




# Investigations *in-situ*

Cours Géologie Ba2  
Numéro 7

 Forte importance

 Moyenne importance

 Faible importance

# But et importance des investigation géologiques/physiques



- Définir un model géologique afin d'estimer la viabilité du site choisi.
- Identifier les risques géologiques (50% des coûts des travaux publics sont dûs à une mauvaise évaluation des risques).
- Estimer les propriétés nécessaires pour réaliser le projet géotechnique.
- Respecter l'environnement autour du projet.
- Estimer le coût du projet (10-20% des coûts liés aux investigations géotechniques préliminaires).





**Eviter les ruptures**



- Pas de règles générales : au cas par cas!
- Mais en fonction :
  - Des informations venant des études précédentes
  - Du « design » de l'ouvrage (e.g. profondeur des fondations)
  - Des forces exercées sur le terrain
  - Des informations géologiques locales et régionales (prise en compte des risques, sols gonflants, zone karstique)
  - Hauteur de la nappe phréatique
  - Accès au site et caractéristiques géographiques
  - Méthodes de construction



- **Pendant la définition du projet**
  - Risques géologiques
  - Connaissance des conditions géotechniques
  - Facteurs géologiques qui pourraient affecter la viabilité du projet
- **Premier « design »**
  - Sélection du site
  - Classification géo-mécanique du sous-sol
- **«Design» final**
  - Propriétés géo-mécaniques détaillées
  - Mesures des propriétés (e.g. contraintes) utiles au « design » de l'excavation ou des fondations
- **Construction**
  - Surveillance du site
  - « On site design » et solutions
- **Opérations**
  - Contrôle de la réponse sol-structure
  - Surveillance du site



- **Investigations de surface:** Enquête de site, arpentage, télédétection, cartographie géotechnique, cartographie des affleurements, planification de la conception.
- **Enquêtes souterraines :**
  - Forages, sondages, ondes élastiques, sismique, écho-sondage),
  - SPT, LLT, CBR, Cone (CPT), test de cisaillement de la girouette
  - Echantillons (eau, sol, roches, béton, etc.)
  - Appareil photo de forage, inclinomètre, capteurs AE, etc.,
- **Essais de laboratoire :** Sols, eaux, roches, bétons, métaux

# Site Investigation





- **Télétection & photo aérienne (Km-m)**
- Géophysique de surface (dm)
- Géophysique en puits (m-cm)
- Tests in situ (m-cm)
- Mesures au laboratoire (cm-mm)



- La télédétection désigne, dans son acception la plus large, la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou un phénomène, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec l'objet étudié. C'est l'utilisation à distance de n'importe quel type d'instrument (par exemple, d'un avion, d'un engin spatial, d'un satellite ou encore d'un bateau) permettant l'acquisition d'informations sur l'environnement.
- On fait souvent appel à des instruments tels que des appareils photographiques, des lasers, des radars, des sonars, des lidars, des sismographes ou des gravimètres. La télédétection moderne intègre normalement des traitements numériques mais peut tout aussi bien utiliser des méthodes non numériques.



- **Richesses des informations - Vision globale du paysage**
  - Possibilité d'explorer l'ensemble du spectre électromagnétique et non seulement la fraction visible à l'œil humain
  - Représentation de la totalité des phénomènes détectés à une certaine altitude sans interprétations ou simplifications préalables
- **Vision figée dans le temps (état)**
  - Possibilité de cerner une dimension temporelle– variations saisonnières, évolutions quotidiennes, flux, analyse périodique etc.
- **Les limites sont liées à :**
  - l'échelle, donc la résolution
  - le contraste (différence d'intensité lumineuse entre les objets)



Avant et après inondation

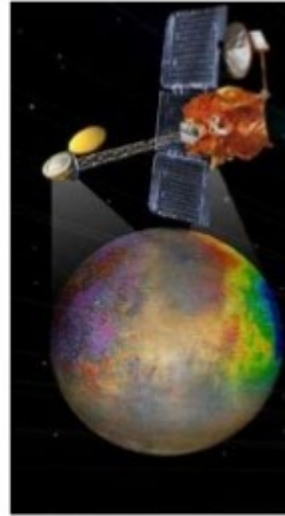


Point haut



Avion

(Source- CCRS pdf)



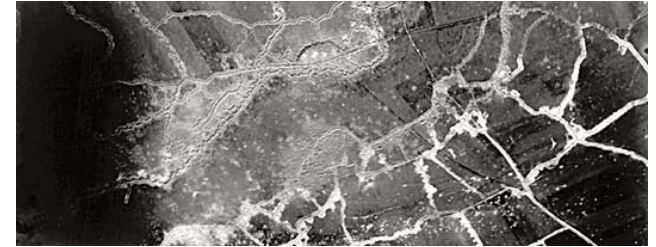
Satellite



Drone



- **1783** : Première ascension en ballon par les frères Montgolfier
- **1839** : Invention de la photographie (Daguerre)
- **1858** : Premières photos aériennes par Nadar
- **1914-1918** : Utilisation intense de photographies aériennes pour le renseignement militaire
- **1918-1945** : Développement généralisé de la photographie aérienne dans les milieux militaires et débuts de l'observation civile
- **Depuis 1945** : Généralisation de la photographie aérienne au niveau civile.
- Couverture complète systématique de la Suisse
- **1957** : Entrée de la télédétection dans l'ère moderne avec le lancement de Spoutnik
- **1972** : lancement de Landsat (USA)
- **1986** : lancement de Spot 1 (France +Belgique et Suède)
- **Aujourd'hui**, des dizaines de satellites d'observation de la Terre sont en orbite - des milliers d'images pour des applications militaires et civiles.

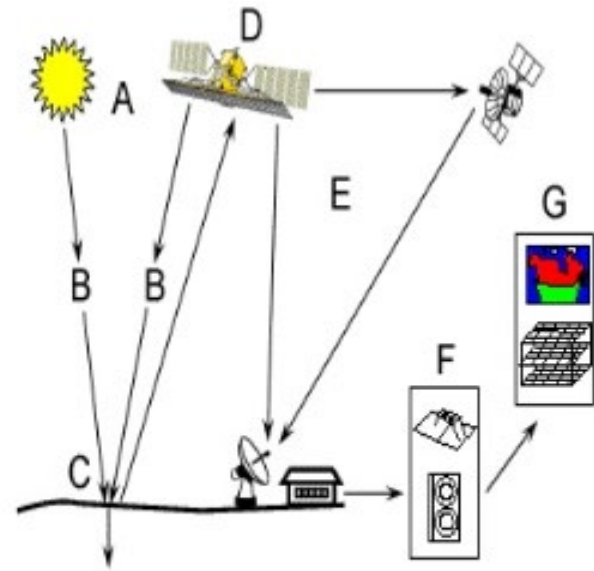




La photo aérienne est une science permettant d'obtenir des photos depuis le ciel à partir de plusieurs plateformes (*e.g.* avion, drone) pour étudier la surface de la terre. C'est une technique de **télédéttection** courante, versatile et économique.

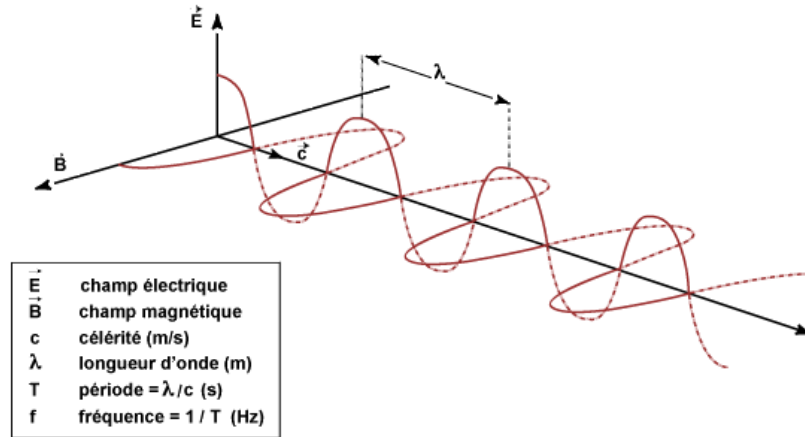


- (a) Source d'énergie (active ou passive)
- (b) Radiation
- (c) Interaction avec la cible
- (d) Enregistrement de l'énergie par le capteur
- (e) Transmission, réception, analyse
- (f) Interprétation
- (g) Application

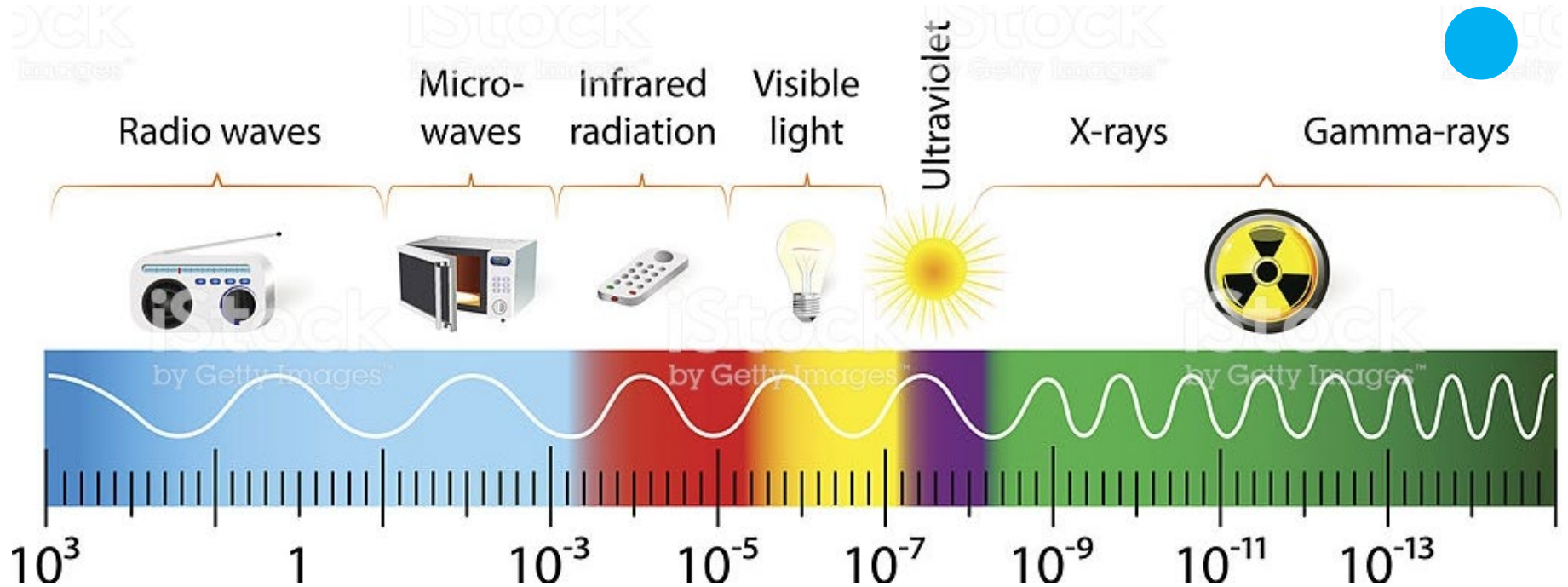


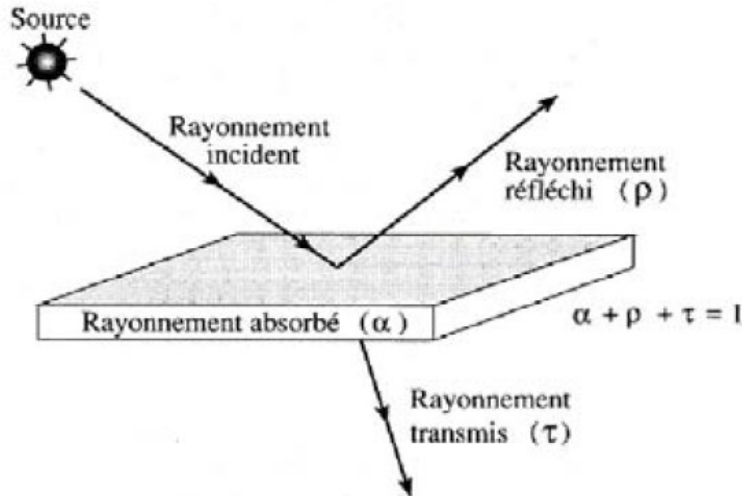
Source: Canadian Centre for Remote Sensing

Le rayonnement électromagnétique est une forme de propagation de l'énergie dans la nature, dont la forme qui nous est la plus familière est la lumière visible telle que la perçoit l'oeil humain

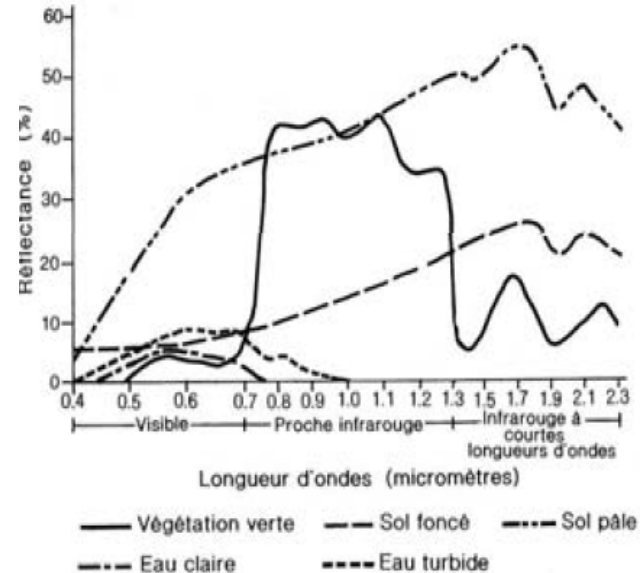
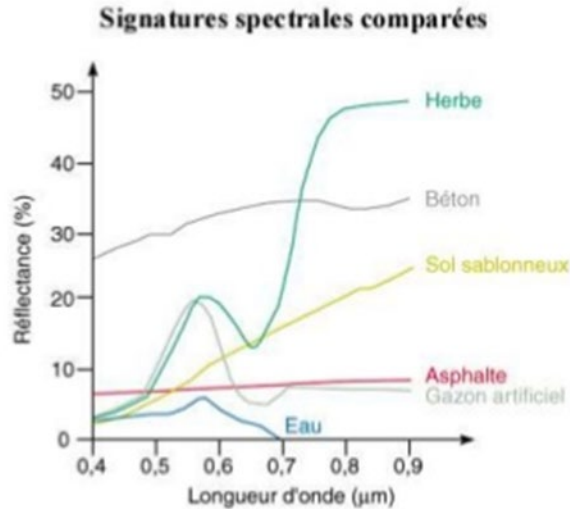


- La période qui est le temps  $T$  pendant lequel l'onde effectue une oscillation complète.
- La fréquence désignée par la lettre  $f$  est le nombre de cycles par unité de temps ( $f$  est l'inverse de la période ( $1/T$ ))
- La longueur d'onde  $\lambda$  - la distance entre deux points homologues sur l'onde.
- La vitesse  $v$  de propagation de l'onde dans l'espace : dans le vide, et à peu de chose près, dans l'air, cette vitesse est :  $c = 300'000$  km/s



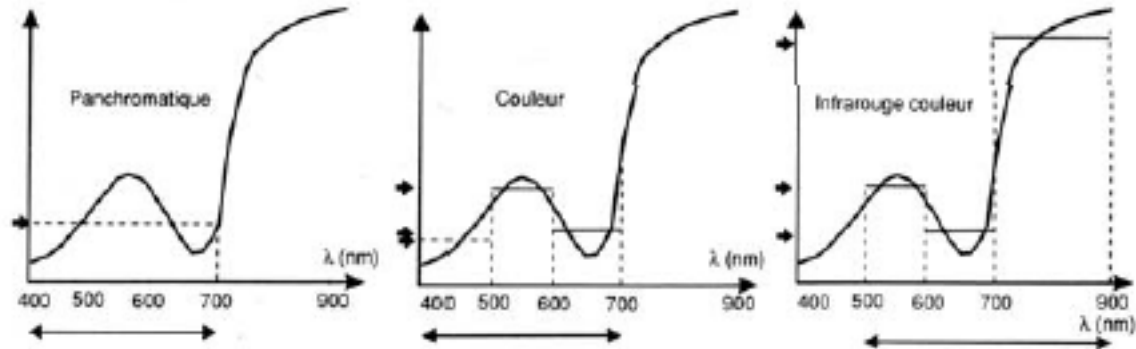


La luminance mesurée par le capteur représente la part du rayonnement solaire incident qui est réfléchi par la surface du sol, dans la direction du capteur (selon l'angle de visée du radiomètre), c'est à dire une réflectance.



47

La luminance mesurée par le capteur représente la part du rayonnement solaire incident qui est réfléchi par la surface du sol, dans la direction du capteur (selon l'angle de visée du radiomètre), c'est à dire une réflectance.



Panchromatique



Bleu Vert Rouge



Couleurs naturelles

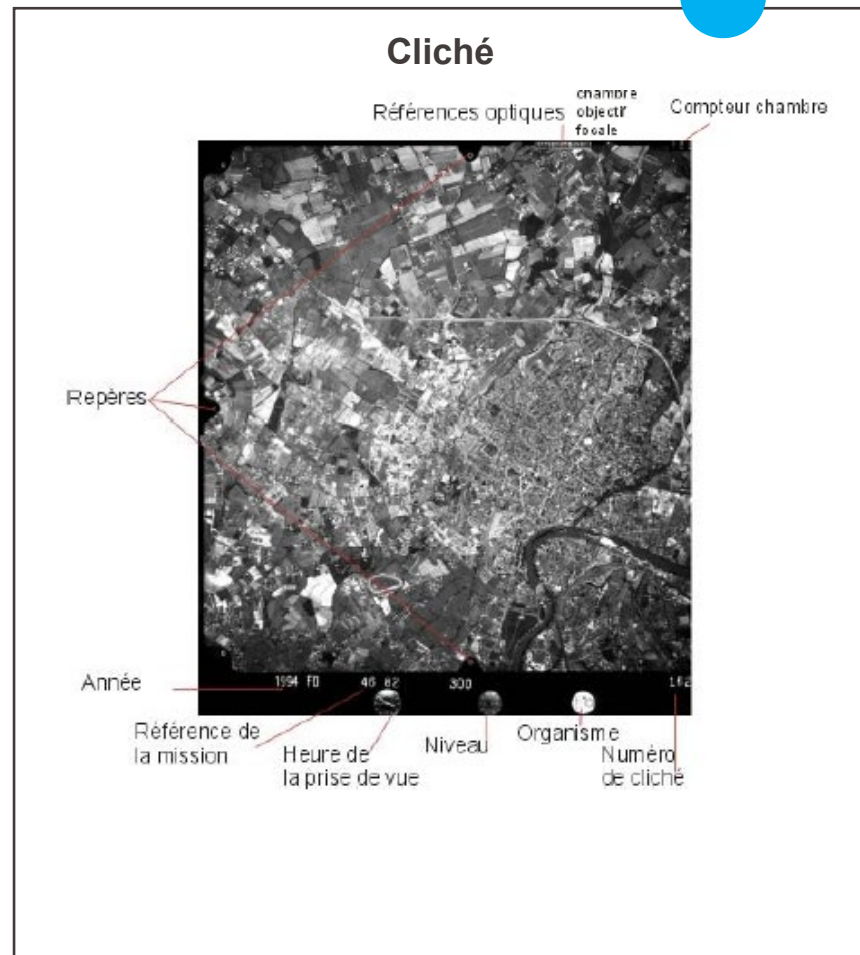
Vert Rouge Proche Infrarouge



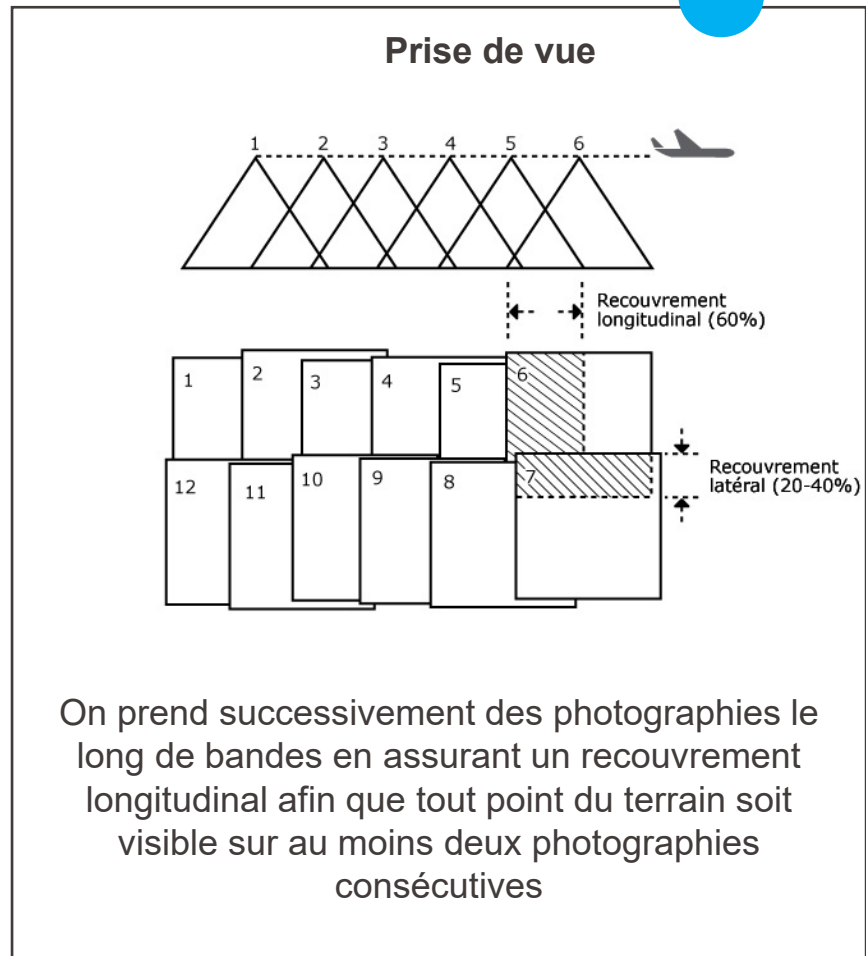
Fausses couleurs



- Cliché
- Prise de vue
- Types de photos selon l'angle de vue
- Echelle
- Déclivités
- Déformation



- Cliché
- **Prise de vue**
- Types de photos selon l'angle de vue
- Echelle
- Déclivités
- Déformation



- Cliché
- Prise de vue
- **Types de photos selon l'angle de vue**
- Echelle
- Déclivités
- Déformation

## Angle de vue

verticale



oblique



Panoramique  
(horizon apparent)



- Cliché
- Prise de vue
- Types de photos selon l'angle de vue
- Echelle
- Déclivités
- Déformation

25

## Echelle

The diagram illustrates the geometry of a camera. A lens (objectif) is positioned at a distance (distance focale) from a film plane (film (plan focal)). The camera is shown above a ground surface (sol) and a sea level (mer). Two altitudes are indicated: 'altitude au-dessus du sol (AGL)' measured from the ground, and 'altitude au-dessus du niveau de la mer (ASL)' measured from the sea level.

