

# Chapitre 5

## Mesures géophysiques

### Plan

- 5.1 Introduction
- 5.2 Sismique réfraction
- 5.3 Prospection électrique
- 5.4 Radar géologique

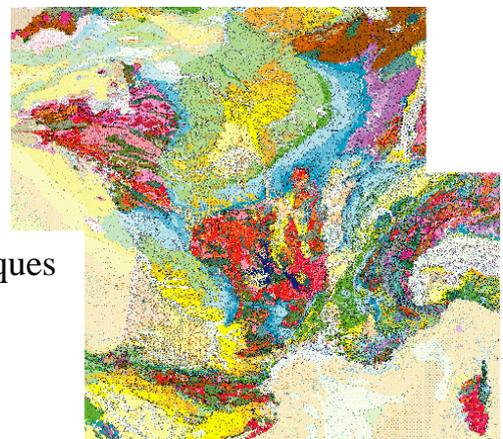
## 5.1 Introduction

- Pour tous les projets de construction  
*connaissance préalable du sol (nature et propriétés)*
- Ouvrages souterrains  
*connaissance d'autant plus importante puisque pas d'accès direct*

⊗ Etude géotechnique  
*Trois types de démarches*

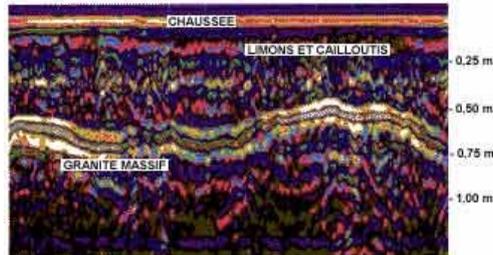


*Exemple : carte géologique*  
→ réalisation de coupes géologiques





- dérivées des méthodes utilisées en prospection minière ou pétrolière
- informations globales sur la nature et la disposition des terrains



- études ponctuelles
- prise d'échantillons de terrains, remaniés ou non
- mesures
  - *in situ* durant la reconnaissance sur le terrain
  - en laboratoire sur les échantillons prélevés
- procédés courants : *puits et tranchées, galeries de reconnaissance, sondages...*



Remarque : et doivent souvent être utilisées conjointement

- Première phase de reconnaissance → avant-projet

Prospection géophysique

- reconnaissance générale du site
- sondages mécaniques
  - les placer au mieux
  - en réduire le nombre

- Seconde phase de reconnaissance → études spécifiques

Prospection géophysique

- résultats quantitatifs pour la mise en forme du projet d'exécution

# Stratégie des reconnaissances

Moyens de reconnaissance à employer en fonction des renseignements recherchés

		NATURE ET GÉOMÉTRIE DES TERRAINS						PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET HYDRAULIQUES					
		NATURE LITHOLOGIQUE	RECHERCHE D'UN HORIZON PORTEUR	RECHERCHE DE LA NAPPE	RECHERCHE DE COUCHES MOLLES	RECHERCHE DE FAILLE	RECHERCHE DE CAVITÉ	CARACTÉRISTIQUES PLASTIQUES	CARACTÉRISTIQUES À LA RUPTURE		TASSEMENT	PERMEABILITÉ	ÉTAT DE FISSURATION (ROCHER)
									FONDATIONS SUPERFICIELLES	FONDATIONS PROFONDES			
MOYENS DE RECONNAISSANCE À METTRE EN ŒUVRE	MÉTODES DIRECTES	SONDAGES, PUIITS ET TRANCHEES (avec prise d'échantillons)	+++	+++	+++	+++	++ si implanté par un géologue	++ ("pêche à la ligne")	+++ (si un essai de laboratoire est pratiqué)	+++	++	+++ (RQD)	
		GALERIE	+++	-	-	-	++	++	-	-	-	+	++
	GÉOPHYSIQUE	SISMIQUE REFRACTION	+	++	+	-	-	-	++ (rocher)	-	-	-	++
		SONDAGE ELECTRIQUE	-	+	++	++	++ (trainé)	-	-	-	-	-	-
		GRAVIMETRIE	-	-	-	-	+	+++	-	-	-	-	-
	ESSAIS HYDRAULIQUES	PIEZOMETRIE	-	-	+++	-	-	-	-	-	-	+	-
		ESSAIS DE POMPAGE ET LEFRANC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++ (sols meubles)	-
		ESSAI LUGEDON	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++ (rocher)	+
	ESSAIS MÉCANIQUES	PENETROMÈTRE DYNAMIQUE	+	+++	+	+++	-	-	+	++	-	-	-
		PENETROMÈTRE STATIQUE	+	++	-	+++	-	-	++	+++	+	-	-
		PRESSIOMETRE	+	-	-	+	-	-	++	++	++	++	-
		SCISSOMETRE	-	-	-	-	-	-	-	++ (sols mous)	++ (sols mous)	-	-
		ESSAIS DE CHARGEMENT	+	-	-	-	-	-	++	+++	-	++	-

