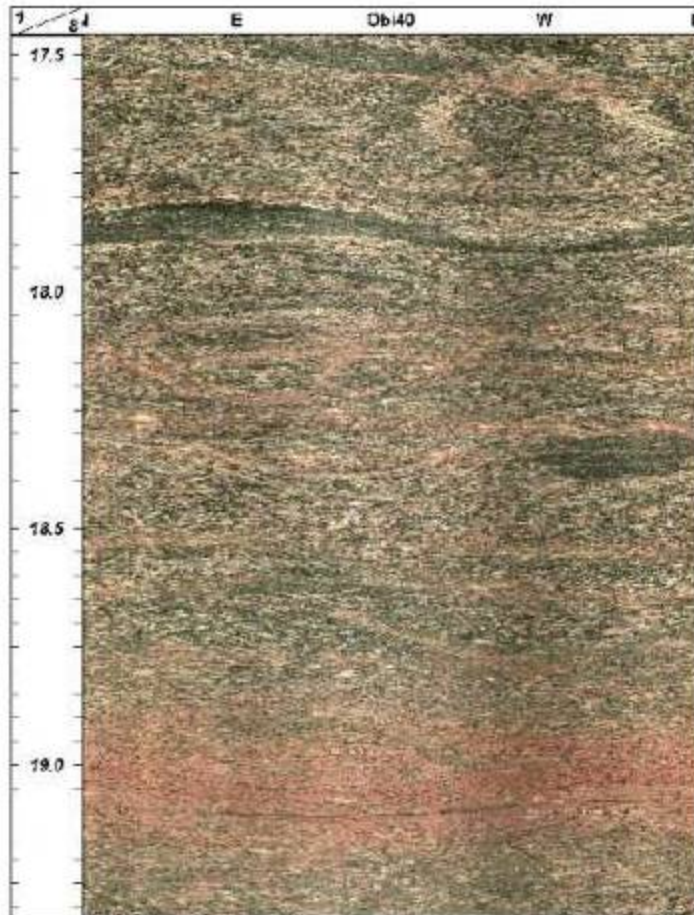
Systeme caméra CCD + miroir conique

→ Image continue 360°

→ Orientation (magnétomètres et accéléromètres)



3- La méthode optique

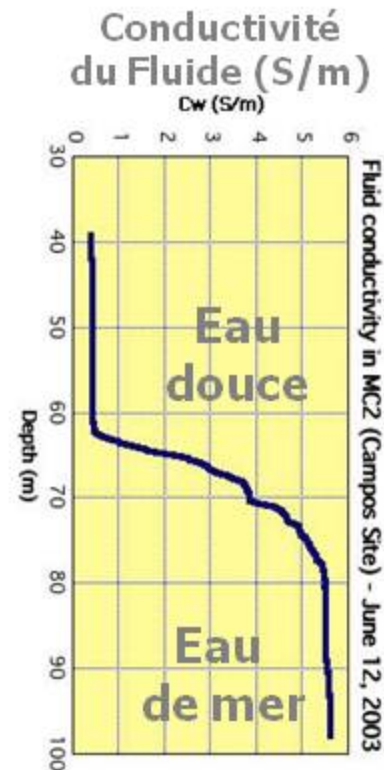


Caractérisation du fluide

Objectif: mesure les paramètres physiques reliés aux fluides dans le forage



- Conductivité
- Température
- Pression
- Electropotentiel
- Oxygène

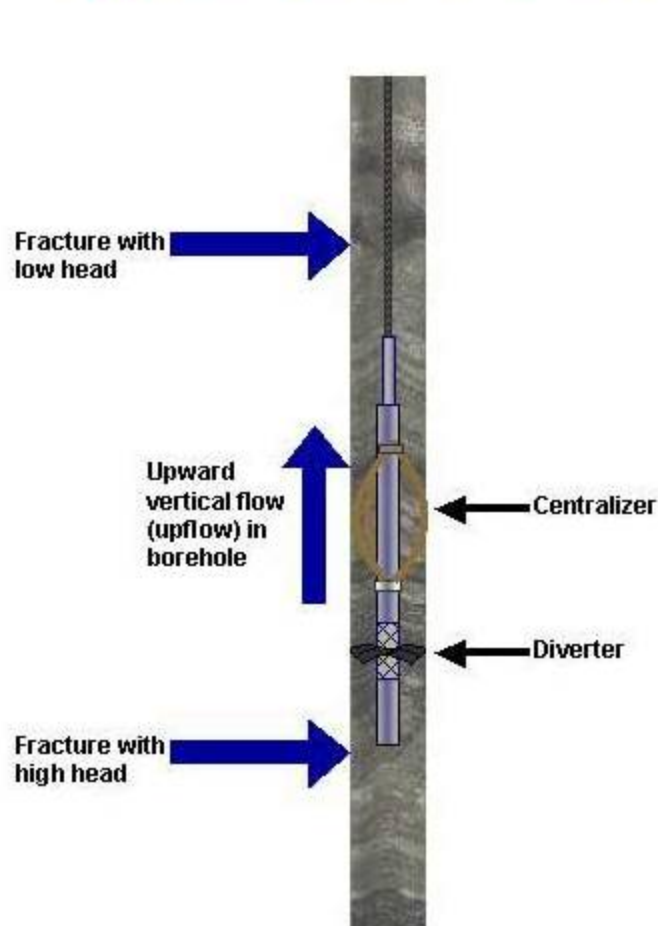


« Détection d'une intrusion salée »

Caractérisation du fluide

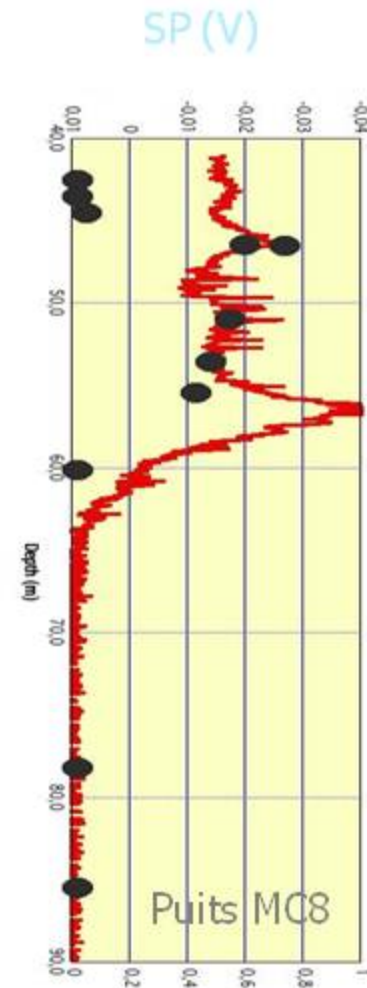
2- Flowmètre

Objectif: détection et mesure d'écoulements verticaux dans le forage



Débitmètre à hélice

Débitmètre à flux de chaleur



Puits MC8