Distance focale : la distance qui sépare le milieu de la lentille de l'appareil de prise de vues et le plan focal (c.-à-d., la pellicule). À mesure que la distance focale augmente, la déformation de l'image diminue. On peut mesurer de façon précise la distance focale lorsque l'appareil de prise de vues est étalonné.

Échelle : le rapport entre la distance entre deux points sur une photo et la distance réelle entre ces mêmes deux points au sol (c.-à-d. 1 unité sur la photo équivaut à « x » unités au sol). Si un tronçon de 1 km d'une autoroute couvre 4 cm sur une photo aérienne, on calcule l'échelle comme suit :

$$\frac{\text{Distance sur la photo}}{\text{Distance au sol}} = \frac{4 \text{ cm}}{1 \text{ km}} = \frac{4 \text{ cm}}{100\,000 \text{ cm}} = \frac{1}{25\,000} \text{ ÉCHELLE: } 1/25\,000$$

- Cliché
- Prise de vue
- Types de photos selon l'angle de vue
- Echelle
- Déclivités
- Déformation

26

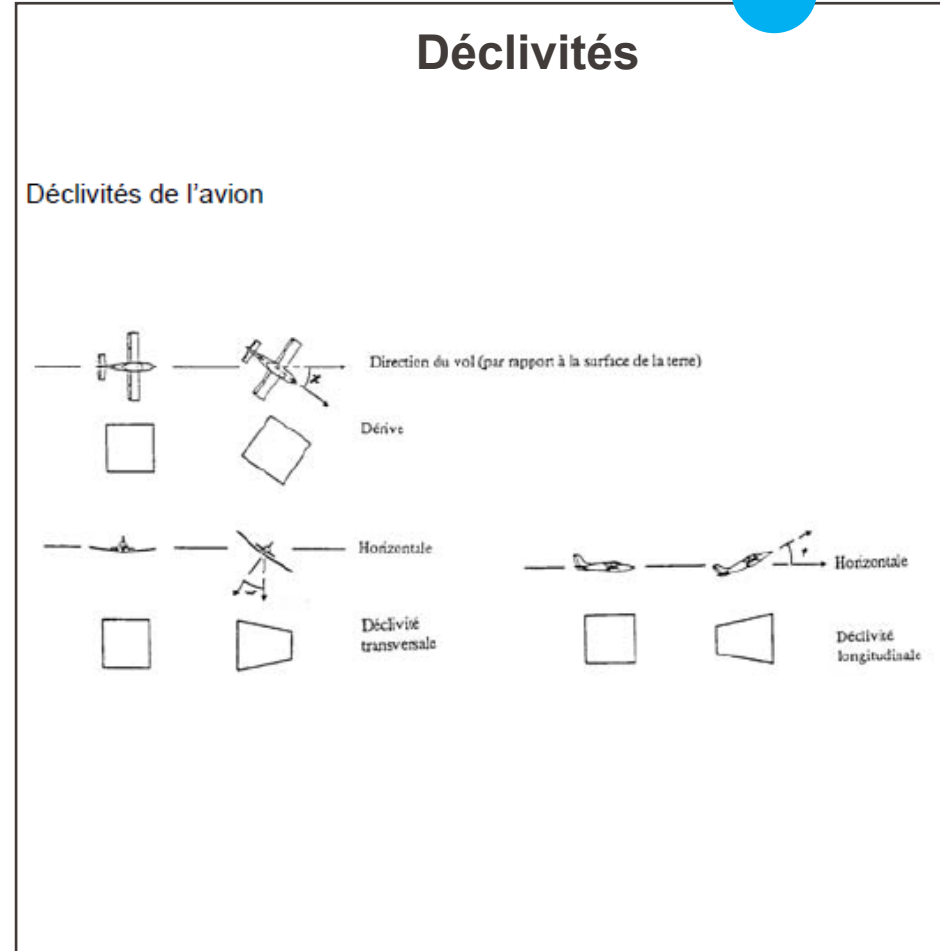
## Echelle

Une autre méthode utilisée pour calculer l'échelle d'une photo est de trouver le rapport entre la distance focale de l'appareil de prise de vues et la hauteur de l'aéronef au-dessus du sol au moment où on prend la photo.

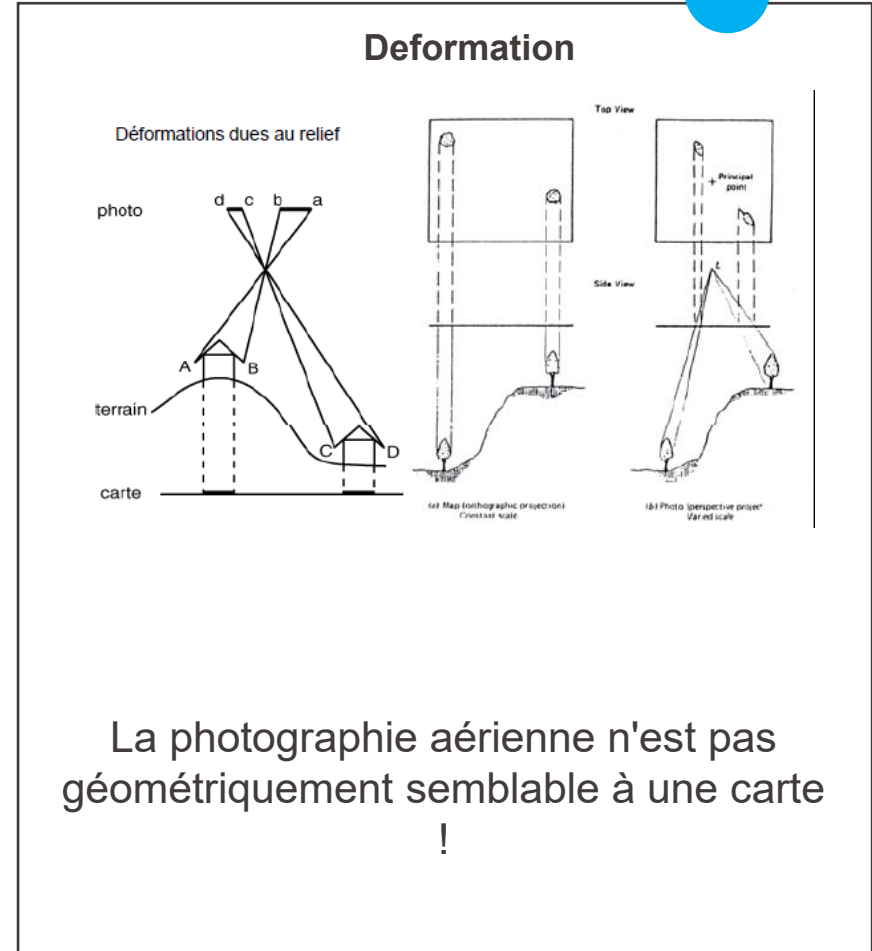
i la distance focale de l'appareil de prise de vues est de 152 mm, et la hauteur de l'aéronef au-dessus du sol (AGL) est de 7 600 m, on obtiendrait, à l'aide de la même formule, une échelle de :

$$\frac{\text{Distance focale}}{\text{Hauteur (AGL)}} = \frac{152 \text{ mm}}{7\,600 \text{ m}} = \frac{152 \text{ mm}}{7\,600\,000 \text{ mm}} = \frac{1}{50\,000} \quad \text{ÉCHELLE: } 1/50\,000$$

- Cliché
- Prise de vue
- Types de photos selon l'angle de vue
- Echelle
- **Déclivités**
- Déformation



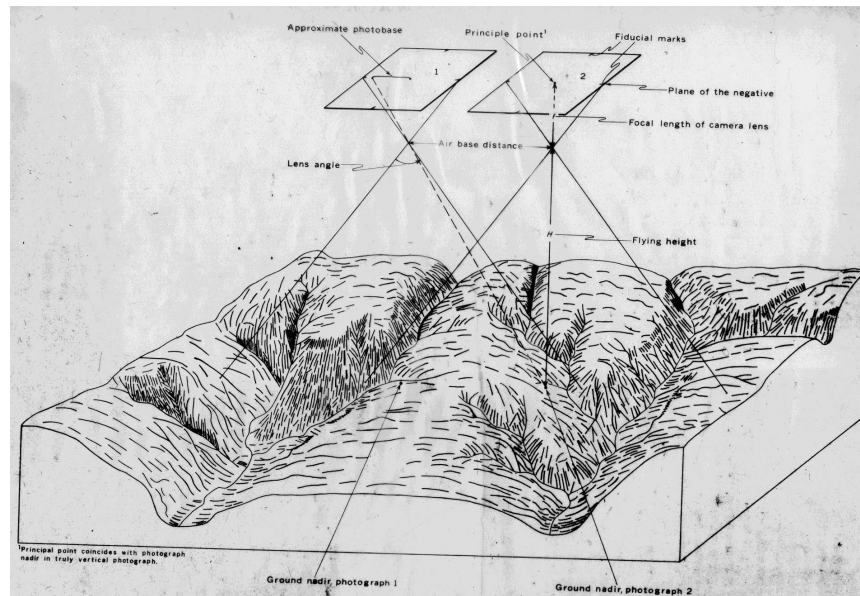
- Cliché
- Prise de vue
- Types de photos selon l'angle de vue
- Echelle
- Déclivités
- **Déformation**



Procédé qui permet d'obtenir la sensation du relief à partir de deux images stéréoscopiques d'un objet, prises de deux points de vue différents. La sensation du relief est donnée par la vision binoculaire. La vision binoculaire est basée sur la vue synchrone de deux images différentes d'un même objet.

Chez l'homme, ces deux images sont captées par les deux yeux et fusionnées par le cerveau. Cette vision stéréoscopique naturelle permet la perception des trois dimensions.

Dans le cas de la photo-interprétation, la vision binoculaire nécessite deux photographies d'une même portion de terrain prises sous deux angles différents.

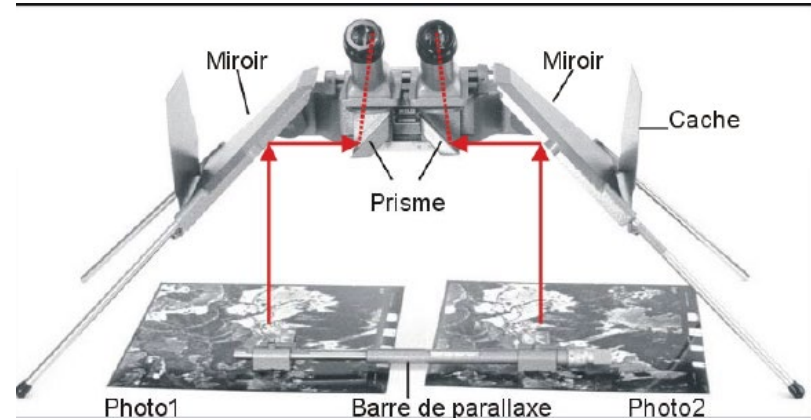






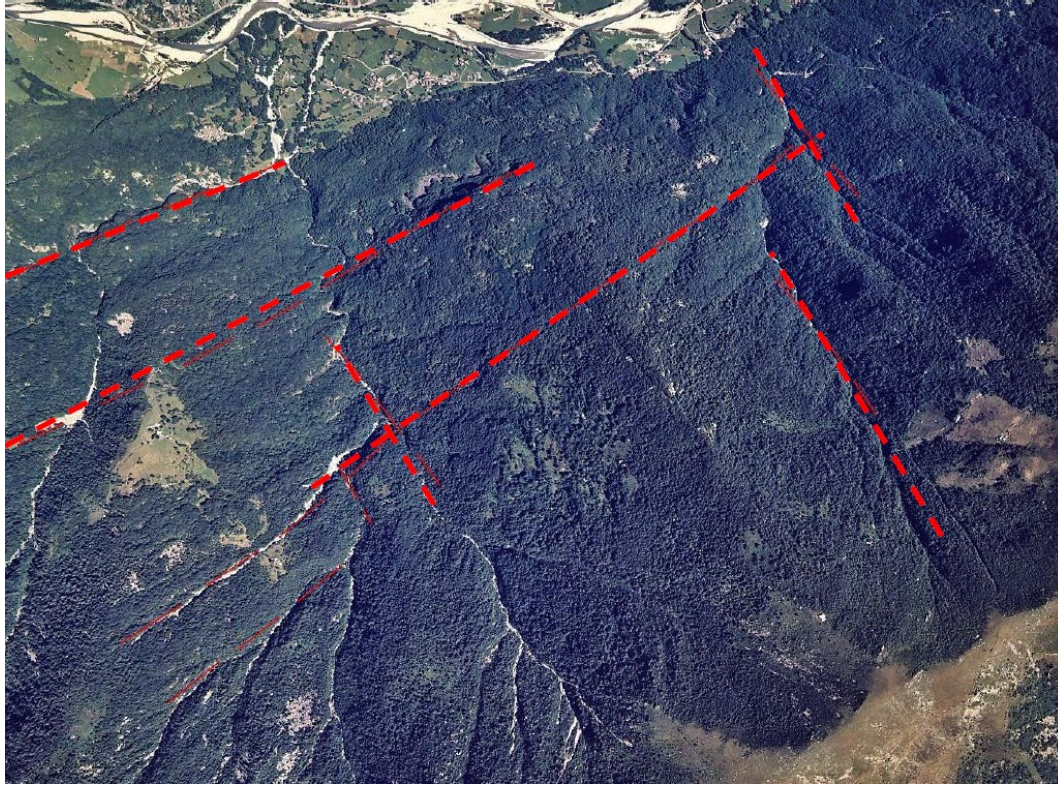
Grâce au chevauchement, les photos montrant la même région mais prises d'une perspective différente, sont jumelées et visionnées à l'aide d'un dispositif appelé le stéréoscope (appareil binoculaire à léger grossissement). Ce dispositif permet à l'observateur d'avoir une vision du relief.

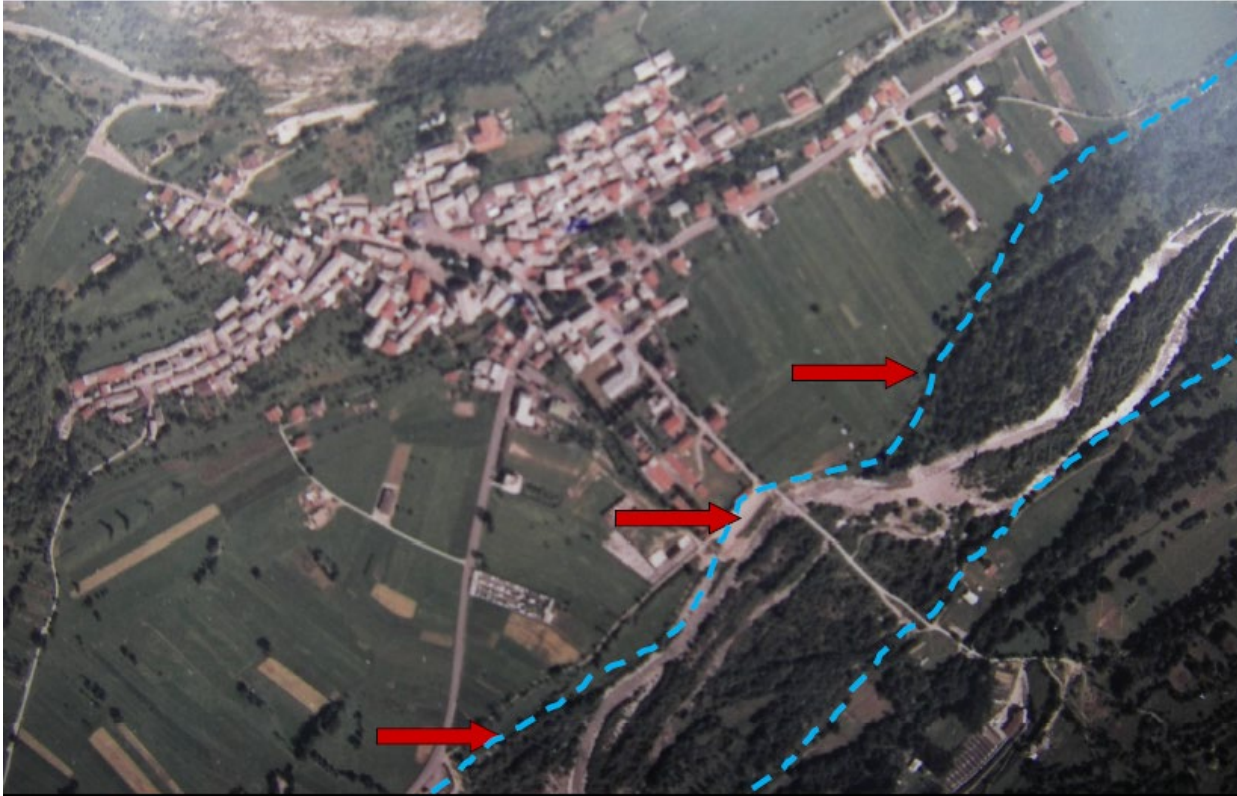
On parle alors de stéréophotographie.

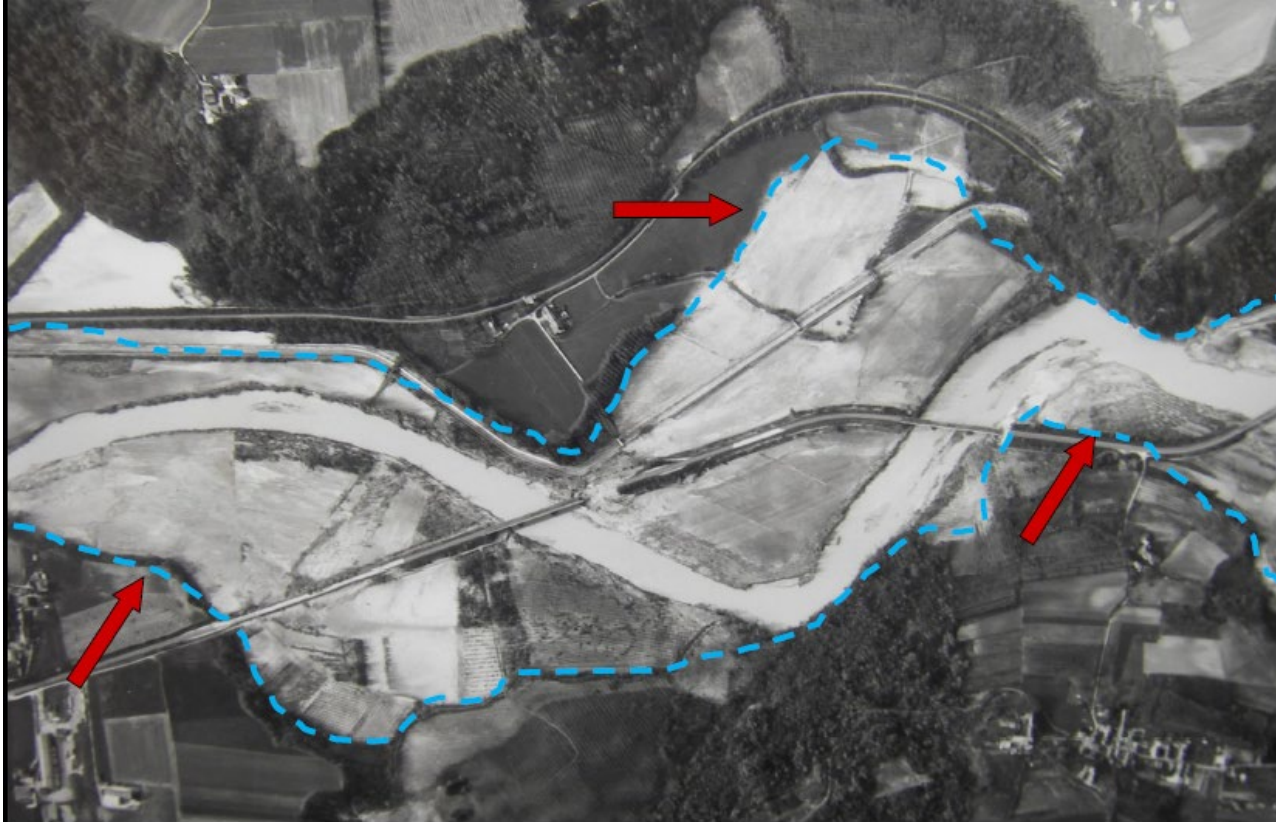












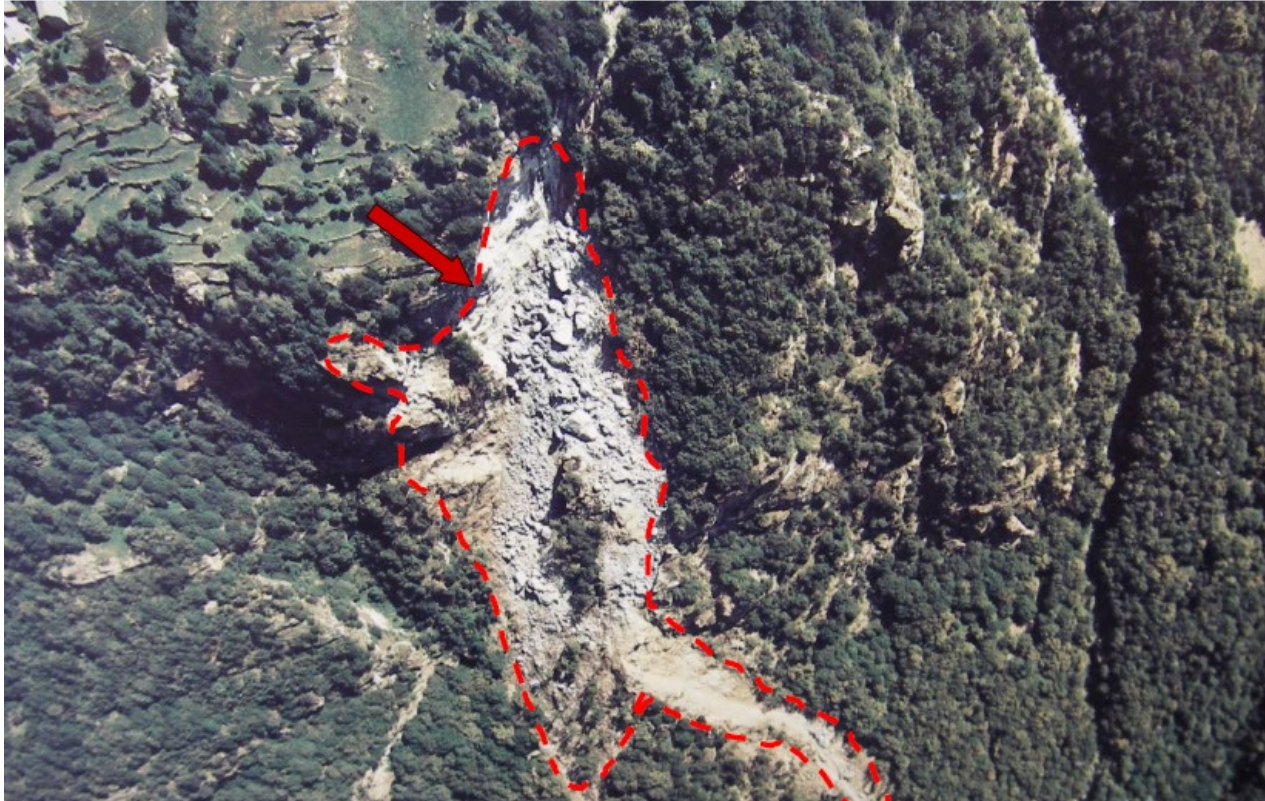
# Identification des zones inondables (ancien méandres)