FIG. 77. — La stratégie des reconnaissances. Finalités géotechniques et moyens de reconnaissance à mettre en œuvre



## Stratégie des reconnaissances

- Principe des méthodes géophysiques utilisées : méthodes de surface non destructives

Méthode	Principe et paramètre mesuré	Propriété physique	Documents produits	Application
Gravimétrie	Mesure des anomalies de pesanteur.	Densité.	Cartes et profils d'anomalies de Bouguer, résiduelles, transformations, modélisations directes, inversions.	Tout type de cavités. Zones décompressées.
Radar géologique (GPR)	Étude de la propagation des ondes électromagnétiques hautes fréquences (ondes radar, couramment de 20 à 2 500 MHz) et de leur interaction avec les structures du sol.	Permittivité, résistivité.	Radargrammes (sections radar en temps ou en profondeurs). Traitements : déconvolution, migration, filtrage, simulations. Sondages radar (sondages de vitesse).	Réseaux et cuves enterrés. Tout type d'interfaces (couches anthropiques, remblais, sols, roches). Caves, souterrains, karsts.
Méthodes électriques	Mesure de tension résultant de l'injection de courants électriques dans le sol.	Résistivité.	Sondages électriques (log de résistivité 1-D). Panneaux électriques (profils de résistivités 2-D). Simulations, inversions.	Zones humides, altérées, fracturées, polluées. Tout type d'interfaces. Cavités (suivant contrastes).
Méthodes électromagnétiques	Étude de la propagation des ondes électromagnétiques et de leur interaction avec les structures du sol. <ul style="list-style-type: none"> <li>Méthodes basses fréquences : Régime de diffusion (phénomènes de conduction), Méthodes VLF, EM34, etc.</li> <li>Méthodes hautes fréquences : Régime de propagation (phénomènes de polarisation), Méthode radar.</li> </ul>	Diffusion : résistivité. Propagation : Permittivité.	Profils et carte de résistivités apparentes, de déphasage. Simulations.	Zones humides, altérées, fracturées, polluées. Tout type d'interfaces. Cavités (cf. rapport C. Fauchard - LCPC).
Polarisation Spontanée (PS)	Détection des phénomènes d'électrofiltration (mesure de la différence de potentiel apparaissant spontanément entre deux points lorsqu'un fluide électrolytique circule dans la porosité d'une roche sous l'effet d'une différence de pression hydrostatique).	Potentiels PS : potentiels de flux, électro-chimiques ou thermo-électrique.	Profils et cartes du potentiel électrique.	Circulation d'eau dans les milieux poreux : poches de sable, fossés, murs, remblais. Zones de drainage vers des cavités ou des puits de mine, karsts.
Sismique réfraction	Étude de la propagation des ondes réfractées.	Vitesse sismique.	Coupes, anomalies de retard.	Variations de profondeur des terrains (substratum), lois de vitesse.
Sismique réflexion	Étude de la propagation des ondes réfléchies.	Vitesse sismique.	Sections sismiques.	Interfaces sédimentaires, hétérogénéités (y compris cavités).
Sismique en ondes de surface (SASW)	Étude de la dispersion des ondes de surface.	Vitesse sismique, dispersion.	Sections sismiques Courbes de dispersion	Interfaces sédimentaires, hétérogénéités (y compris cavités). Caractéristiques mécaniques des sols et des roches.
Méthode magnétique	Mesures des anomalies du champ magnétique terrestre.	Aimantation, susceptibilités.	Profils et cartes du champ magnétique, résiduelle, réduction au pôle, etc. Simulations.	Cavités, puits et forages à structure métallique. Cavités dans un encaissant magnétique.
Résonance magnétique protonique (RMP)	Détection directe de la présence ou de l'absence d'eau souterraine.	Transmissivité RMP.	Sondage RMP.	Nappe superficielle de l'épikarst. Conduits karstiques enoyés (?).