# Identification de la géométrie d'un cône alluviale



# Identification de la géométrie d'un glissement de terrain

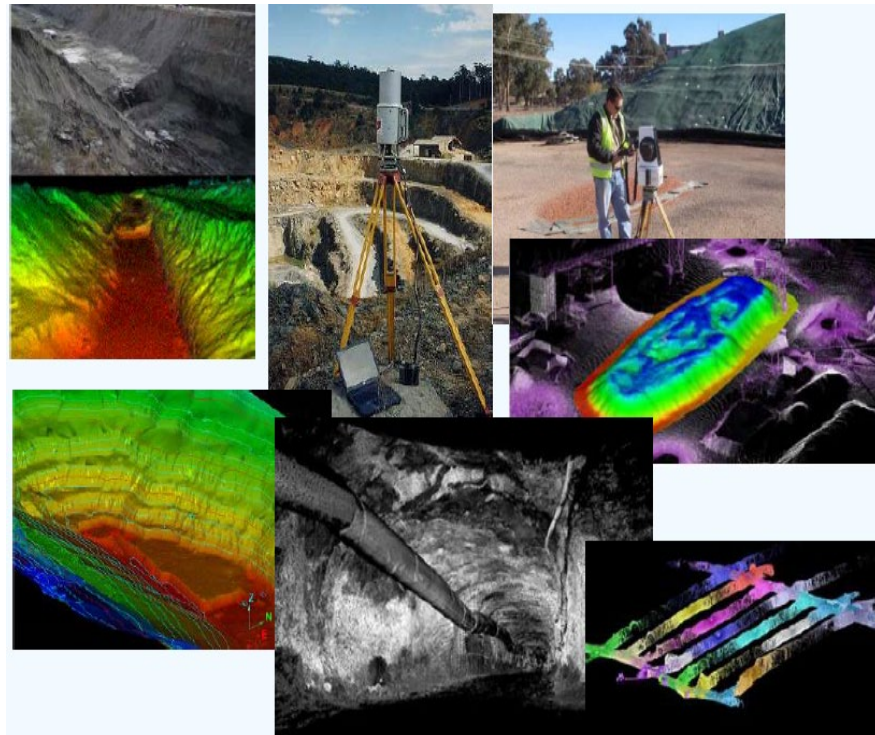


# Identification de la géométrie d'un glissement de terrain et zone à risque



Le terme LIDAR correspond à un acronyme qui nous vient de l'anglais Light (ou Laser Imaging) Detection And Ranging. Ainsi le terme fait-il référence à une technique de mesure de la distance qui repose sur l'analyse des propriétés d'un faisceau lumineux -- un laser en général -- renvoyé vers son émetteur.

Ainsi le LIDAR fonctionne un peu comme le Radar. Mais là où le Radar exploite les micro-ondes, le LIDAR joue avec des ondes du domaine de l'infrarouge, du visible ou de l'ultraviolet. Et la distance du LIDAR à un objet est mesurée en fonction du délai entre l'émission d'une impulsion laser et la réception de l'impulsion réfléchie





- Télédétection & photo aérienne
- Géophysique de surface
- Géophysique en puits
- Test in situ
- Mesure au laboratoire



La géophysique est l'application des principes de la physique à l'étude de la Terre. La Terre est composée de matériaux ayant des propriétés physiques différentes.

La géophysique des méthodes physiques (telles que sismique, gravitationnelle, magnétique, électrique et électromagnétique) à la surface de la Terre pour mesurer les propriétés physiques du sous-sol, ainsi que les anomalies de ces propriétés.



Les méthodes géophysiques sont non invasives et non destructives (levés géophysiques au sol)

On les utilise pour :

- Enquêtes de suivi, mesure dans le temps
- Solution d'un problème direct / inverse
- Paramètres géométriques : Éléments structurels, épaisseur des couches, profondeur, pendage, azimuth, volume...
- Distribution spatiale des paramètres pétrophysiques / géophysiques : Composition minérale, propriétés pétrophysiques (porosité, saturation en eau, conductivité hydraulique, etc.), degré de fissuration et de vieillissement, eau, étanchéité, contamination, paramètres radiologiques.



**Methodes passives** : utilise des sources naturelles pour étudier les propriétés du sous-sol.

*Exemples :*

- La gravité
- Champ magnétique terrestre
- Tremblements de terre

**Méthodes actives**: Utilise une source artificielle pour imager la structure du sous-sol.

*Exemples :*

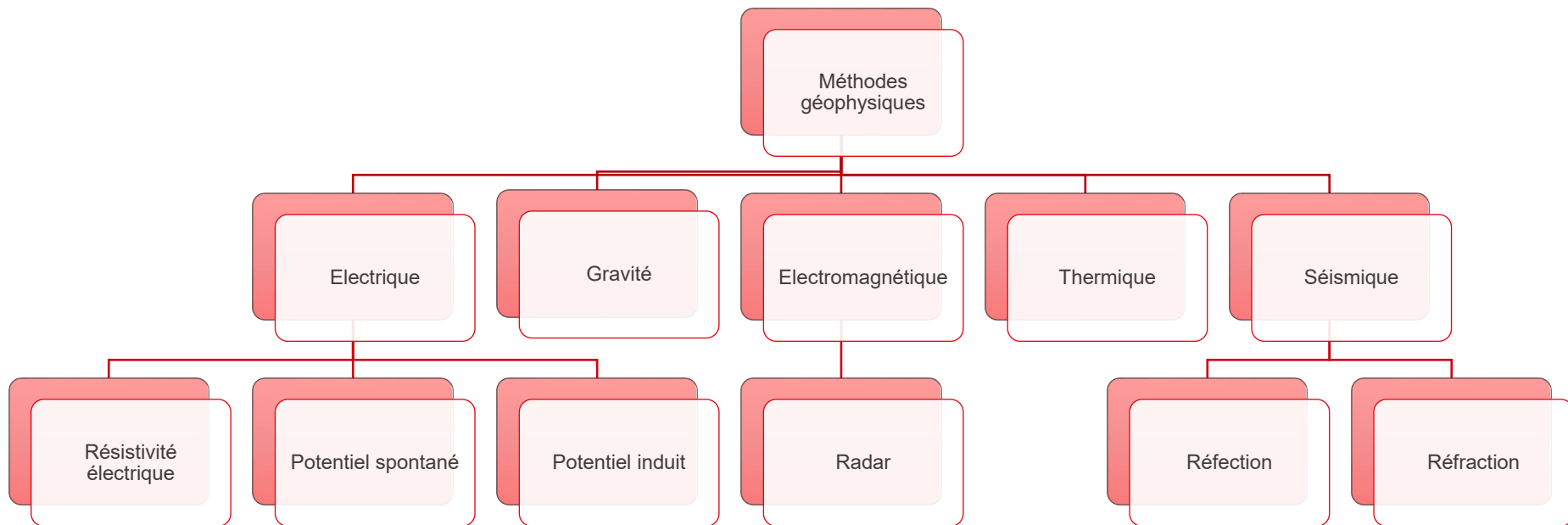
- Dynamite, pistolets à air comprimé,...
- Ondes électromagnétiques
- Courants électriques.



Pour **sélectionner la méthode géophysique** la plus appropriée pour étudier un problème donné, **vous devez prendre en compte les aspects suivants**:

- Quelles sont les propriétés physiques pertinentes ? (porosité, perméabilité, vitesse sismique, densité,...)
- Quelles échelles spatiales sont pertinentes ?
- Quelles sont les conditions de terrain ? (par exemple urbain, offshore,...)
- Quelles géométries d'acquisition sont optimales ? (par exemple, sismique 2D vs 3D)
- Existe-t-il des informations utiles à priori ?
- Y a-t-il une alternative moins chère ?

La réponse à ces questions dépendra fortement du problème particulier.





Method	Measured parameter	“Operative” physical property	Application
Gravity	Spatial variations in the strength of the gravitational field of the Earth	Density	Fossil fuels Bulk mineral deposits Construction
Magnetic	Spatial variations in the strength of the geomagnetic field	Magnetic susceptibility and remanence	Fossil fuels Metalliferous mineral deposits Construction
Seismic	Travel times of reflected/refracted seismic waves	Seismic velocity (and density)	Fossil fuels Bulk mineral deposits Construction
Electromagnetic (SeaBed Logging)	Response to electromagnetic radiation	Electric conductivity/resistivity and inductance	Fossil fuels Metalliferous mineral deposits
Electrical -Resistivity -Self potential	Earth resistance Electrical potentials	Electrical conductivity Electrical conductivity	Widely used
Radar	Travel times of reflected radar pulses	Dielectric constant	Environmental Construction



Survey technique	Area of application					
	Geological structures/ barriers	Hydraulically active structures	Landfills/ Waste dumps	Contamination plumes	Landslides/ Ground sinking	Pre-excavation archaeology
Gravity	+	○	○	–	○	○
Magnetic <sup>a</sup>	+	–	+	–	–	+
Self-potential	○	+	○	○	+	–
Resistivity +IP <sup>b</sup>	+	+	+	+	+	+
Electromagnetic <sup>a</sup>	○	+	+	+	–	○
Ground radar	○	○	+	○	○	+
Radioactivity <sup>a</sup>	○	○	○	○	○	–
Seismic refraction	+	○	○	–	○	○
Seismic reflection	+	○	–	–	–	–
Geothermy <sup>a</sup>	○	+	○	–	○	–

*Notes:*

+ applicable; ○ limited applicability; – not applicable.

<sup>a</sup>Technique applicable to both ground and airborne surveying.

<sup>b</sup>Induced polarization.

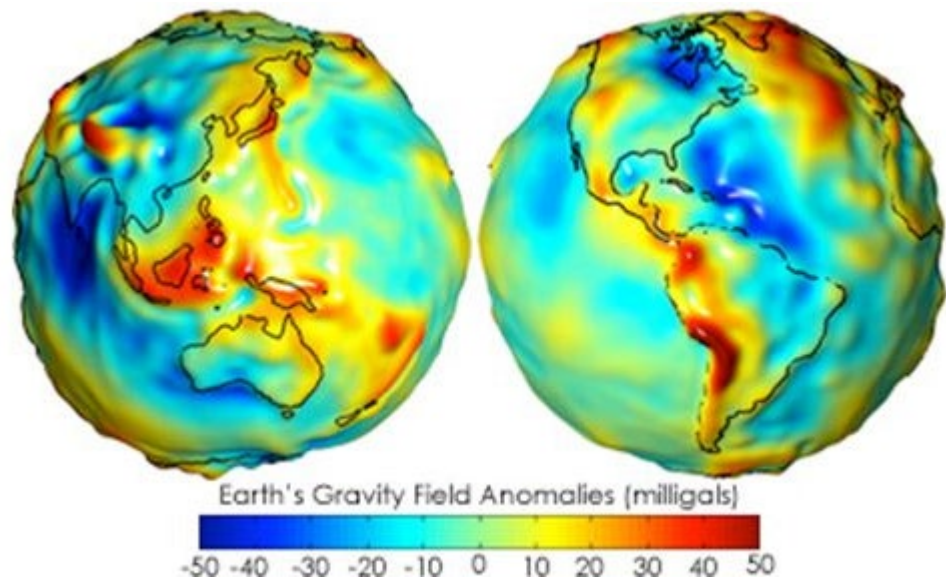


Technique	Area of application					
	Depth to and constitution of bedrock	Rippability/ Rock strength	Fracture/Flow seepage detection	Location of cavities/voids	Permafrost/Thaw zones delineation	Pipes/Metal detection
Gravity	+	-	-	+	-	-
Magnetic	+	-	-	+	-	+
Self-potential	-	-	+	-	-	○
Resistivity + IP <sup>a</sup>	+	-	+	+	+	○
Electromagnetic	○	-	+	○	+	+
Ground radar	+	○	+	+	+	○
Radioactivity	-	-	○	-	-	-
Seismic refraction	+	+	○	○	+	-
Seismic reflection	+	+	○	○	○	-

## Notes:

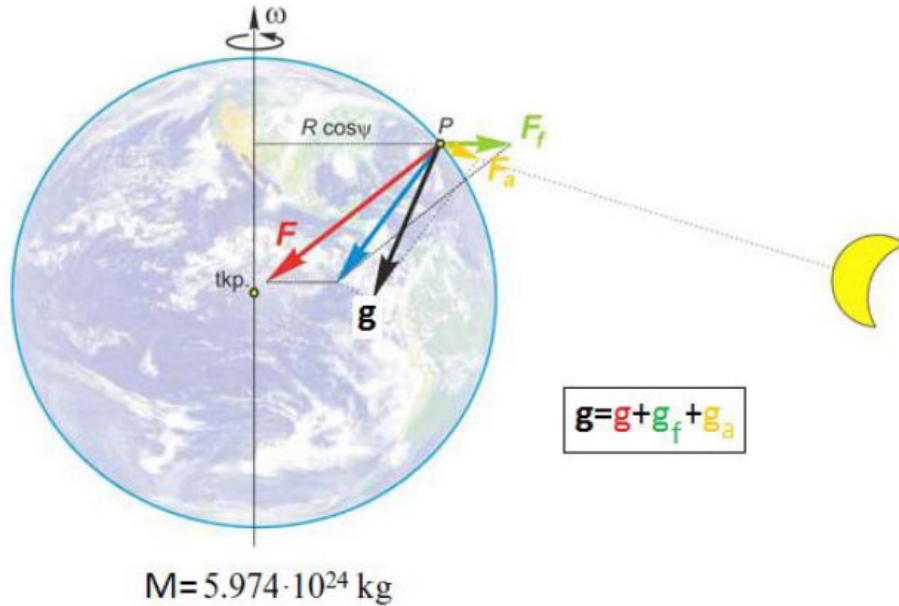
+ applicable; ○ limited applicability; - not applicable.

<sup>a</sup> Induced polarization.



Détection des cavités et des vides, détermination de la densité, exploration géologique, calcul de la masse excédentaire

Variation du champs gravitationnel (variation en densité)



Sources du champ terrestre :

- Attraction gravitationnelle
- Force centrifuge
- Force de marée

-  $F = M \cdot a$

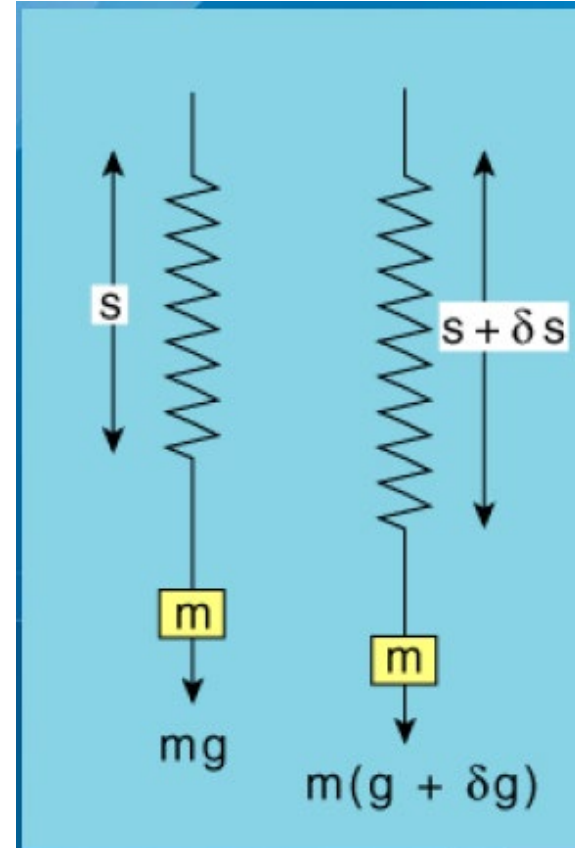
## Hooke's law

$$\Delta F = F_2 - F_1 = k \Delta s$$

( $k$  is elastic constant)

## Principle of gravity measurement

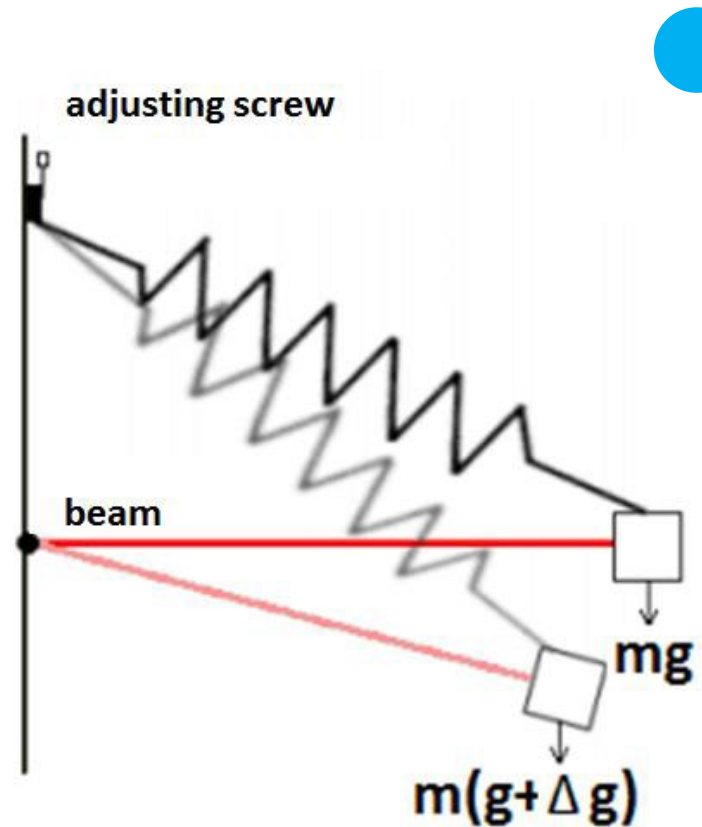
$$m \Delta g = k \Delta s \rightarrow \Delta g = k \Delta s / m$$



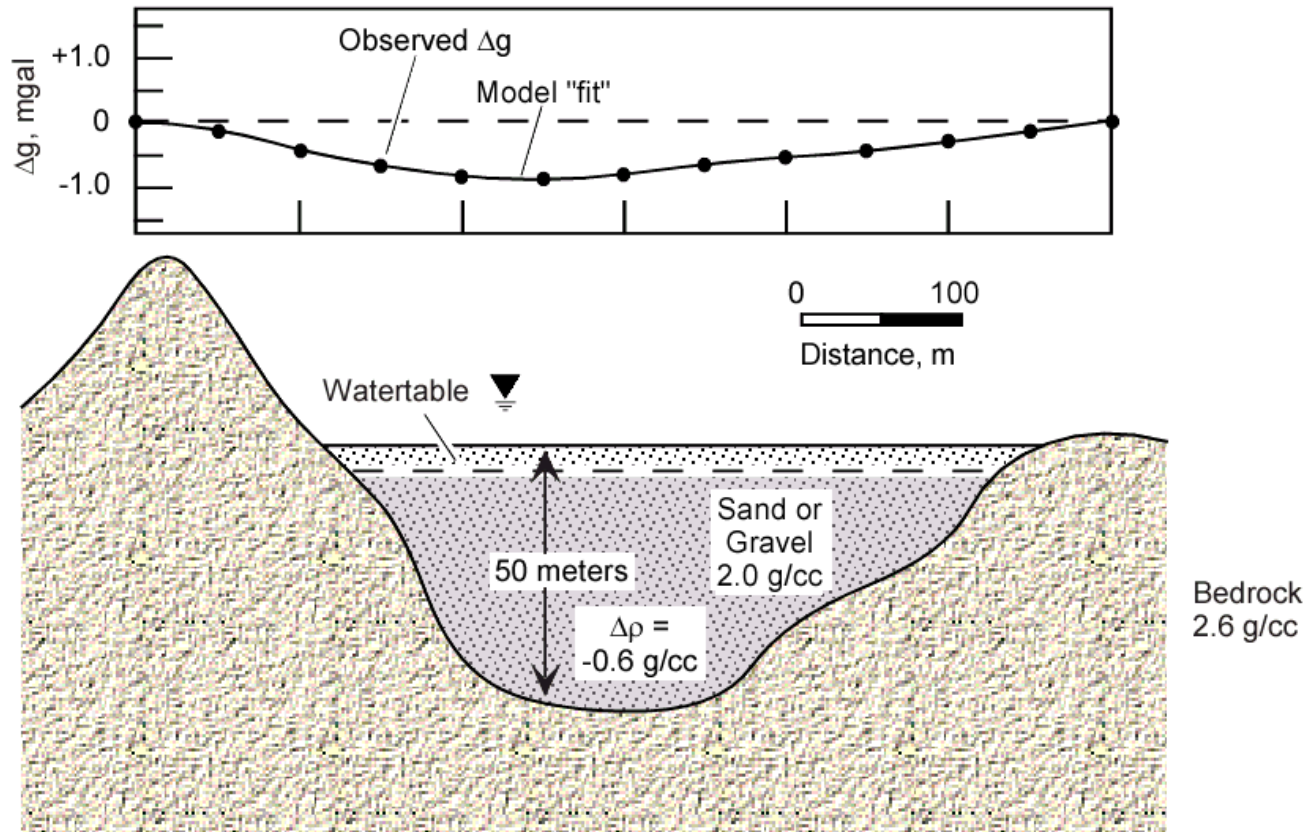
## Méthode :

Un poids est lié à une tige rigide et à un ressort. Quand la gravité augmente, le poids s'abaisse, en allongeant le ressort et la tige tourne.

La rotation de la tige est proportionnelle à la gravité.



gravitational acceleration =  
scale reading \* calibration coefficient





Material type	Density Range	Approximate average density (Mg/m <sup>3</sup> )
<b>Sedimentary rocks</b>		
Alluvium	1.96-2.00	1.98
Clay	1.63-2.60	2.21
Gravel	1.70-2.40	2.00
Silt	1.80-2.20	1.93
Soil	1.20-2.40	1.92
Sand	1.70-2.30	2.00
Sandstone	1.61-2.76	2.35
Shale	1.77-3.20	2.40
Limestone	1.93-2.90	2.55
Dolomite	2.28-2.90	2.70
Chalk	1.53-2.60	2.01
Halite	2.10-2.60	2.22

Material type	Density Range	Approximate average density (Mg/m <sup>3</sup> )
<b>Metamorphic rocks</b>		
Schist	2.39-2.90	2.64
Gneiss	2.59-3.00	2.80
Phyllite	2.68-2.80	2.74
Slate	2.70-2.90	2.79
Granulite	2.52-2.73	2.65
Amphibolite	2.90-3.04	2.96
<b>Igneous rocks</b>		
Rhyolite	2.35-2.70	2.52
Granite	2.50-2.81	2.64
Andesite	2.40-2.80	2.61
Basalt	2.70-3.30	2.99
Gabbro	2.70-3.50	3.03

#### *Ore minerals*

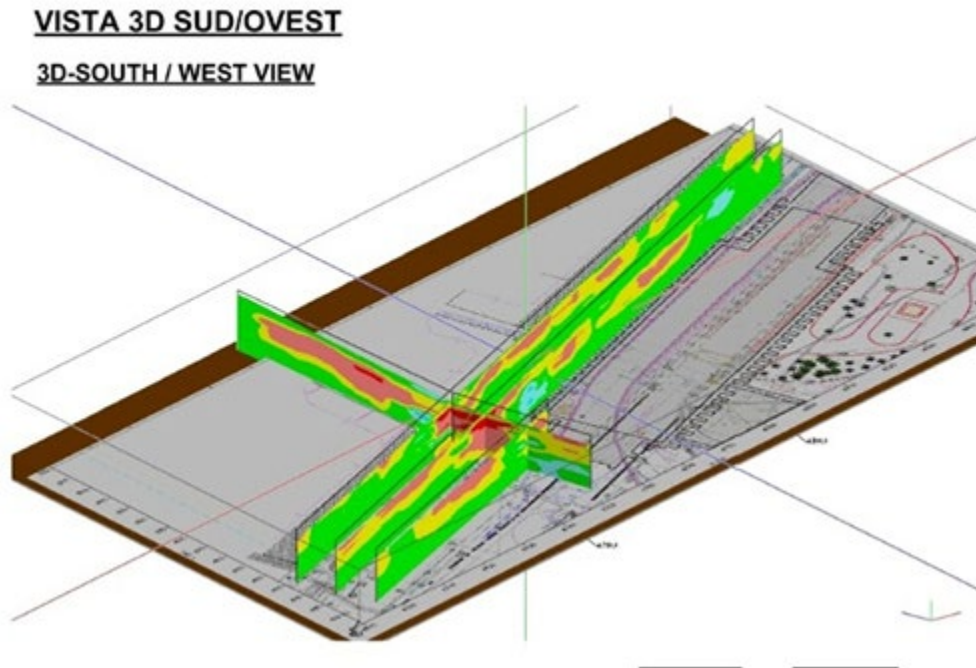
Sphalerite	3.8–4.2
Galena	7.3–7.7
Chalcopyrite	4.1–4.3
Chromite	4.5–4.8
Pyrrhotite	4.4–4.7
Hematite	5.0–5.2
Pyrite	4.9–5.2
Magnetite	5.1–5.3

Coal	1.2–1.5
Salt	2.1–2.4

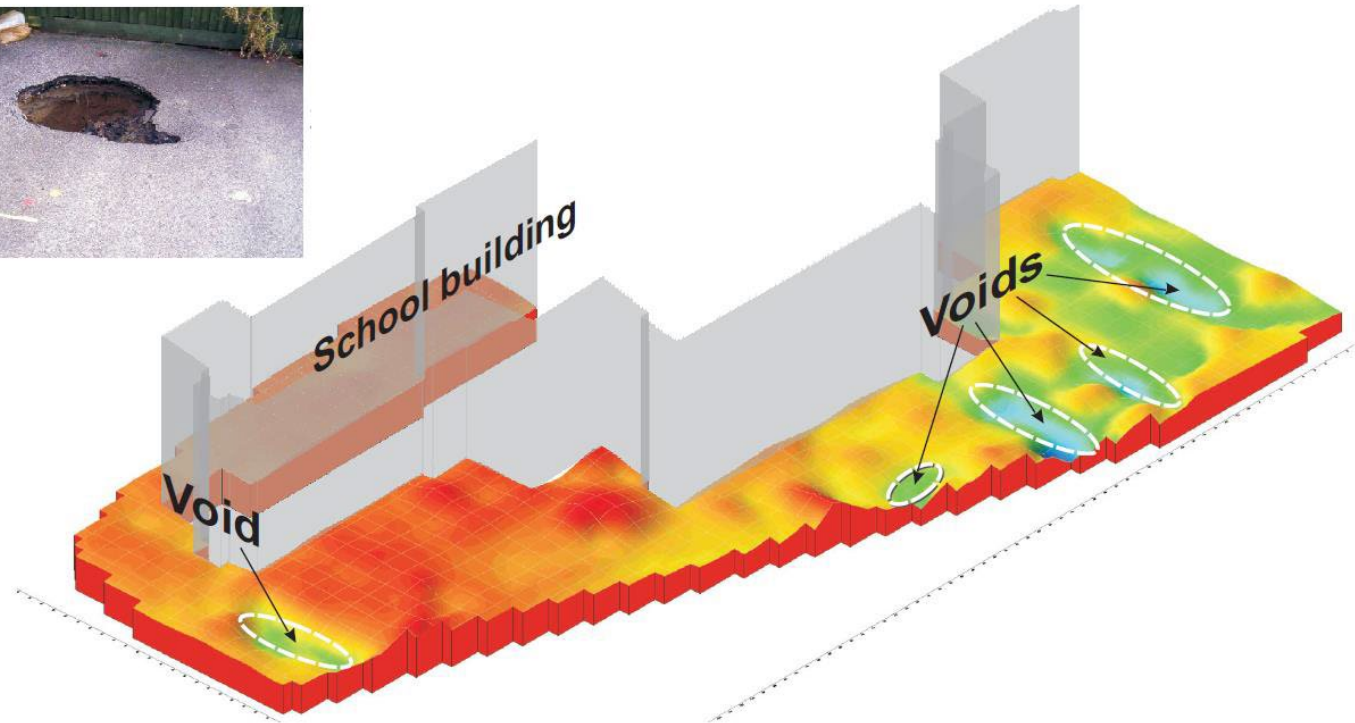
Des mesures micro-gravimétriques sont effectuées pour étudier la distribution horizontale et verticale de la densité dans le sous-sol.

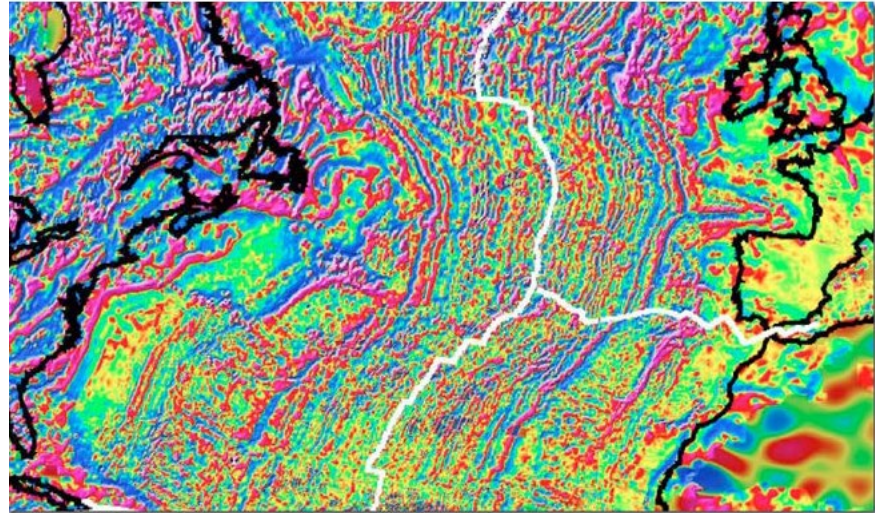
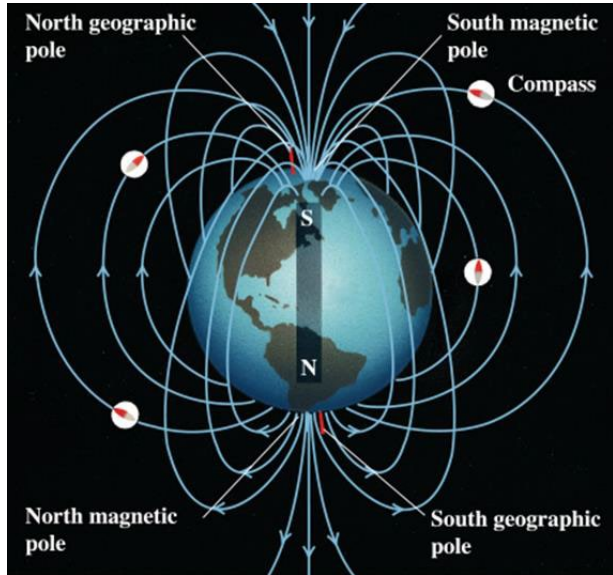
Les zones géologiquement faibles et les perturbations dans le sous-sol peuvent être détectées de cette manière.

Les résultats donnent un modèle de distribution de la densité et de ses variations horizontales et verticales en  $\text{kg} / \text{m}^3$ , affichées dans une section verticale.



Exemple d'un barrage





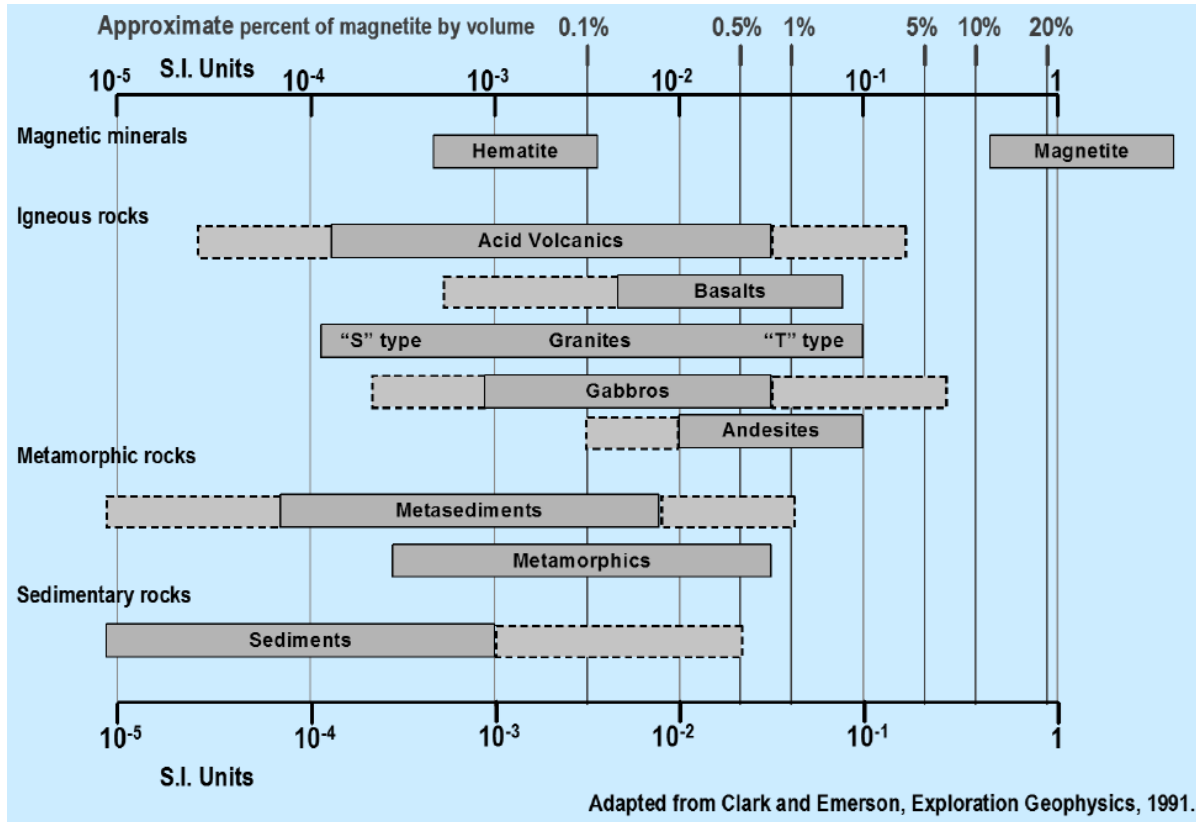
Variation du champ magnétiques (variation en susceptibilité magnétique)

Le champ magnétique terrestre est considéré comme homogène à l'échelle locale.

Les anomalies magnétiques locales sont causées par des corps souterrains ayant des susceptibilités magnétiques différentes (présence de magnétite)

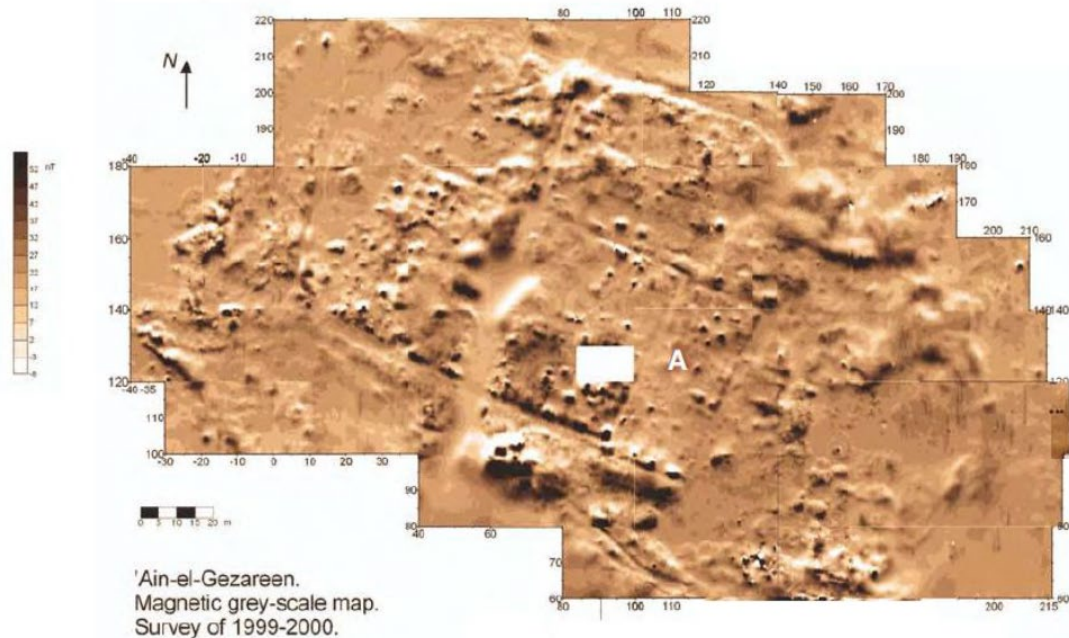
On observe une superposition d'un champ normal et un champ local (anormal) (unités nT).

Direction des anomalies magnétiques est comparé à celui de la champ ambiant





## Exemple d'anciennes fondations



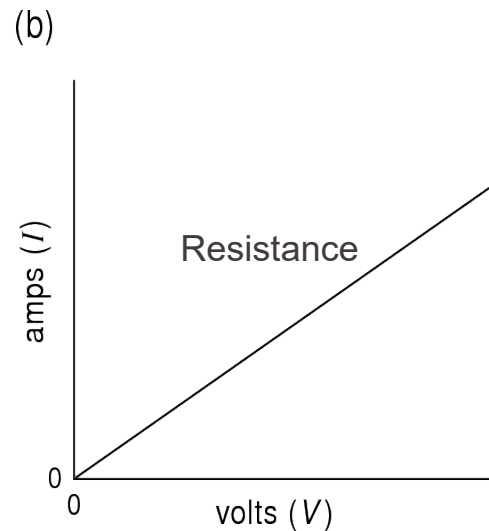
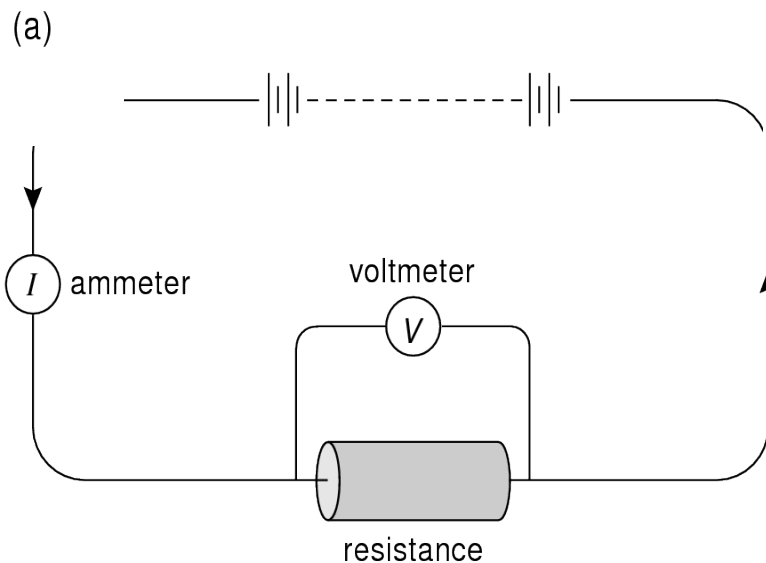
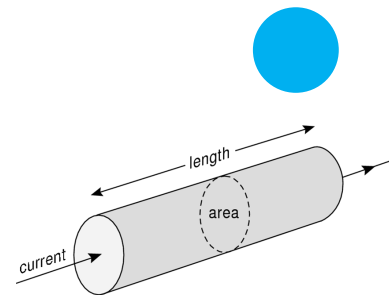
Smekalova et al. (2008)

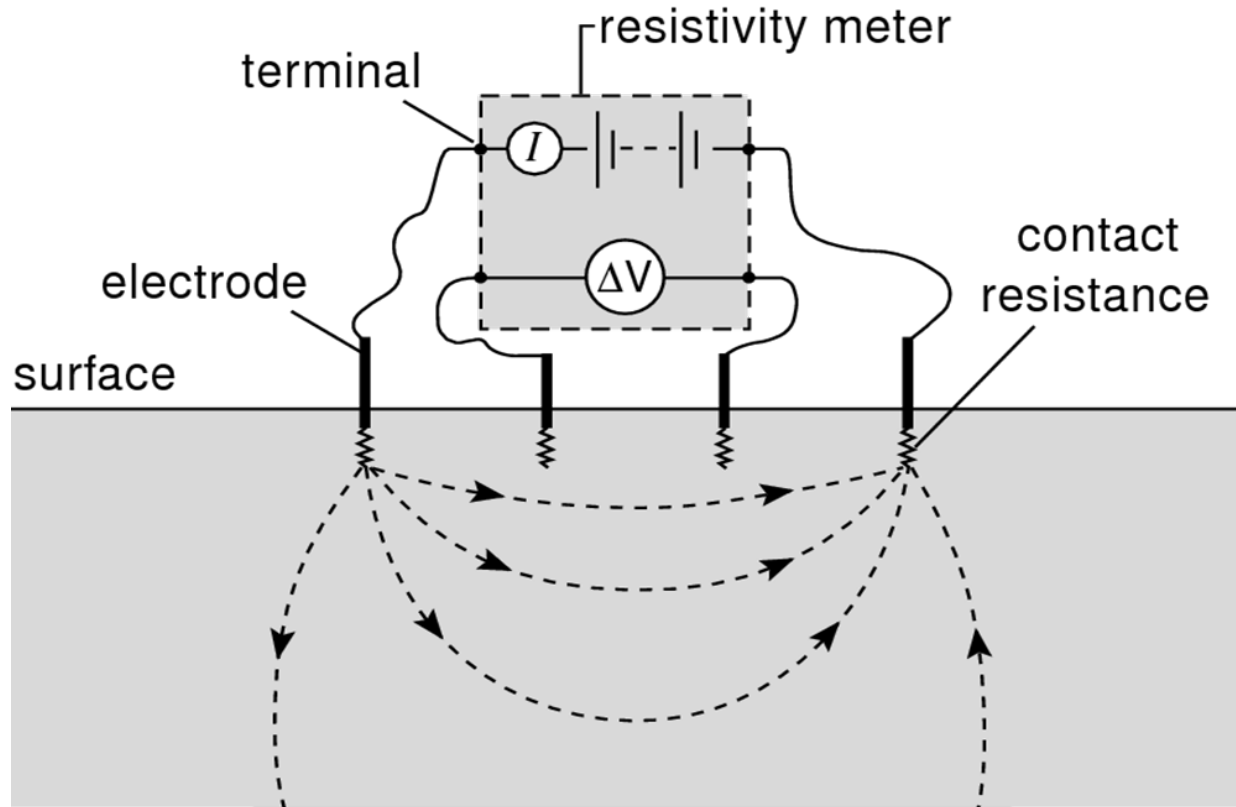


Les mesures de résistivité étudie les variations de résistance électrique en faisant circuler un courant électrique dans le sous-sol à l'aide de fils (électrodes) connectés à la terre.