- Effets perturbateurs affectant les différentes méthodes.

Méthodes Effet perturbateur	Gravimétrie	Géoradar	Sismique	Électrique	EM
Bâtiment, cave, cuve enterrée, superstructure	Effets quantifiables, corrections possibles	Pas d'effets, sauf interférences possibles avec champs électromagnétiques	Pas d'effets	Pas d'effets, sauf ceux éventuellement liés aux alimentations électriques et télécommunications	Pas d'effets, sauf ceux liés aux alimentations électriques et télécommunications
Canalisation non métallique	Effet généralement inférieur à l'incertitude de mesure pour les diamètres courants*	Effet de masque possible, nécessité de connaître le plan des réseaux	Pas d'effets	Pas d'effets	Pas d'effets
Conduite métallique	Effet généralement inférieur à l'incertitude de mesure	Effet de masque possible, nécessité de connaître le plan des réseaux	Pas d'effets	Effet important, nécessité de connaître le plan des réseaux	Effet important, nécessité de connaître le plan des réseaux.
Réseaux téléphoniques et électriques (porteurs de signaux)	Effet généralement inférieur à l'incertitude de mesure	Interférences avec champs électromagnétiques. Adapter les fréquences	Pas d'effets	Pratiquement sans effets	Effet faible à modéré en EM fréquentiel Effet important en EM transitoire
Hétérogénéité des revêtements et sol, présence de béton et asphalte	Effets possibles, difficiles à évaluer et à contrôler	Effet atténuant si sols conducteur. Décaper les sols	Peu d'effets (problèmes de couplage géophone : sol)	Peu d'effets, Inutilisable sur bétons et asphaltes	Peu d'effets
Terrains de surface meubles ou instables	Augmente l'incertitude de mesure, effet quantifiable par statistiques des reprises	Pas d'effets	Problèmes de couplage, possibilité d'ancrage dans le sol	Pas d'effets	Pas d'effets
Vent + présence d'arbres, Microsismicité vibrations urbaines et industrielles	Augmente l'incertitude de mesure, nécessité d'augmenter la durée de mesure, quantifiable par reprises	Pas d'effets	Sensible aux vibrations : sélection et filtrage des traces au traitement	Pas d'effets	Pas d'effets
Trafic automobile et ferroviaire	Augmente l'incertitude de mesure, quantifiable par reprises, Partiellement évitable	Interférences possibles avec champs électromagnétiques. Adapter les fréquences	Sensible aux forts niveaux de vibrations	Effet important, Partiellement évitable	Effet important, Partiellement évitable.
Variations hydrologiques et de saturation des sols	Peut limiter la répétitivité des mesures sur sols et roches à forte porosité ?	Peut limiter la répétitivité des mesures ? L'humidité limite la profondeur de pénétration	Peut limiter la répétitivité des mesures	Peut limiter la répétitivité des mesures et affecter les interprétations quantitatives ? Pénétration difficile sur sols secs	Peut limiter la répétitivité des mesures et affecter les interprétations quantitatives ? Présence d'eau limite la profondeur de pénétration
Variations d'altitude des stations et topographie proche	L'altitude doit être mesurée avec une précision centimétrique. Les effets des variations de l'altitude des stations et de la topographie doivent être corrigés	Effet ignoré	Effet contrôlable par adaptation du dispositif, corrections statiques	Doit être corrigé lorsqu'il s'avère important	Doit être corrigé lorsqu'il s'avère important
Effets des variations de latitude	Doivent être corrigés	Pas d'effets	Pas d'effets	Pas d'effets	Pas d'effets
Variabilité latérale des structures cibles	Préférer cartes à profils, interprétation 3D possible	Profils sériés et présentation des résultats sur carte	Privilégier profils sériés et présentation des résultats sur carte	Privilégier profils sériés et présentation des résultats sur carte	Privilégier profils sériés et présentation des résultats sur carte
Effets luni-solaires (marées)	Doivent être corrigés avec une grande précision	Pas d'effets	Pas d'effets	Pas d'effets	Pas d'effets
Dérive instrumentale	Doit être mesurée et corrigée avec précision par de fréquents retours à la base	Pas d'effets	Pas d'effets	Pas d'effets	Pas d'effets

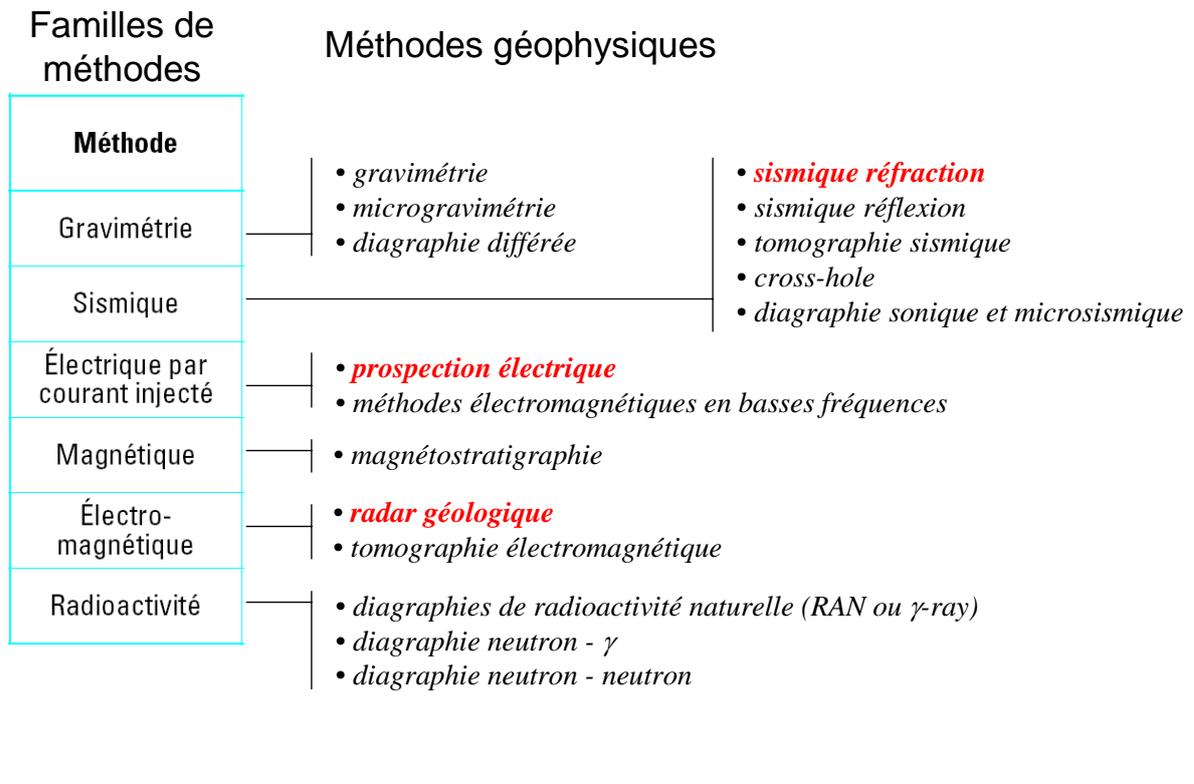
## 5.1 Introduction

### Les principales méthodes géophysiques

#### *Géophysique appliquée*

- Discipline qui consiste à étudier (observer, mesurer) un champ physique à la surface du sol ou dans des cavités creusées dans le sol.
- Ce champ physique (origine naturelle ou provoquée), dépend d'un ou plusieurs paramètres caractéristiques des matériaux dont on cherche à déterminer la répartition dans le terrain.

Méthode	Grandeur mesurée	Paramètre	Origine du champ physique
Gravimétrie	Champ de pesanteur	Masse volumique	Naturelle
Sismique	Temps de trajet	Vitesse d'ondes mécaniques	Provoquée
Électrique par courant injecté	Potentiel électrique	Résistivité	Provoquée
Magnétique	Champ magnétique	Susceptibilité magnétique	Naturelle
Électro-magnétique	Champ électro-magnétique	Résistivité et permittivité	Provoquée
Radioactivité	Événements	Radioactivité des roches	Naturelle ou provoquée