- Loi d'Ohm:** Résistance :  $R = \frac{V}{I}$   
Résistivité :  $\rho = R \frac{a}{l}$

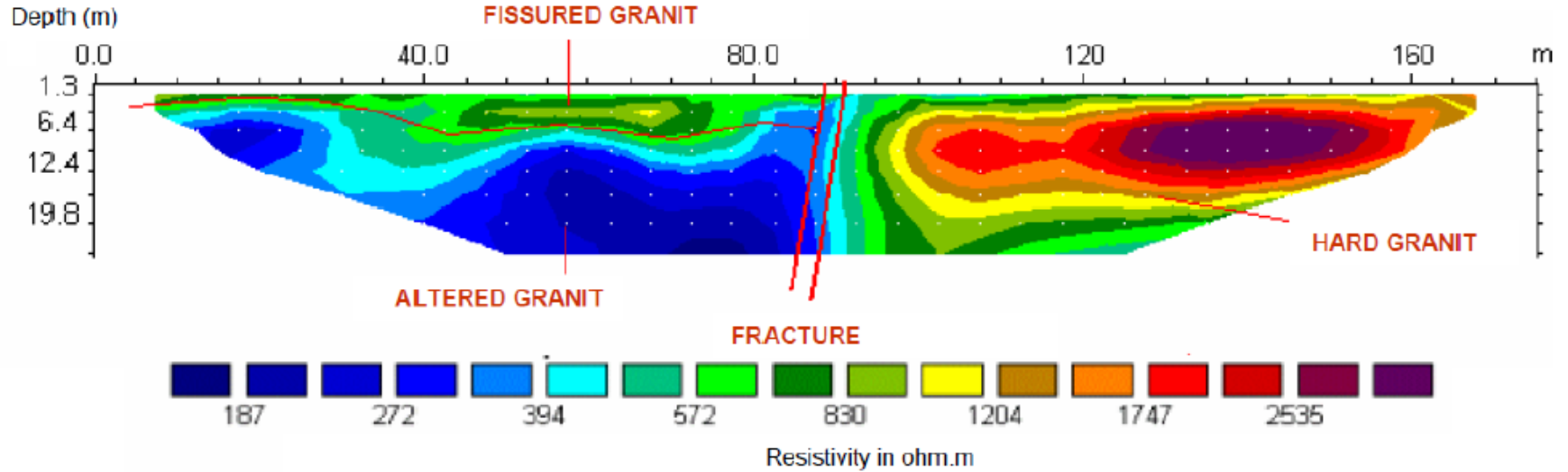
Resistance [=] Ohms (symbol =  $\Omega$ )

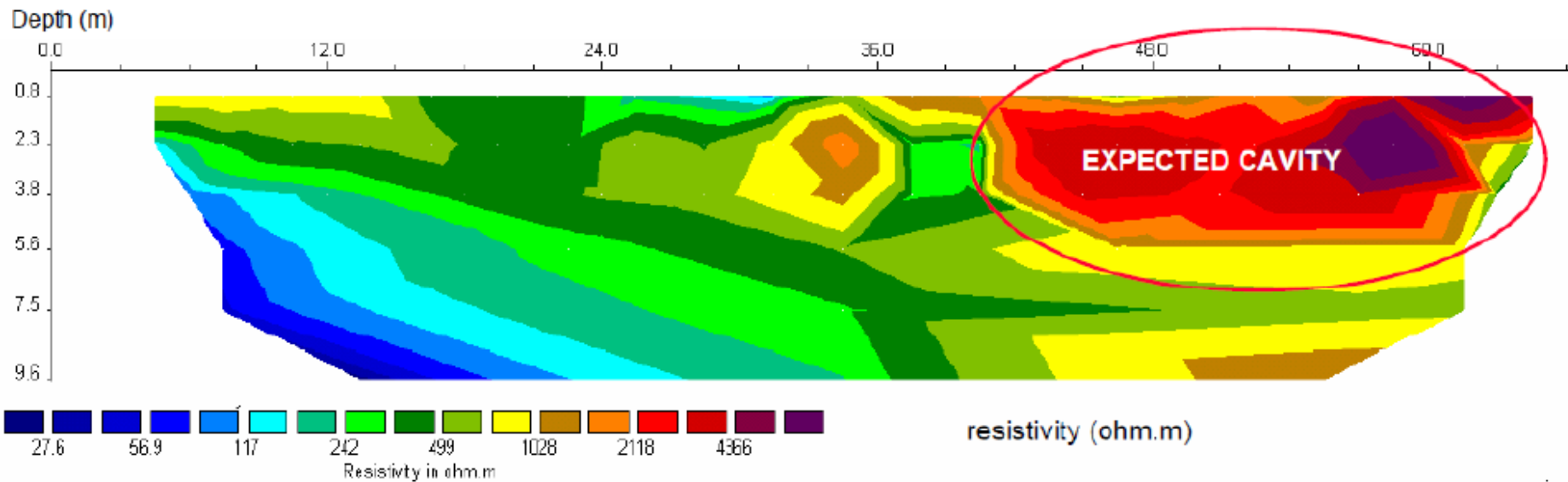


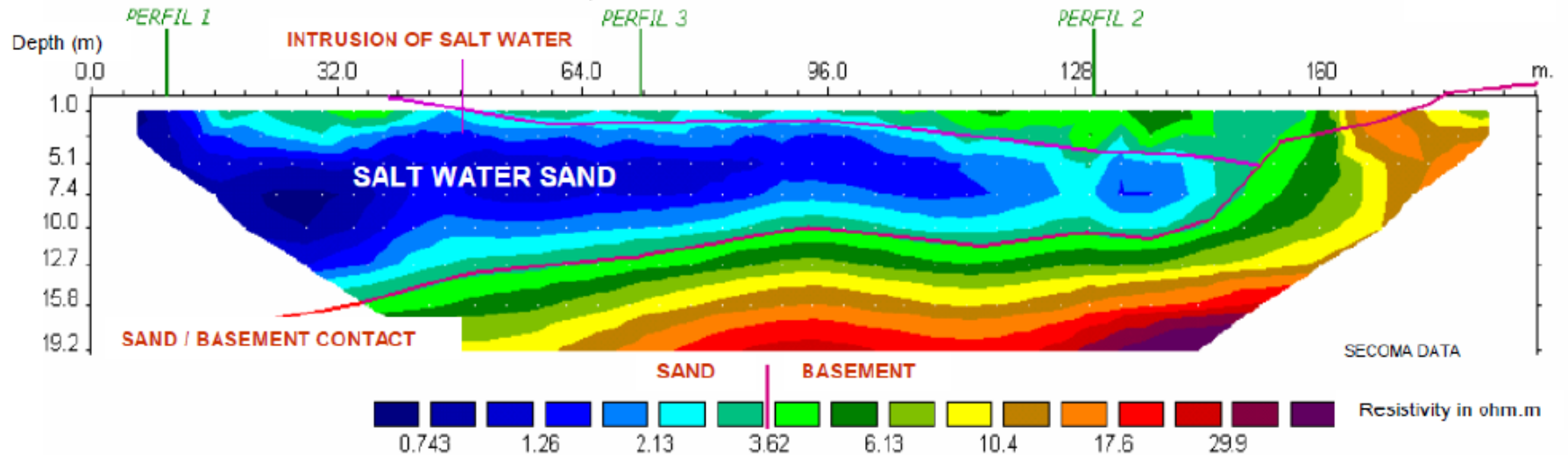




Rock/Fluid	State	$\rho_a$ (ohmm)
Quartz		$10^{12} - 3 \cdot 10^{14}$
Marble		$5 \cdot 10^7 - 10^9$
Shale		2 - 10
Sand	saturated with brine	0.5 - 10
	saturated with oil	$5 - 10^3$
Limestone	hard	$10^3$
Sulphide		<1
Graphite		0.1 - 10
Oil		$2 \cdot 10^{14}$
Distilled water		$2 \cdot 10^{14}$
Brine	15 <sup>0</sup> C, 2 kppm	3.4
	15 <sup>0</sup> C, 10 kppm	0.72
	15 <sup>0</sup> C, 100 kppm	0.09
	15 <sup>0</sup> C, 200 kppm	0.06







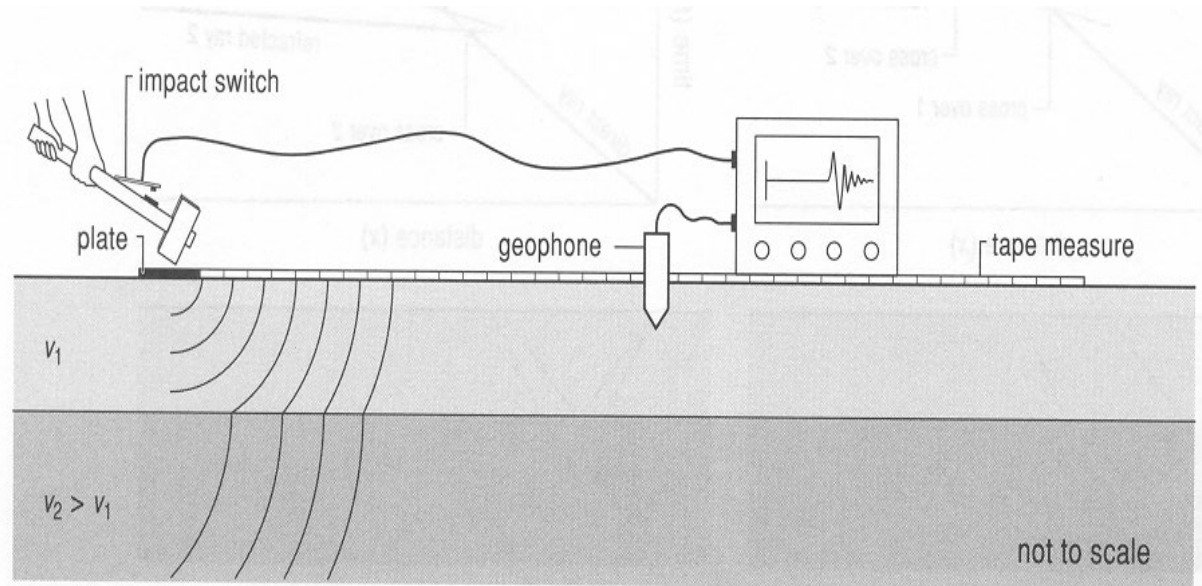


L'imagerie sismique est une méthode géophysique d'observation de la subsurface. Elle permet de visualiser les structures géologiques en profondeur grâce à l'analyse des échos d'ondes sismiques.

Les ondes sismiques peuvent être d'origines naturelles (séisme) ou artificielles. Le signal initial est généralement issu d'une source prévue pour l'imagerie (camion vibreur, explosif, canon à air, etc.) mais peut aussi être composé de bruits ambiants (activités industrielles, passage de trains) on parle alors de sismique passive. Dans tous les cas, les ondes suivent les mêmes lois de propagation que les ondes lumineuses.

On distingue :

- la sismique par réflexion
- la sismique par réfraction



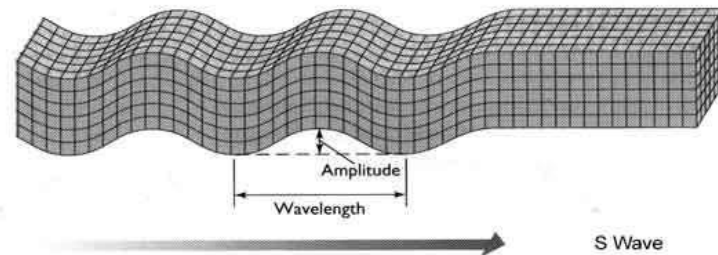
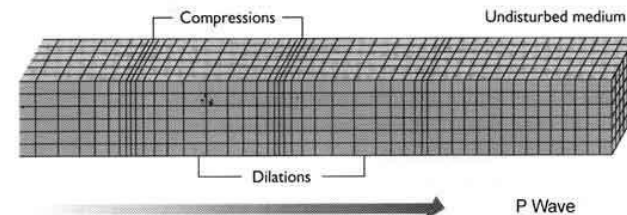
**Figure 6.13** Hammer system.

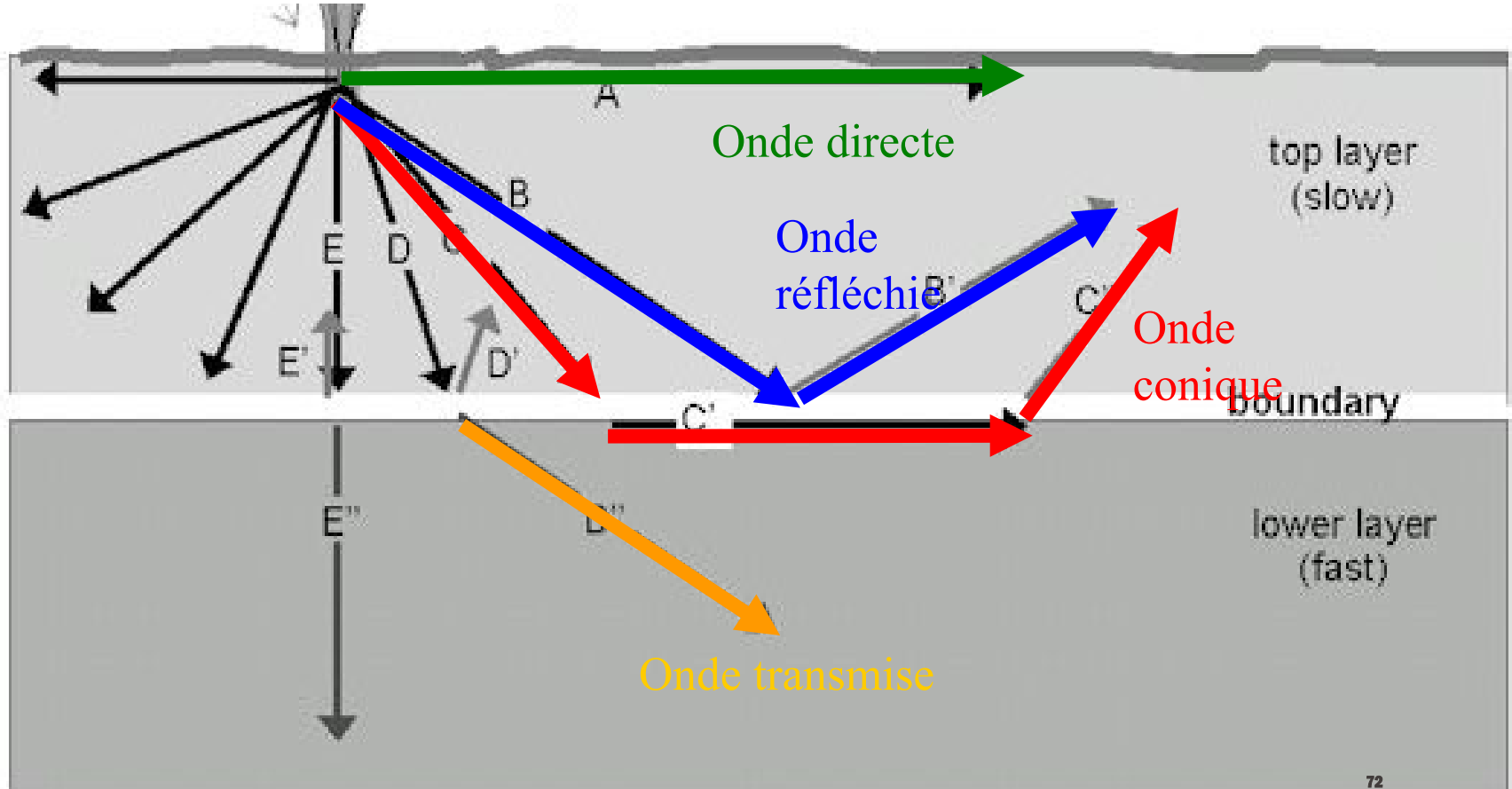


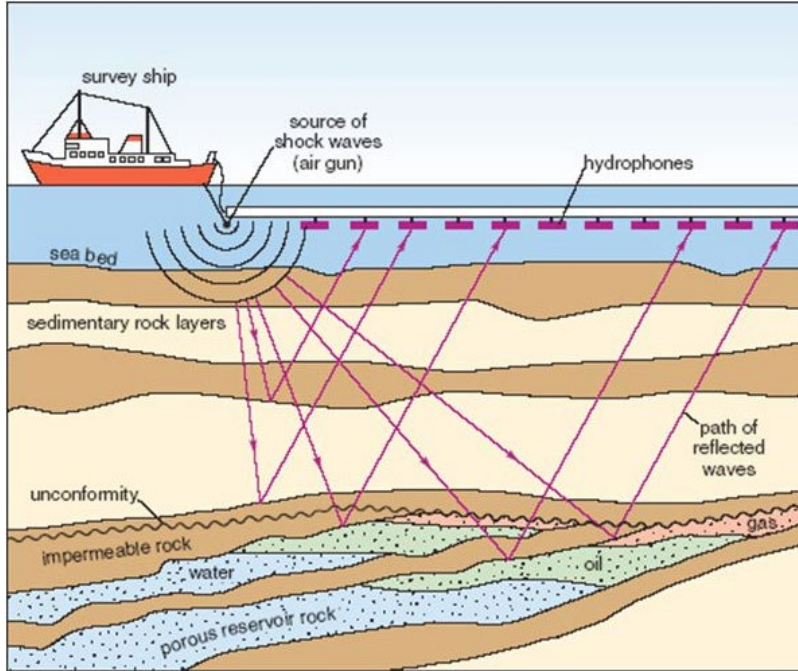
La mesure des amplitudes et des temps de trajet d'une onde dépend de la densité et des modules élastiques

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

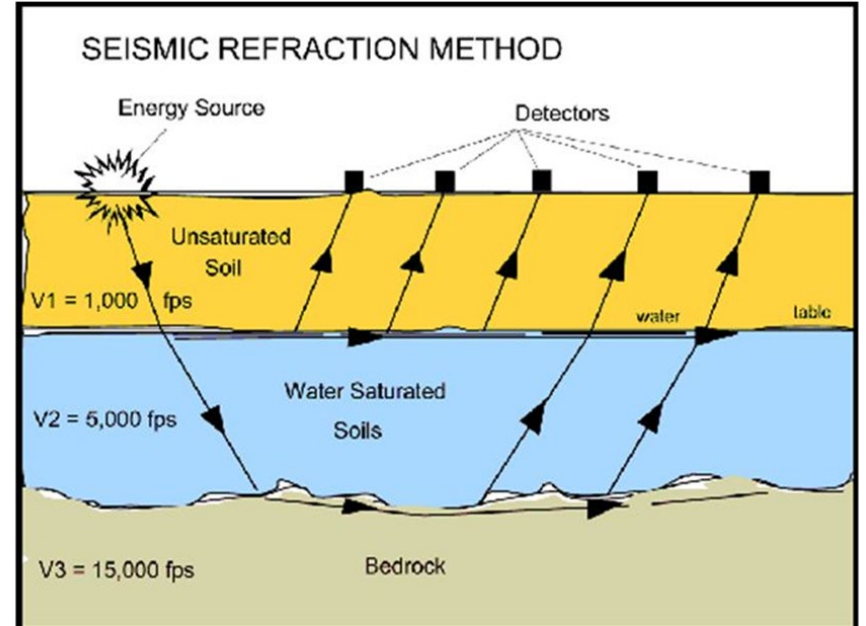
$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$



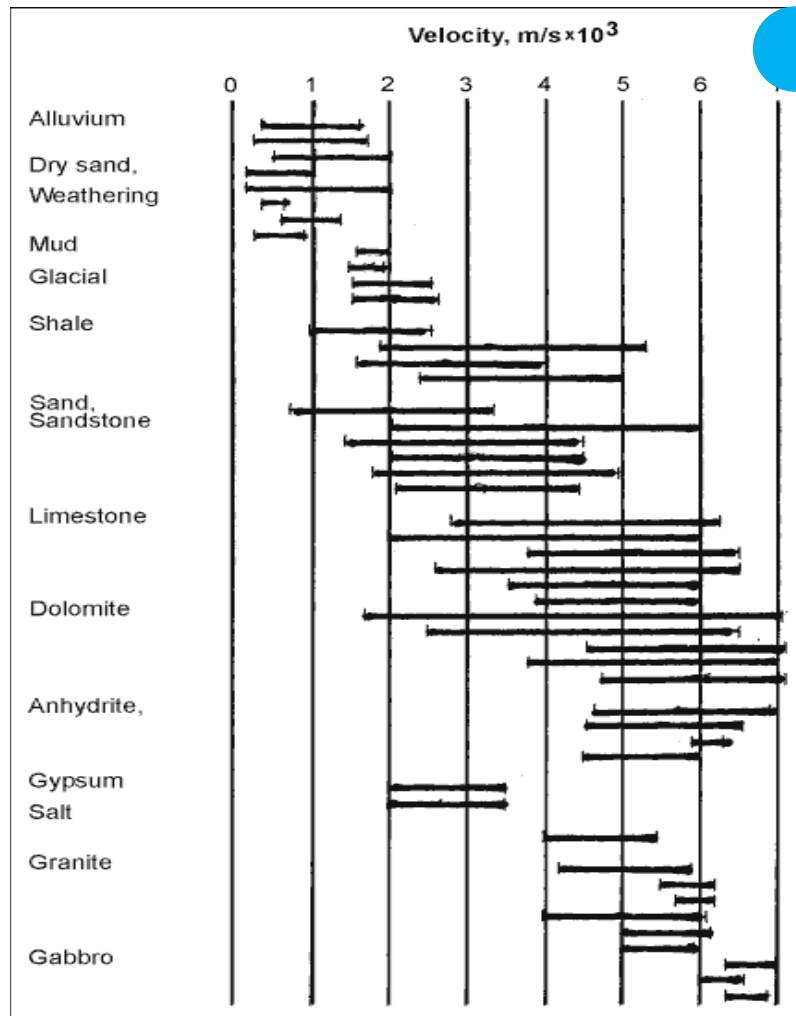


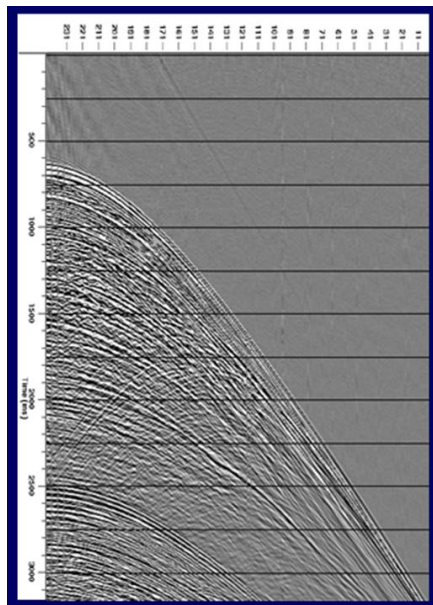


Réflexion



Réfraction

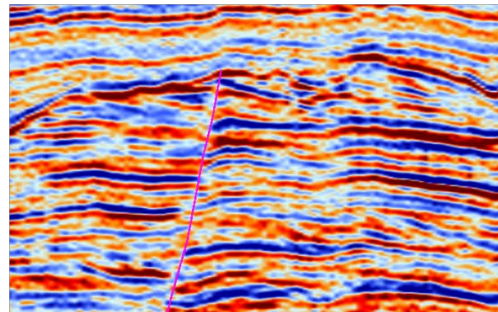




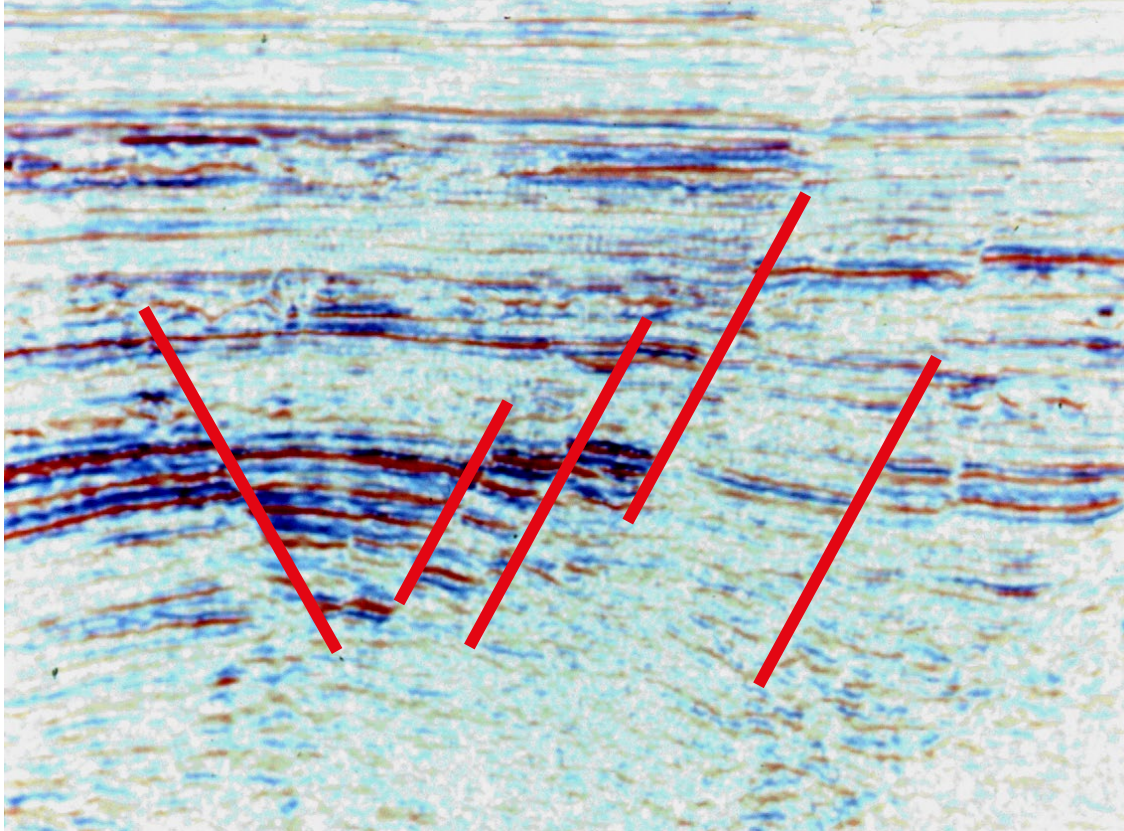
Field Record  
(marine)



**Data Processing  
Stream**



**Subsurface 'Image'**

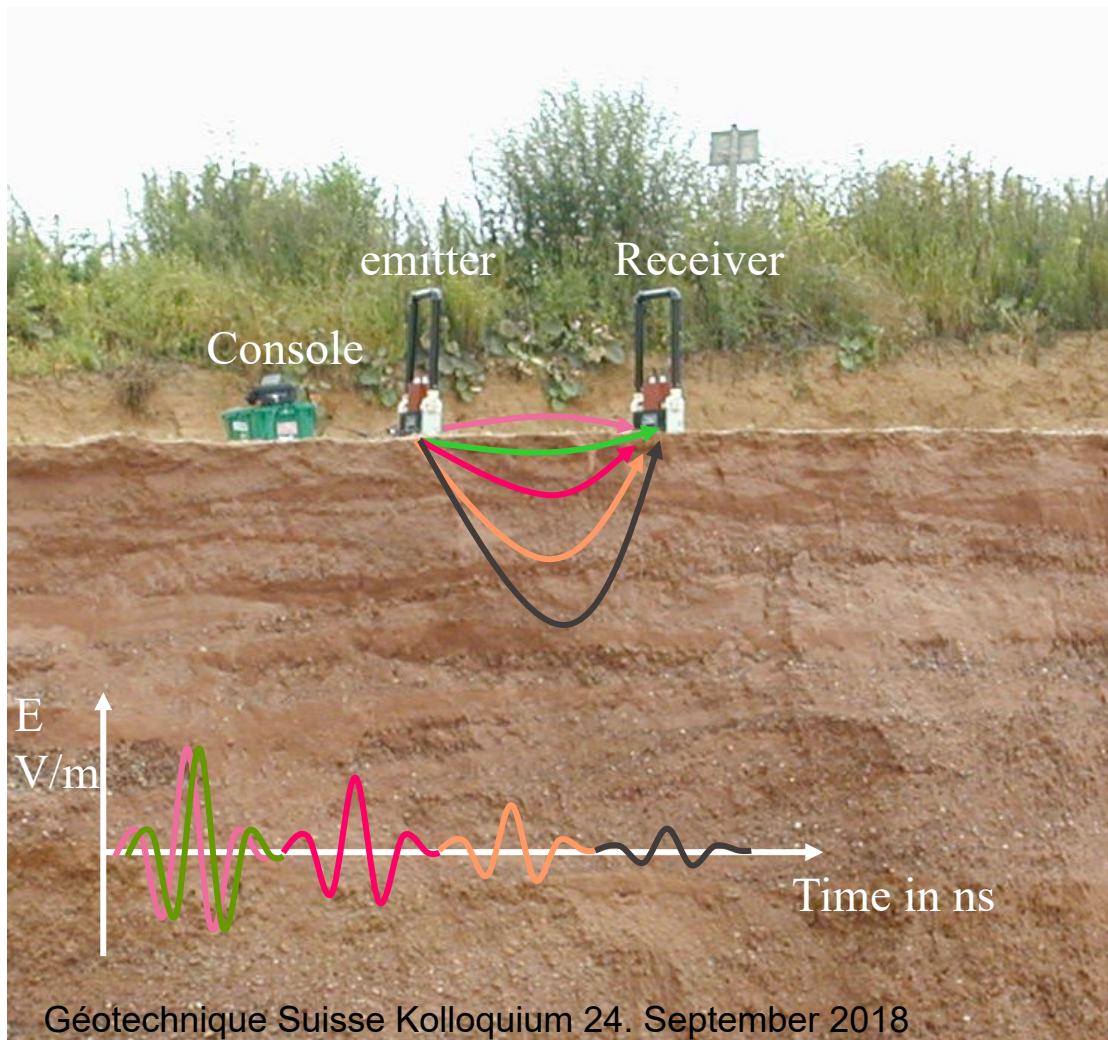


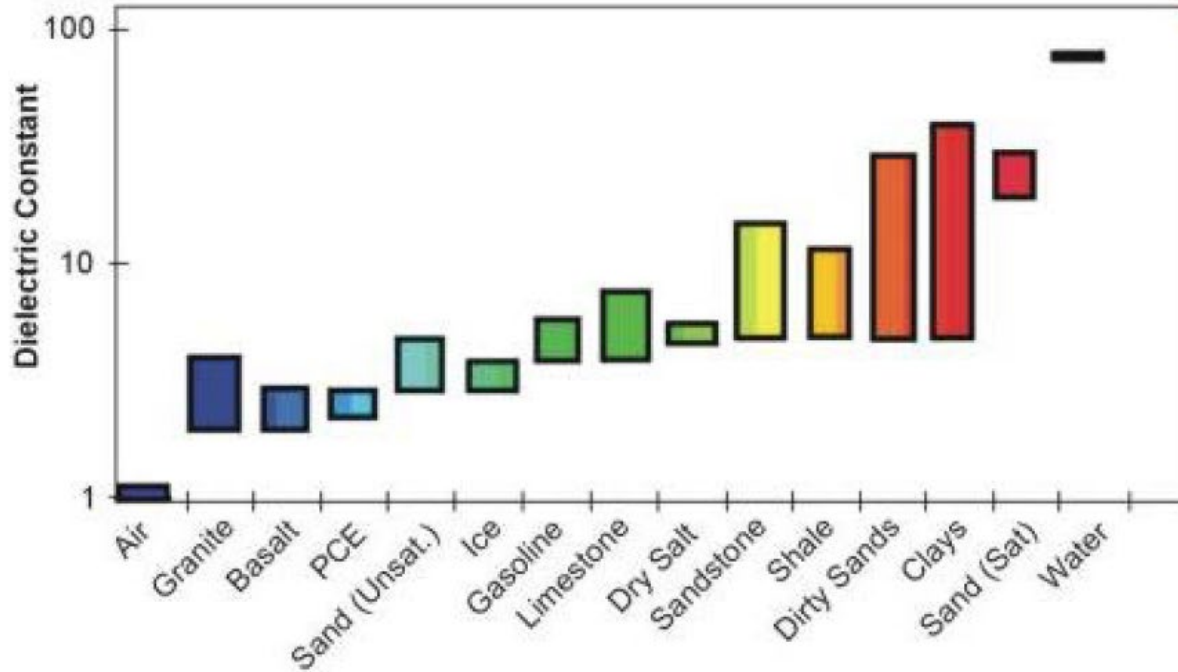


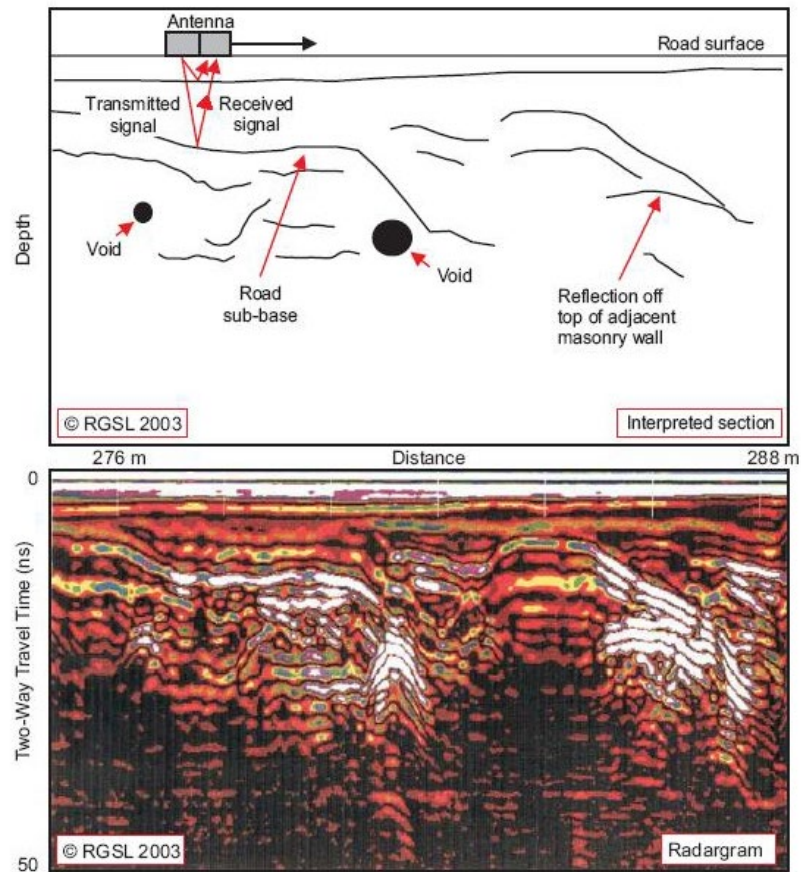
Un radar à pénétration de sol (RPS) (en anglais GPR pour Ground Penetrating Radar) appelé aussi radar géologique ou géoradar est un appareil géophysique utilisant le principe d'un radar que l'on pointe vers le sol pour en étudier la composition et la structure. En général, on utilise la bande des micro-ondes et des ondes radio (VHF/UHF). On peut sonder ainsi une variété de terrains, incluant les calottes glaciaires et les étendues d'eau.

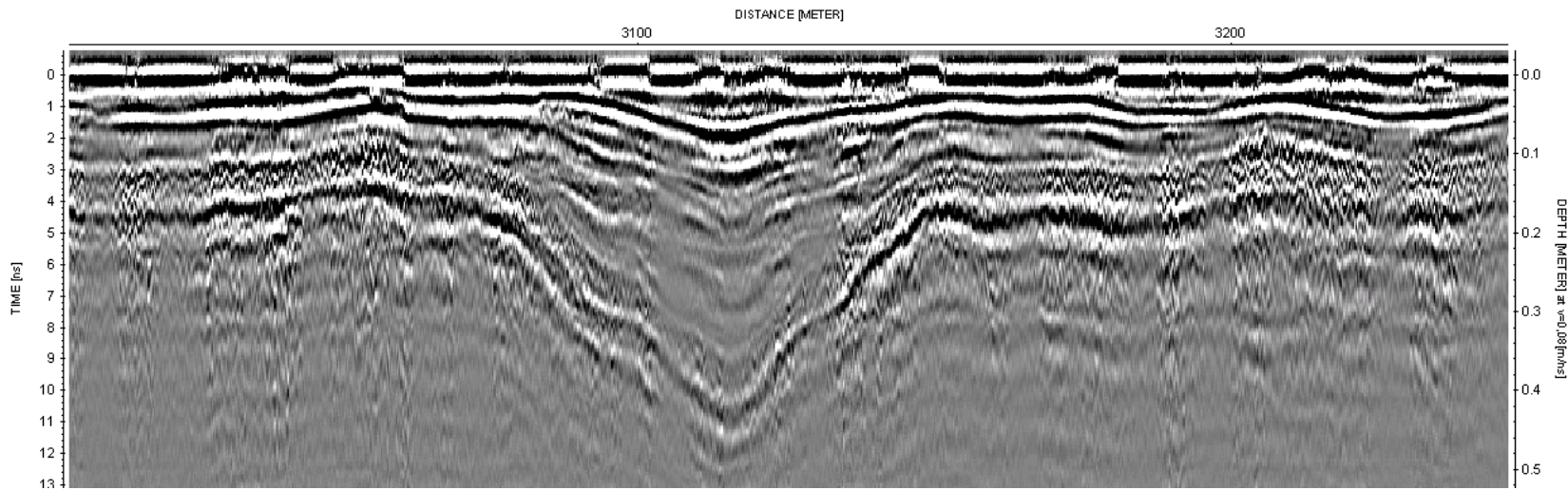
Des ondes électromagnétiques sont envoyées dans le sous-sol par une antenne. Lorsque ces ondes rencontrent des changements de milieux, une partie est renvoyée vers la surface et enregistrée par l'antenne réceptrice qui peut être la même que l'émettrice ou une autre située à un endroit différent.

Le principe est similaire au sondage sismique mais l'énergie électromagnétique utilisée est reflétée par les zones de changement de la constante diélectrique plutôt que celle de changement d'impédance acoustique.









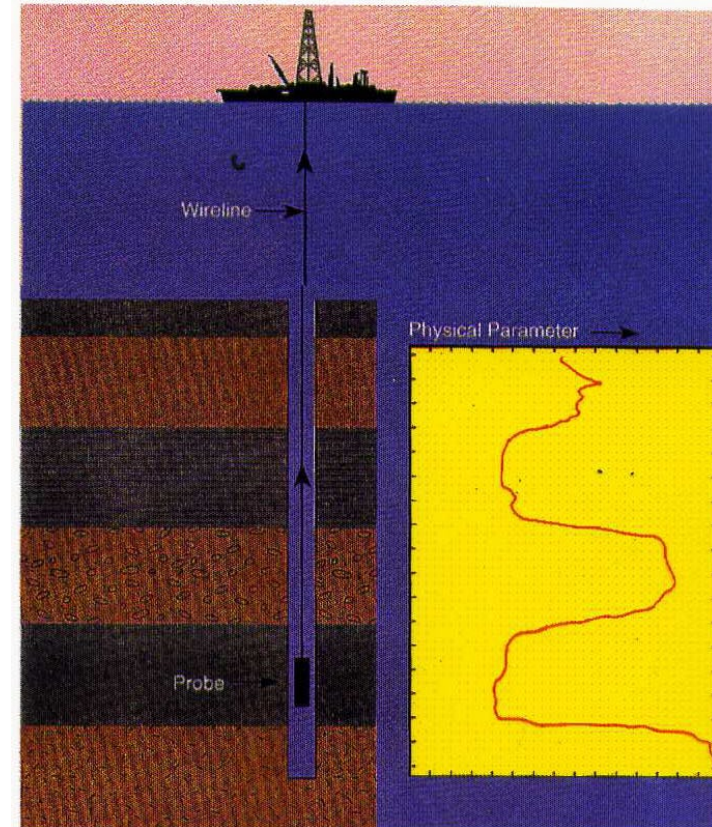
Exemple d'une route  
(Au centre 42 premier cm = goudron)



- Télédétection & photo aérienne
- Géophysique de surface
- Géophysique en puits
- Test in situ
- Mesure au laboratoire



La Géophysique ou logging en puits donne des indications précises et représentatives sur les propriétés physiques des formations rocheuses et des fluides rencontrés dans un forage.