### ⊗ Les méthodes sismiques

- Fondées sur l'étude de la propagation des ondes mécaniques dans le sol
- Vitesse de propagation des ondes → dépend des propriétés élastiques des matériaux
- Types d'ondes
  - ondes P (de compression ou longitudinales) → **plus rapides**
  - ondes S (de cisaillement ou transversales)
  - ondes de surface (ondes de Rayleigh ou ondes de Love)

★ Ces ondes obéissent aux lois de l'optique et sont en particulier sujettes à des réflexions et à des réfractions

- Vitesses des ondes P et S

dans les solides et les liquides

$\rho$  est la masse spécifique

$\mu$  et  $\lambda$  sont les coefficients de Lamé

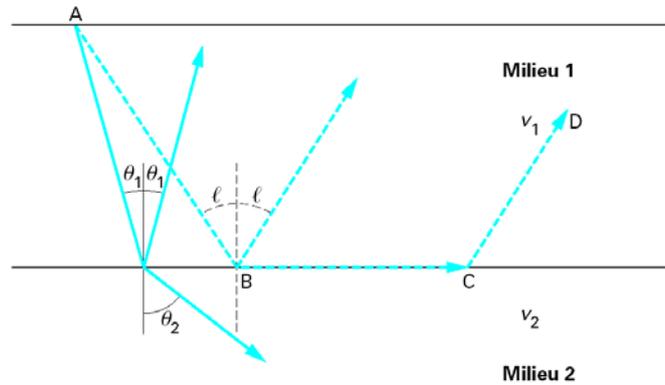
dans les solides seulement

Lorsqu'une onde plane tombe sur la surface de séparation de deux milieux, il se produit une réflexion et une réfraction

Exploitation des ondes réfléchies

### ➤ Sismique réflexion

- *prospection pétrolière*
- *tunnels en profondeur*



Exploitation des ondes réfractées

### ➤ Sismique réfraction

- *géométrie des premières couches du sous-sol*
- *valeur de la vitesse des ondes P dans ces couches*

quelques dizaines de mètres de profondeur au maximum

indications sur les propriétés géotechniques des matériaux :  
degré d'altération, aptitude au terrassement...

## 5.2 Sismique réfraction

### ⊗ Mise en œuvre de la sismique réfraction

#### • émetteur d'ondes

- *faible charge de dynamite*
- *chute de poids*
- *coup de marteau*



#### • récepteurs d'ondes (géophones)



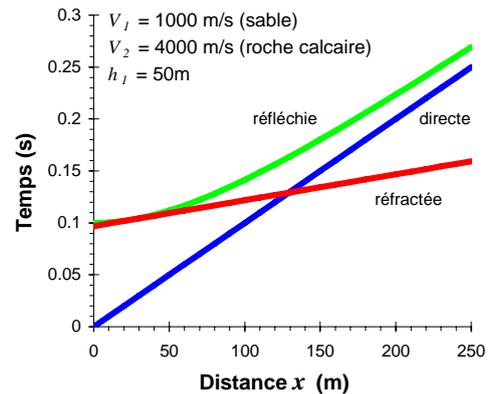
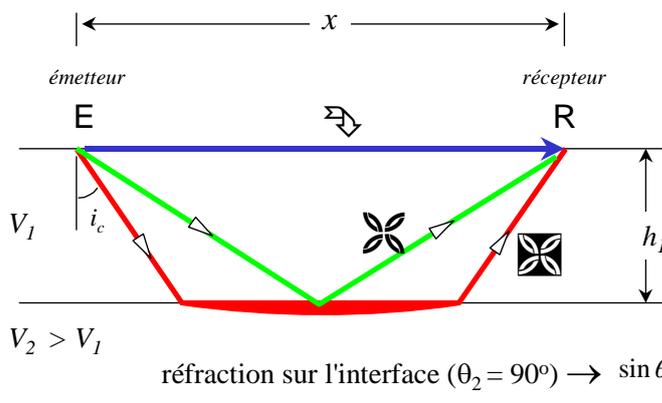
### ⊗ Sismique réfraction : propagation des ondes

↘ **ondes directes** ——— temps de propagation ( $t$ ) ———  $t = \frac{x}{V_1}$

✿ **ondes réfléchies** ———  $t = \frac{\sqrt{x^2 + 4h_1^2}}{V_1}$

⊠ **ondes réfractées** ———  $t = \frac{2h_1 \cos \theta_c}{V_1} + \frac{x}{V_2}$

PO IC - Géologie de l'ingénieur



### ⊗ Sismique réfraction : renseignements fournis

- vitesses caractéristiques des familles de roches

*meuble - compact*  
*sec - saturé*

- limites de rippabilité

Pour les travaux de terrassement, les coûts dépendent des procédés utilisés

terrassement | - à la lame en sol meuble  
| - après défonçage (ripper)  
| - après abattage à l'explosif

Domaines de rippabilité définis à partir de la valeur de la vitesse pour un sol donné

Exemple : 1<sup>ère</sup> tables Caterpillar en 1958 indiquant que le granite défonçable par tracteur de 390 cv, si vitesse comprise entre 800 et 1700 m/s

Type de sol	Vitesse des ondes (m/s)
Terre végétale	200 à 500
Roches meubles sèches	
<i>sable et gravier</i>	200 à 1000
<i>cailloutis</i>	500 à 1500
Roches meubles saturées d'eau	
<i>sable et gravier</i>	1000 à 2000
<i>cailloutis</i>	1500 à 2500
<i>limon</i>	1000 à 2000
<i>argile</i>	1800 à 2500
<i>marne</i>	2500 à 3000
Roches dures, tenaces	
<i>calcaire</i>	3000 à 4000
<i>craie</i>	2000 à 3500
<i>grès</i>	2000 à 4000
<i>schistes et micaschistes</i>	1500 à 3000
<i>gneiss et quartzite</i>	3000 à 5000
<i>granite</i>	5000 à 6000
<i>basalte</i>	4000 à 5000
<i>diabase</i>	5500 à 6500

**TABLEAU**

Les valeurs les plus basses (500 m/s) correspondent aux matériaux très altérés de surface, les valeurs les plus fortes (6 000 m/s) à du rocher très sain et non fracturé. Pour mémoire, la vitesse du son dans l'air est d'environ 340 m/s, dans l'eau elle vaut 1 425 m/s.

PO IC - Géologie de l'ingénieur

## Domaines de rippabilité

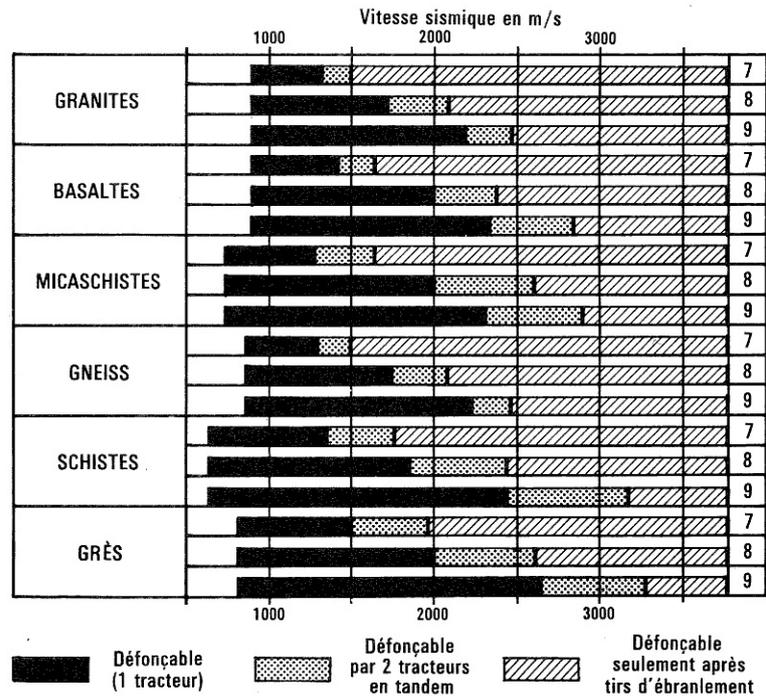


Fig. I-22. — EXTRAIT DES TABLES DE DÉFONCEMENT POUR RIPPERS CATERPILLAR

7 : ripper 7-B (1 dent, 185 CV); 8 : ripper 8-B (1 dent, 280 CV); 9 : ripper 9-B (1 dent, 390 CV) (d'après documentation CATERPILLAR, 1966).