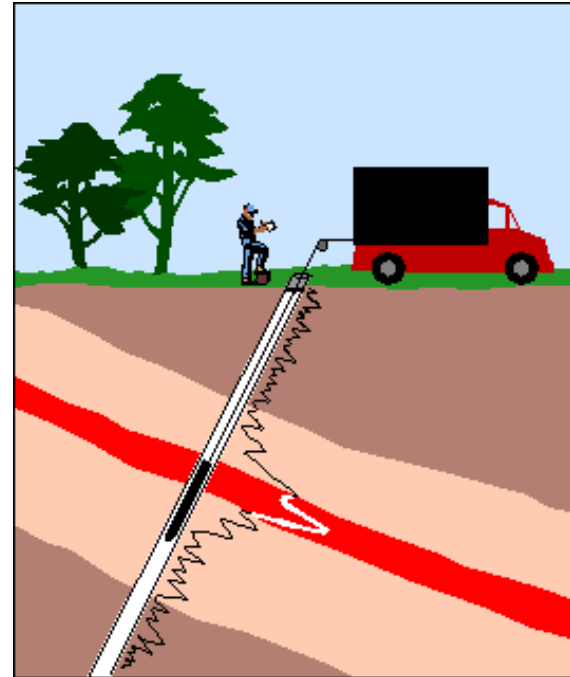
Un log est un enregistrement continu d'un paramètre géophysique le long d'un forage

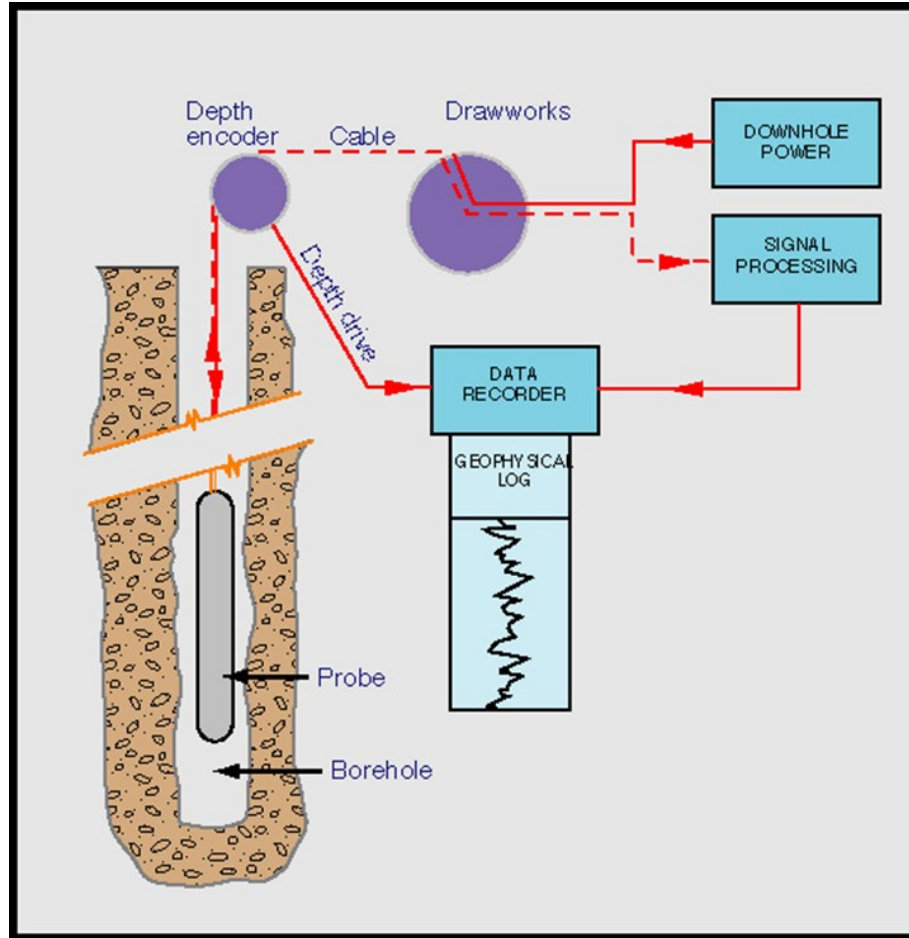




## Paramètres physiques qui peuvent être mesurés en forage :

- Taille du forage,
- Orientation du forage,
- Température,
- Pression,
- Radioactivité naturelle des roches,
- Propriétés acoustiques des roches,
- Propriétés électriques des roches,



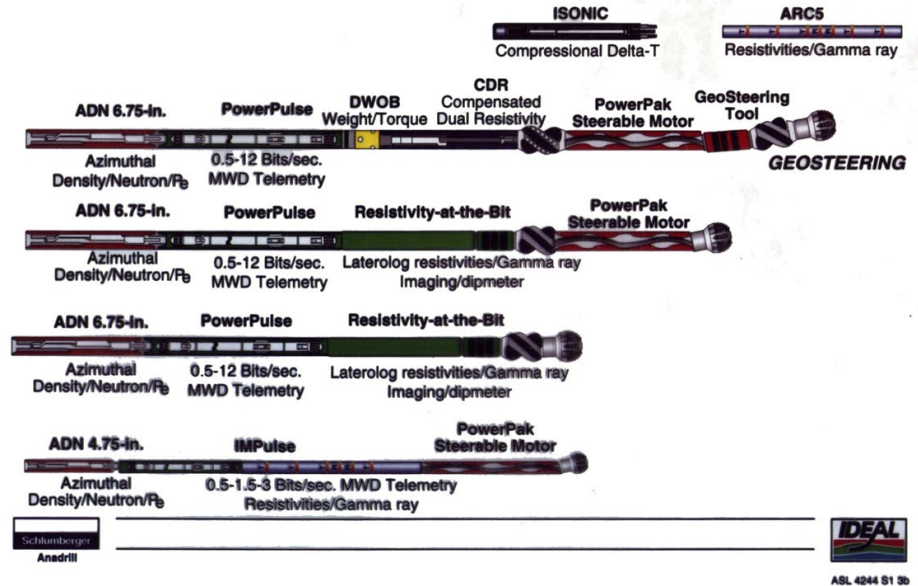




## Quand?

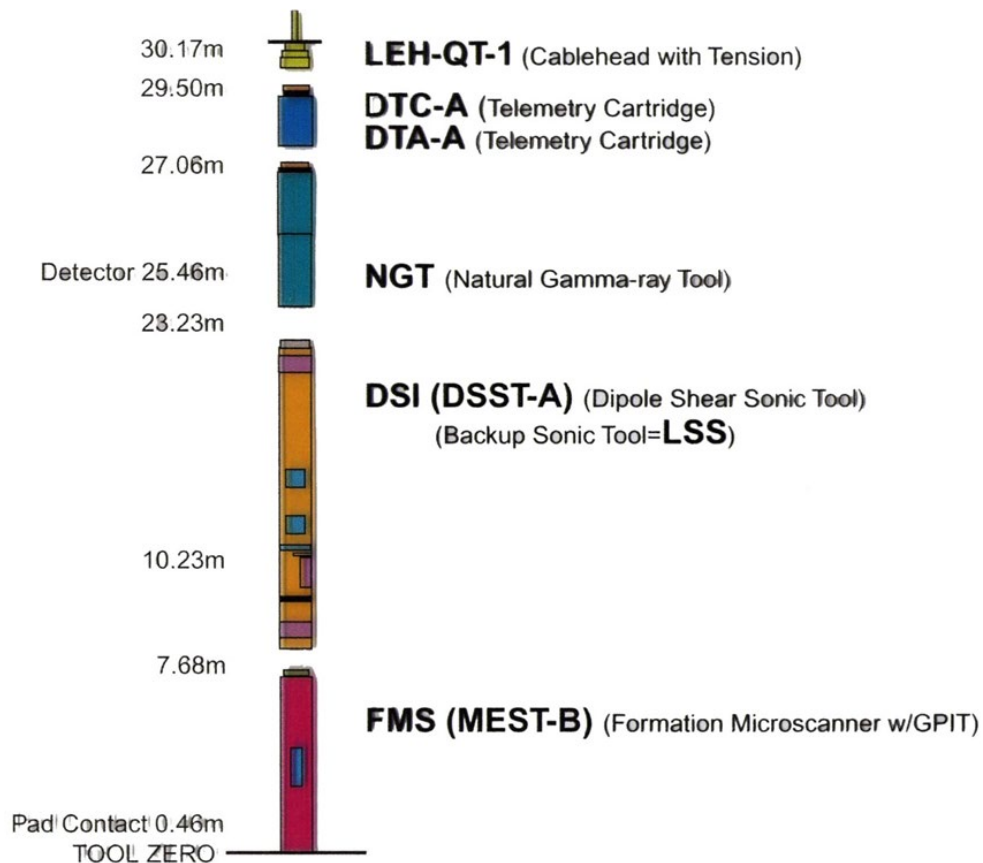
- 1) entre les épisodes de forage
- 2) avant le tubage
- 3) à la fin du forage
- 4) après tubage

Les développements récents permettent également d'effectuer certaines mesures lors du forage.



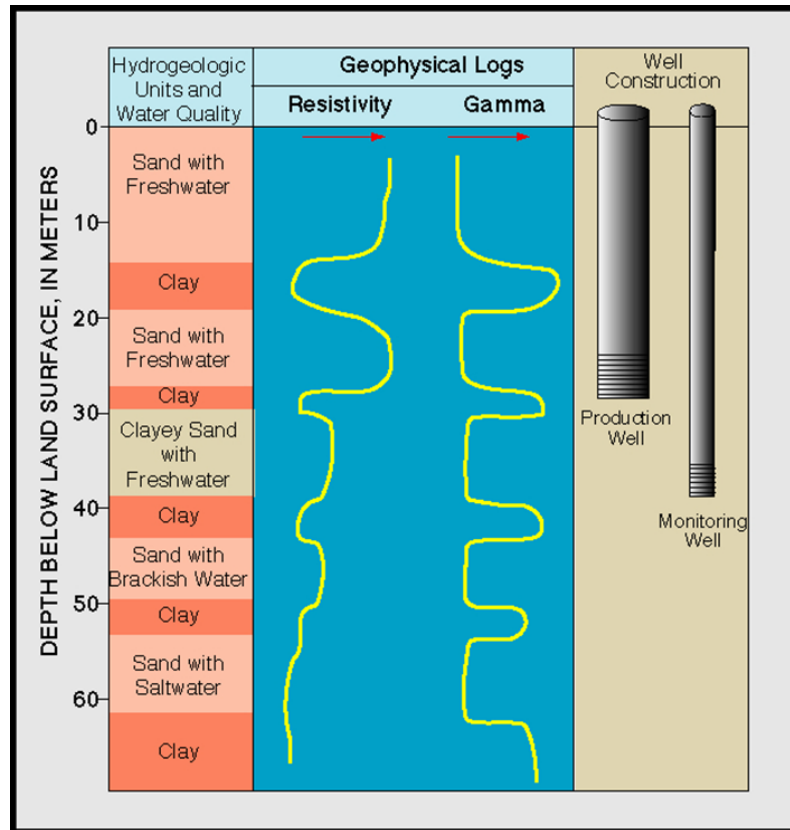
Il existe une pléthore d'outils de logging maintenant disponibles.

Ils sont souvent montés en série.

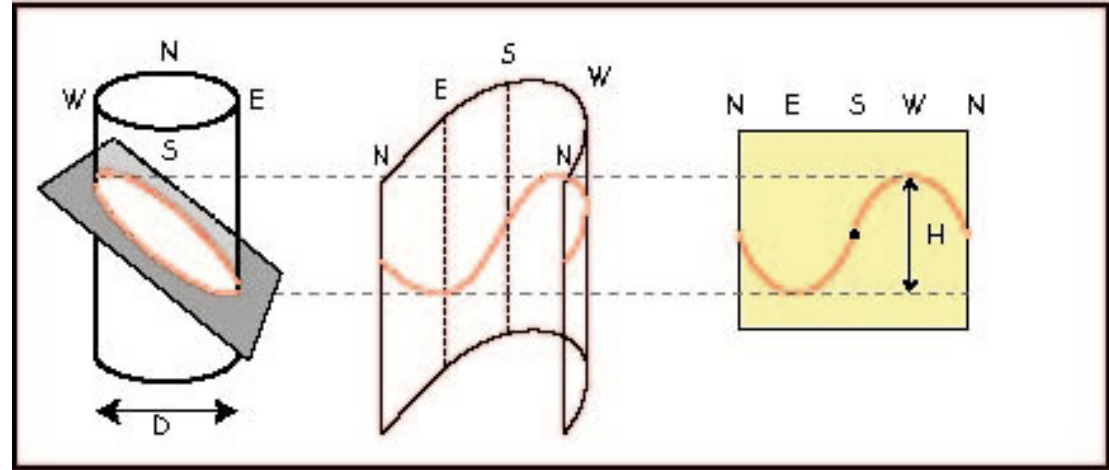
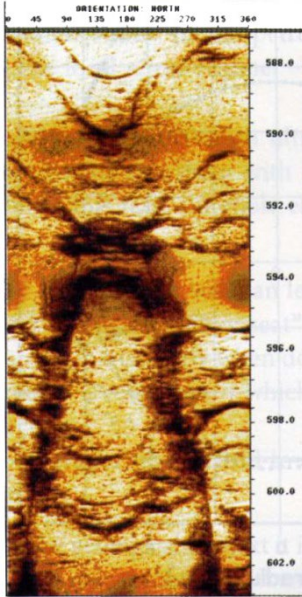




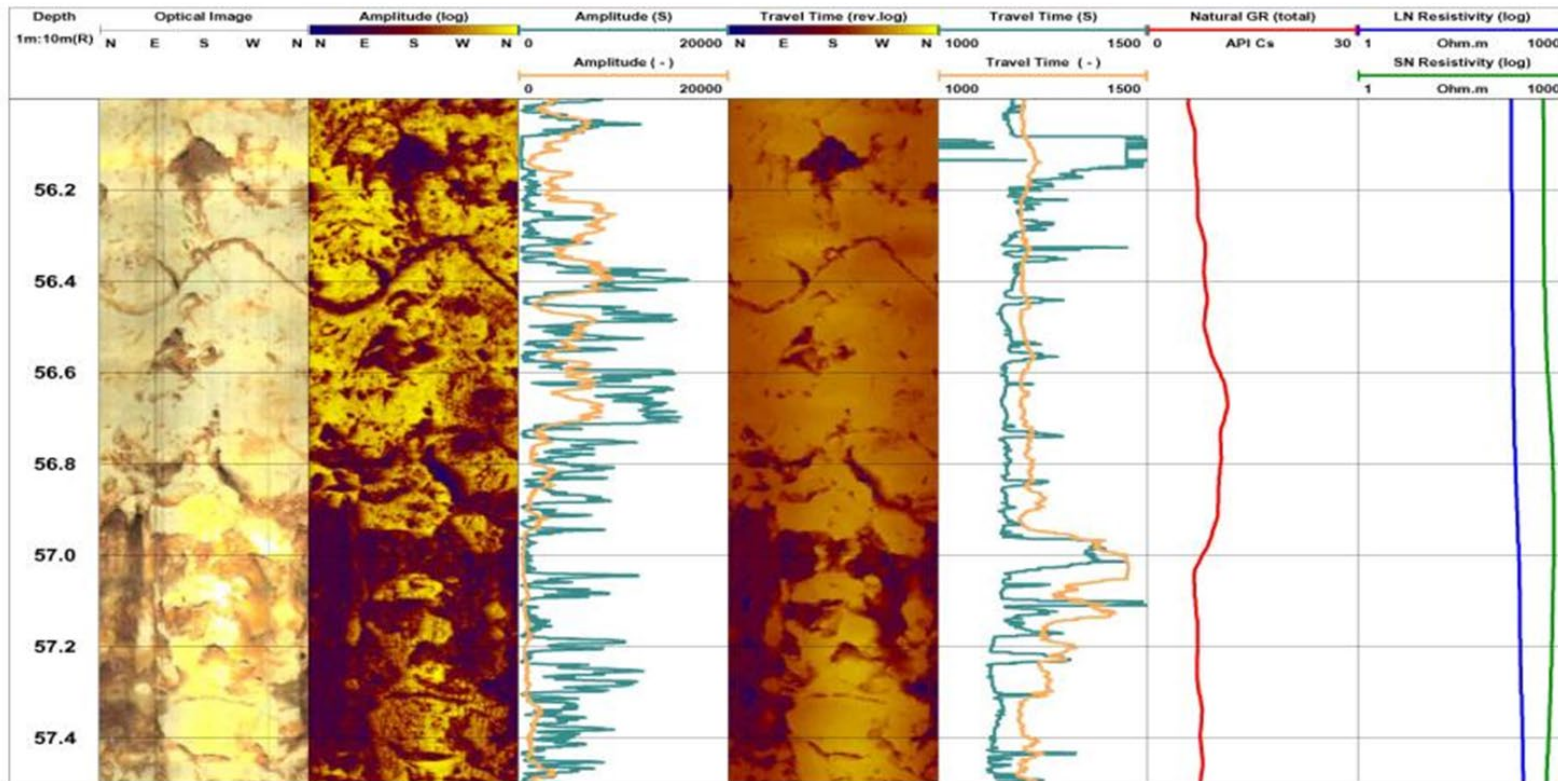
Tool	Physical Measurement	Use	Comments
<b>Logging conditions</b>			
Temperature (BHT)	Temperature	Borehole temperature for resistivity calculations.	Corrected with Horner plot calculations.
Pressure (PRESS)	Fluid pressure	Fluid pressure for formation volume factor calculations.	Incorporated in RFT
Caliper (CAL)	Borehole diameter	Data quality, in situ stress tensor, lithology and permeability indicator	Available in 2, 4, or multi-arm versions.
<b>Lithology</b>			
Gamma Ray (GR)	Natural radioactivity of the formation.	Shale indicator and depth matching	Can read through casing.
Spontaneous Potential (SP)	Sand/shale interface potential.	Permeable beds Resistivity of formation water	Does not work in conductive muds, or offshore.
<b>Porosity</b>			
Sonic (BHC, LSS)	Velocity of an elastic wave in the formation.	Effective (connected) porosity	Compaction, gas and vugs, calibration of seismic data.
Density (FDC, LDT)	Bulk density of the formation.	Total porosity	Used to calculate synthetic seismograms.
Neutron (SNP, CNL)	Hydrogen concentration in the formation.	Total porosity (shale increases measured porosity, gas reduces measured porosity)	Can read through casing.
<b>Resistivity</b>			
Simple electric log (SN, LN, Lat)	Resistivity of flushed, shallow and deep zones respectively.	Used in water saturation calculations.	Now obsolete, not focussed, can't be used in oil based mnds, prone to invasion.
Induction Logs (IES, ISF, DIL, DISF, ILm, ILd)	Conductivity of the formation.	Conductivity and resistivity in oil based mnds, and hence calculation of water saturation.	Focussed devices. Use in oil based and fresh water mnds. Range of depths of investigation. (Vertical resolution 5-10 ft.)
Laterologs (LL3, LL7, DLL, LLS, LLD)	Resistivity of the formation.	Resistivity in water based mnds, and hence calculation of water saturation.	Focussed devices. Use in salt water based mnds. Range of depths of investigation. (Vertical resolution 2-4 ft.)
Microlog (ML)	Resistivity of mudcake and flushed zone.	Indicator of permeability. Detector of thin beds.	(vertical resolution about 1 ft.)
Micro-laterolog (MLL)	Resistivity of flushed zone.	Measures $R_{\infty}$	Not good with thick mudcakes.
Proximity Log (PL)	Resistivity of flushed zone.	Measures $R_{\infty}$	Not good if invasion is small.
Micro-spherically focussed log (MSFL)	Resistivity of flushed zone.	Measures $R_{\infty}$	Part of DLL- $R_{\infty}$ tool.
<b>Imaging Logs</b> There is a range of imaging logs based upon sonic, visual, electrical and NMR measurements that are beyond the scope of this course.			



Scalar 1 D



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





- Télédétection & photo aérienne
- Géophysique de surface
- Géophysique en puits
- **Test in situ**
- Mesure au laboratoire

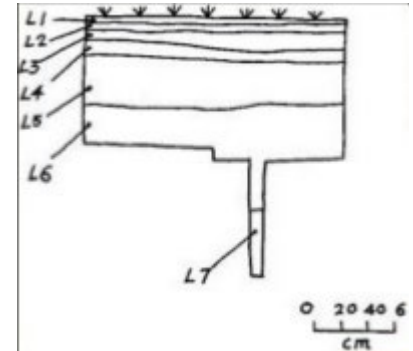


- Reconstruction de la stratigraphie
- Echantillonnage
- Essai in situ
- Installation d'instrument de contrôle

## Fouille :

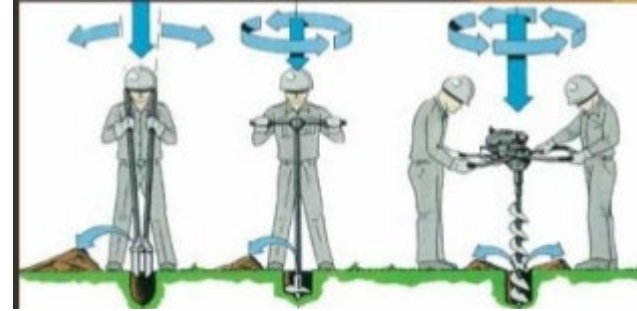
Permet l'inspection visuelle des conditions du sous-sol à l'état naturel (Prof. Max. limitée à 6 m). Particulièrement utile pour les sols graveleux où les forages peuvent être difficiles.

Échantillonnage / tests effectués sur des surfaces exposées.



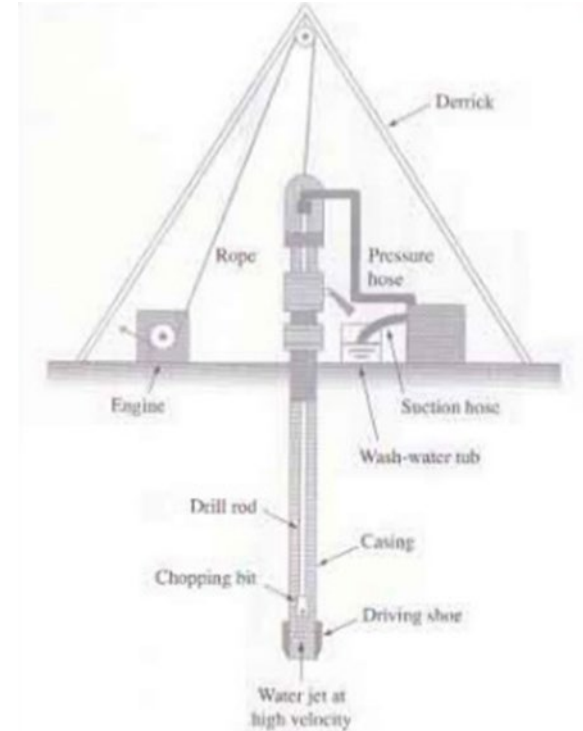
## Carottage avec vis sans fin

- Méthode d'exploration et d'échantillonnage la plus simple.
- À moteur ou à main.
- Max. profondeur 10 m.
- Convient à tous les sols au dessus de la nappe phréatique et aux sols cohérents situés au-dessous de la nappe phréatique.



**Carottage à l'eau/boue:** Un carottier est équipé d'un foret fixé aux tiges de forage creuses.

- Système en rotation
- Souvent utilisé pour le carottage des roches





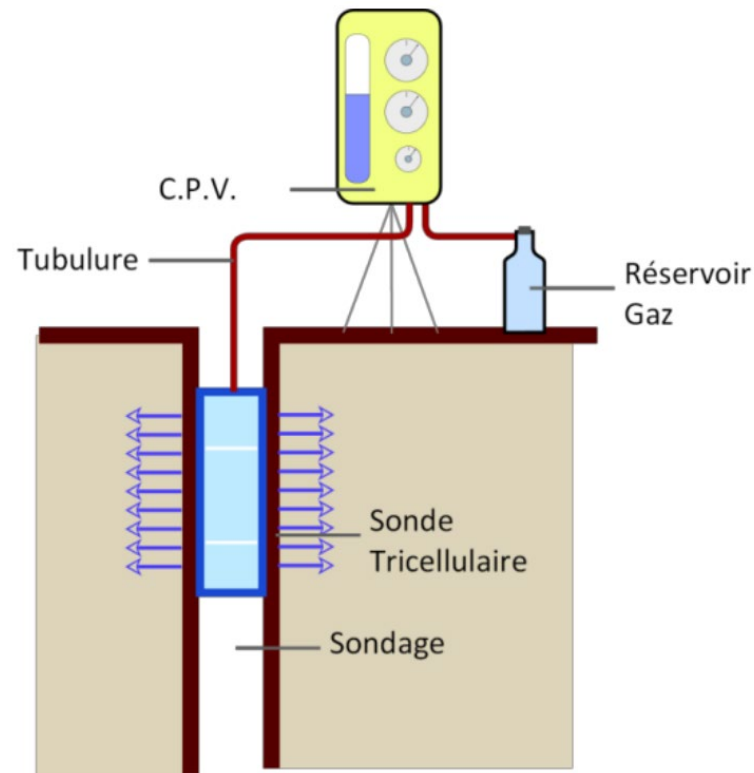


- Essai pénétrométrique.
- Essai préssiométrique
- Essai de cisaillement
- Essai de plaque
- Essai de perméabilité



## Objectif de l'essai pressiométrique

- L'essai pressiométrique est un essai de chargement in situ effectué au sein même du terrain grâce à la réalisation préalable d'un forage. L'analyse des résultats permet d'obtenir, pour une profondeur donnée, les caractéristiques mécaniques du sol et d'effectuer les calculs de fondation.
- L'appareil pressiométrique est constitué d'une sonde cylindrique dilatable radialement que l'on descend dans le sol au niveau de l'essai et d'un appareillage de mesure restant en surface. La sonde constituée de trois cellules exerce sur la paroi du forage, au niveau de la cellule centrale de mesure, des pressions rigoureusement uniformes selon une progression arithmétique. Les déplacements de cette paroi qui en résultent sont lus ou enregistrés pour chacune des pressions en fonction du temps



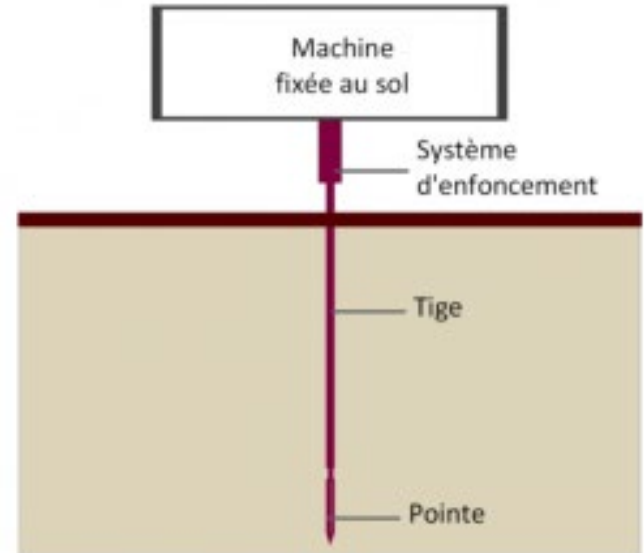




## Pénétromètre statique :

L'épreuve du pénétromètre statique, ou CPT (Cone Penetration Test) est un test conçu pour déterminer la stratigraphie et les propriétés mécaniques d'un sol. Il est effectué sur le site étudié.

Les pénétromètres statiques sont « vérinés » dans les terrains à vitesse lente et régulière. Le test consiste à enfoncer un pieu muni d'un embout conique dans le sol. Pendant l'avancement de la pointe, à une vitesse constante, la résistance à la pénétration et de frottement latéral sont mesurées.



## Pénétromètre dynamique

L'essai au pénétromètre dynamique (SPT Standard Penetration Test) est un sondage géotechnique fournissant les caractéristiques d'un sol.

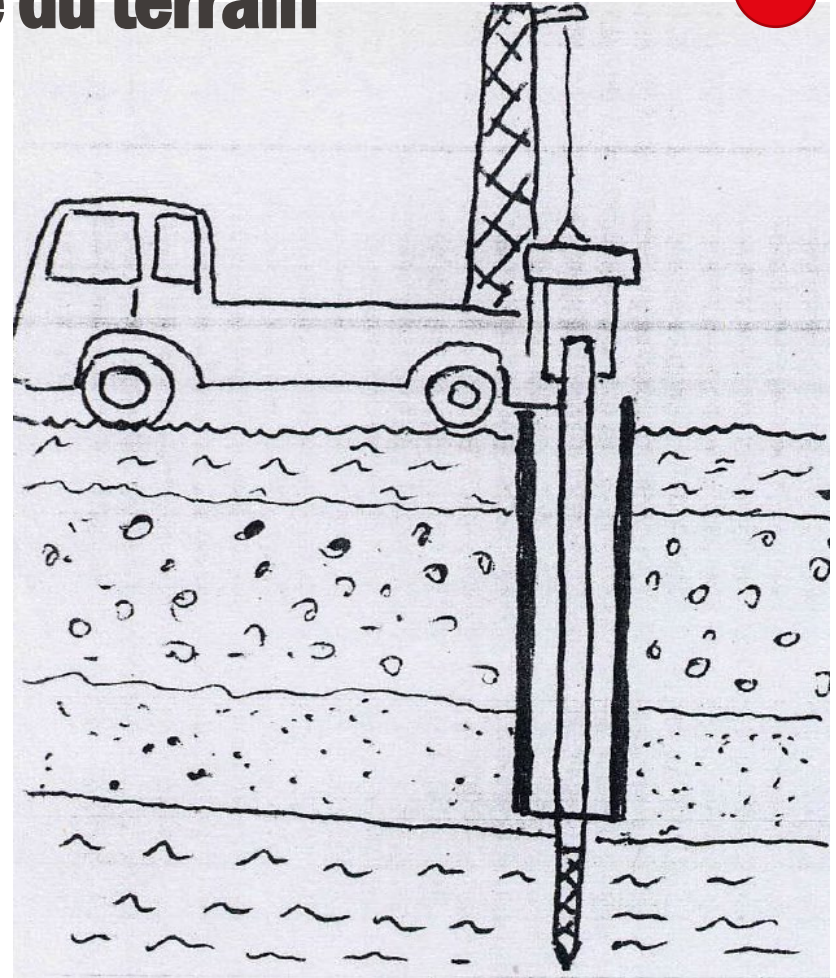
Ce test consiste à faire pénétrer dans le sol un échantillonneur standard (échantillonneur Raymond) sous les coups d'un marteau-pilon d'un poids de 63,5 kg et d'une hauteur de 76 cm [1]. Soit ce marteau, tombant en chute libre sur l'outil échantillonneur, trois mesures sont effectuées en comptant le nombre de coups nécessaire à chaque fois pour l'obtention d'une pénétration de l'outil de 15 cm.

La résistance à la pénétration du sol est définie comme la somme des coups de la deuxième et de la troisième pénétration.

Le test est effectué au fond d'un puits (éventuellement en modifiant le sol aussi peu que possible), creusé à la profondeur désirée.



## Pénétromètre dynamique

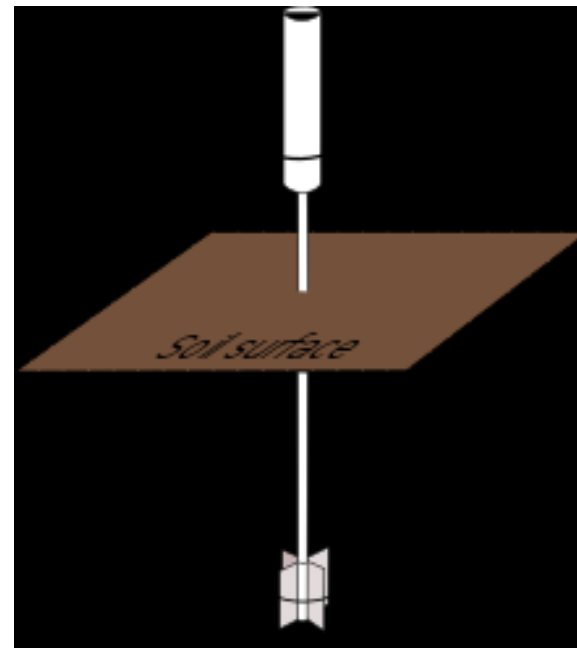




## Essai au scissomètre

L'essai au scissomètre est une méthode de mesure de la résistance au cisaillement d'un sol cohésif.

L'essai est réalisé avec un équipement constitué d'une tige munie de pales qui est insérée dans le sol et qui est mise en rotation. Une jauge au sommet de la tige mesure le couple nécessaire pour provoquer une RUPTURE du sol et permet une conversion en résistance au cisaillement

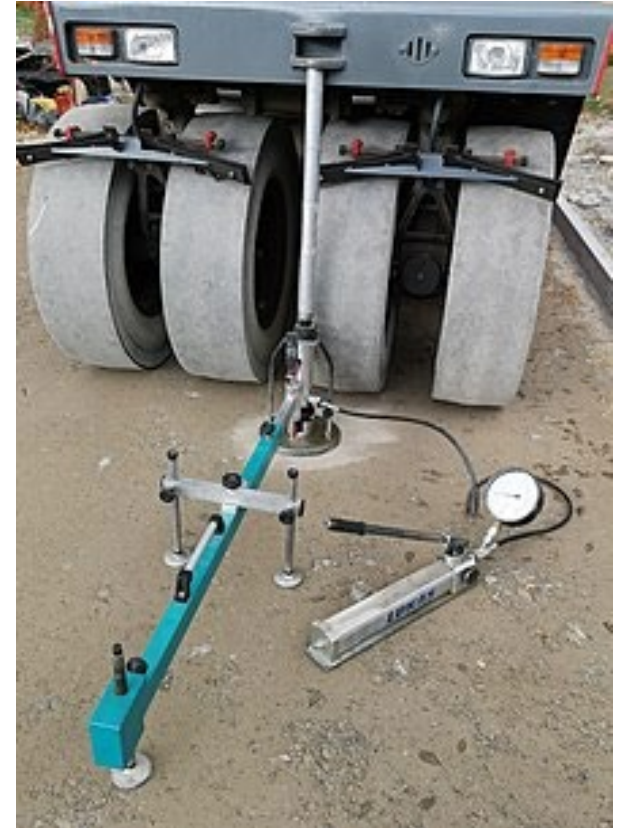




## Essai de plaque :

Un essai de charge sur plaque ou essai de charge statique sur plaque ou encore essai à la plaque est un essai visant à déterminer la résistance à la compression et la capacité portante des sols et des matériaux.

Il sert de preuve de l'aptitude des sols et sous-sols à servir de terrain constructible.





## Essai de perméabilité (essai Lefranc)

L'essai Lefranc est un essai qui permet d'évaluer ponctuellement la perméabilité horizontale d'un terrain aquifère situé au-dessous de la nappe (sol saturé).

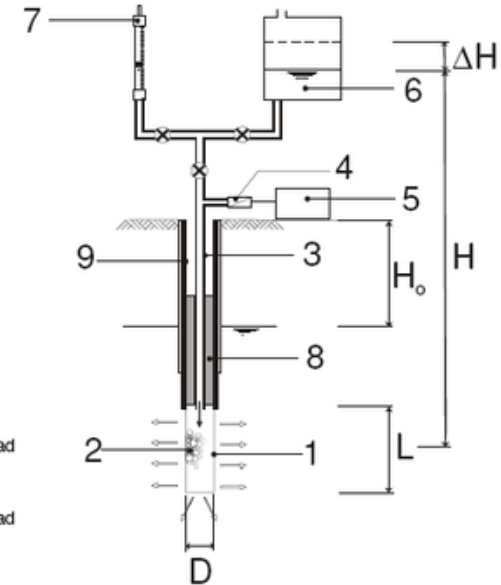
Il consiste à :

- créer une charge différentielle, par rapport à la charge correspondant au niveau initial de la nappe, dans une cavité de dimension connue préalablement réalisée dans le terrain à la base d'un forage et aménagée de telle sorte que la filtration de l'eau engendrée par cette charge différentielle ne se fasse que par les parois de cette cavité.

- mesurer l'évolution dans le temps de cette charge différentielle qui peut être produite soit par le prélèvement, soit par l'apport dans la cavité d'un débit d'eau constant.

### Key

- 1 test section
- 2 test section support system
- 3 measuring tube
- 4 device for measuring pressure or head difference
- 5 pressure measuring unit
- 6 device for applying the pressure or head difference
- 7 burette
- 8 packer
- 9 casing



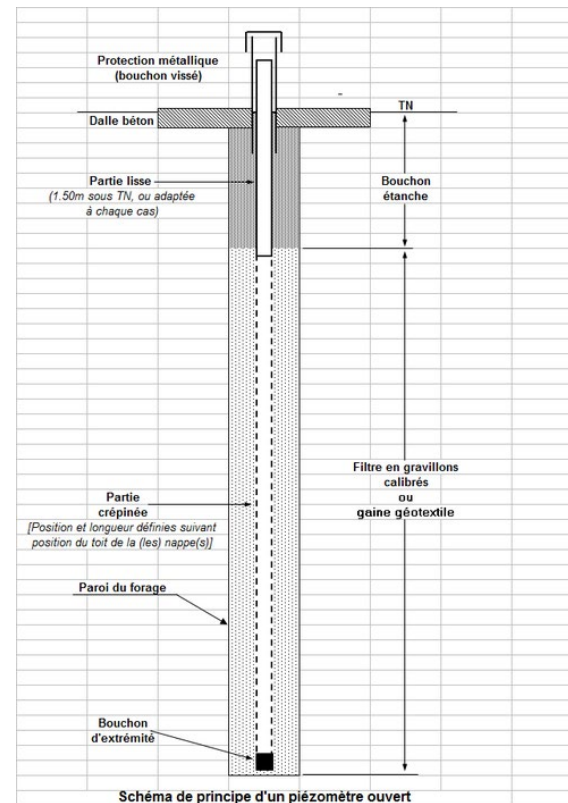


## Piézomètre

C'est un appareil servant à mesurer la pression d'un fluide. En hydrologie : c'est un dispositif servant à mesurer la " hauteur " piézométrique " en un point donné d'un système aquifère, en indiquant la pression en ce point. Il donne l'indication d'un niveau d'eau libre ou d'une pression.

L'opération consiste à :

- placer dans un forage un tube crépiné dans un horizon saturé ;
- mesurer, après stabilisation, la distance entre le toit de l'eau dans le tube et la surface du sol ;
- mesurer la pression hydrostatique en un point du tube.





## Inclinomètre

Le système de mesure inclinométrique sert à déterminer les déplacements (changements d'inclinaison) perpendiculaires à l'axe d'un forage (tube) au moyen d'un grand nombre de points de mesure situés le long de ce dernier.

En pratique, ce système mesure les déformations du sol/rocher encaissant induites par une instabilité de terrain. La position, l'ampleur, la profondeur, la vitesse et la direction d'une zone de glissement peuvent être ainsi définies. Le contrôle et l'observation de fouilles, versants instables, failles sont ainsi facilités.

La sonde est introduite dans un tube inclinométrique guidée par des rainures. Les valeurs sont enregistrées à intervalles réguliers entre 0,3m et 1m. L'exploitation et l'interprétation des données sont effectuées sous forme d'un polygone avec deux axes perpendiculaires (A et B).

La mesure initiale correspond à la position du forage et du tube inclinométrique peu après son installation. La comparaison des mesures suivantes par rapport à la mesure initiale donne la déformation.



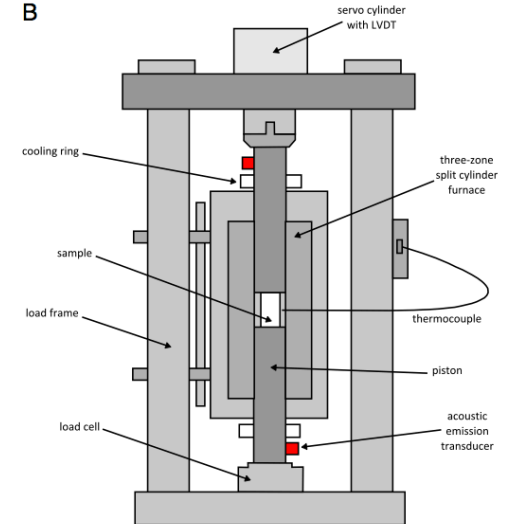
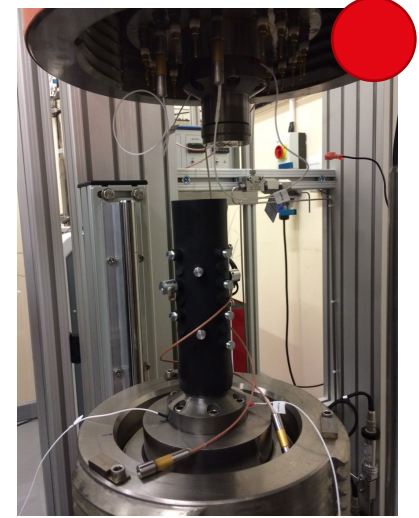
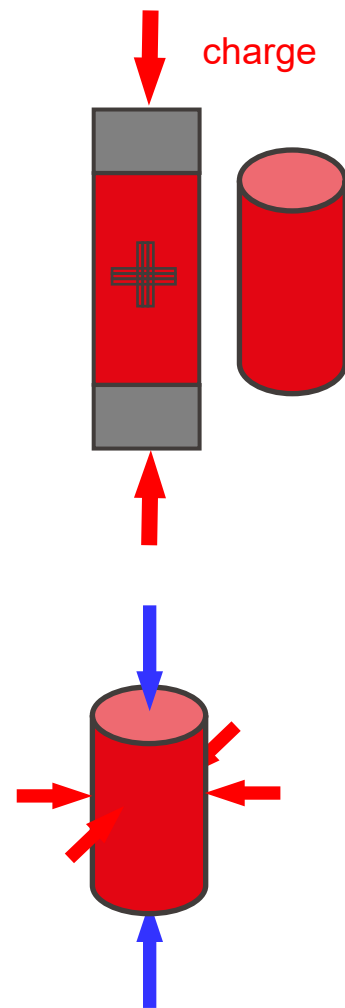


- Télédétection & photo aérienne
- Géophysique de surface
- Géophysique en puits
- Test in situ
- **Mesure au laboratoire**

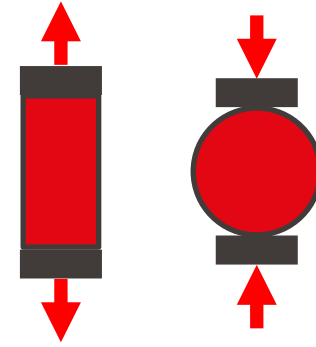
# Test de compression

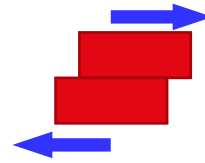
L'essai de compression uniaxiale ou de compression simple consiste à comprimer un échantillon de roche de forme cylindrique entre deux plateaux parallèles d'une presse rigide.

L'essai de compression triaxiale consiste à comprimer un échantillon de roche de forme cylindrique entre deux plateaux parallèles d'une presse rigide et à le confiner radialement avec un fluide, gaz ou solide. Il correspond à ce qu'il se passe en profondeur où la roche est soumise à des contraintes dans toutes les directions (triaxiales).



- La résistance à la traction de la roche peut être obtenue à partir de plusieurs types d'essais:
  - L'essai de traction directe (ou simple)
  - L'essai de traction indirecte (ou brésilien)





Cet essai permet d'évaluer la résistance au cisaillement direct d'un échantillon de roche selon une discontinuité.

L'essai est réalisé sous un effort constant, normal à la surface de discontinuité.

Il peut être réalisé sur tout type de discontinuité : Schistosité, foliation, fracture, contact béton/rocher.





# Autres tests

- Dureté
- Tenacité
- Résistance ponctuelle
- Gonflement
- Abrasivité
- Altérabilité
- Porosité
- Perméabilité
- Vitesse d'onde acoustique



Definition du projet	Activités	Investigations
Définition du projet	Bibliographie	<ul style="list-style-type: none"><li>- Carte topographique</li><li>- Hydrologie,</li><li>- Hydrogéologie</li><li>- Carte géologique régionale</li><li>- Histoire géologique régionale</li><li>- Séismicité,</li><li>- Risques géologiques</li></ul>
	Interprétation de données aériennes et télédétection	<ul style="list-style-type: none"><li>- Photos aériennes</li><li>- Géomorphologie</li><li>- Caractérisation des lithologies et des structures</li><li>- Risque géologique</li><li>- Carte géologique</li></ul>
	Première reconnaissance sur le terrain	<ul style="list-style-type: none"><li>- Identification des sols et roches</li><li>- Identification des failles et structures</li><li>- Hydrologie et drainage</li><li>- Géomorphologie, stabilité des pentes</li><li>- Problème géo-environnemental</li><li>- Accès repérage des sites pour puit et excavation</li></ul>



Definition du projet	Activités	Investigations
Premier «design»	Cartographie géologique 1: 5000; 1:10000	<ul style="list-style-type: none"><li>- Litho-stratigraphie</li><li>- Structure</li><li>- Classification et propriété des matériaux</li></ul>
	Données hydrogéologiques	<ul style="list-style-type: none"><li>- Identification des zones karstic,</li><li>- Identification des zones inondables.</li><li>- Données hydro locales</li></ul>
	Tests préliminaires	<ul style="list-style-type: none"><li>- Puits/ fouille de reconnaissance</li><li>- Prospection géophysique</li><li>- Tests mécaniques en laboratoire</li></ul>



Definition du projet	Activités	Investigations
Design	<ul style="list-style-type: none"><li>- Investigations poussées</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Mesures en puits</li><li>- Mesures in-situ</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cartographie ( 1:500, 1:2000)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cartographie détaillée</li><li>- Classification détaillée</li></ul>



Definition du projet	Activités	Investigations
Construction	<ul style="list-style-type: none"><li>- Validation géotechnique</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Cartographie détaillée pdt excavation</li><li>- Stabilité des excavations, tunnel</li><li>- Vérification et consolidation du sous sol</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>- monitoring et control des structures</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Installation des équipements de monitoring</li><li>- Test in-situ</li><li>- Control qualité</li></ul>



Definition du projet	Activités	Investigations
Opération	- monitoring	- Monitoring de la réponse sol-structure