## Sismique réfraction : renseignements fournis

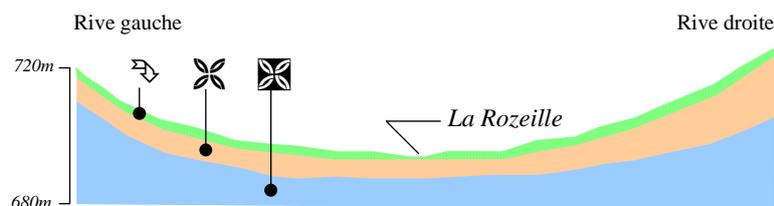
## • épaisseur de couche

- jusqu'à 4 ou 5 couches
- exemple : recherche d'un substratum rocheux sous une couche d'alluvions ou sous une couche altérée

La profondeur d'investigation dépend de la longueur des dispositifs de mesures (distance source-captteur) mis en œuvre ; elle est en génie civil généralement inférieure à 20 m pour des dispositifs de moins de 200 m.

## Barrage de Magnat l'Etrange (Creuse)

Reconnaissance de l'épaisseur de granite altéré situé sous le revêtement meuble et sur le massif rocheux de granite sain



Sol 1 : couche de sol meuble	V = 500 m/s
Sol 2 : granite altéré	V = 2000 m/s
Sol 3 : granite sain	V = 4350 m/s

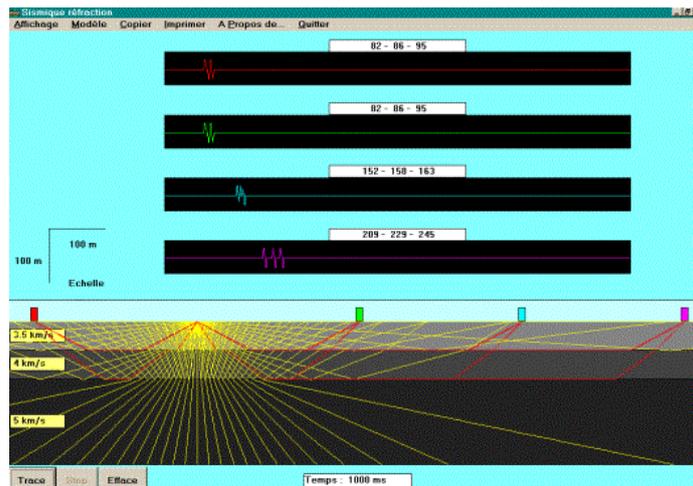
## Mesures

- 7m en rive gauche
- 15m en rive droite
- 5m sous la rivière

### ⊗ Sismique réfraction : *facteurs compliquant l'interprétation des mesures*

- irrégularités des interfaces (inclinaisons)
- présence d'hétérogénéités (gros blocs, canalisations)
- couche superficielle de terre végétale (amortissement du signal)

### ⊗ Exemple de propagation des ondes : *logiciel sisrefr*



## 5.3 Prospection électrique

Matériaux du sous-sol → conducteurs de l'électricité

- Conductivité ( $\sigma$  en siemens par mètre (S/m))
- Résistivité ( $\rho$ ) : inverse de la conductivité (en ohms-mètres ( $\Omega.m$ ))

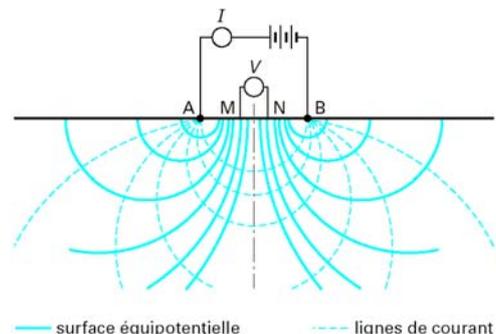
✦ Plus  $\rho$  est faible, plus le matériau est conducteur

Méthodes de prospection électriques → mesure de la résistivité

- Injection dans le sol d'un courant continu
- Mesure de l'intensité  $I$  entre A et B (mA)
- Mesure de la différence de potentiel entre M et N (mV) } 2 séries de 2 électrodes plantées dans le sol

### **Dispositif ABMN**

$\rho_a$  : résistivité apparente ( $\Omega.m$ )  
 $k$  : facteur géométrique (m)



La résistivité peut prendre des valeurs qui couvrent plusieurs ordres de grandeur, de quelques ohms-mètres pour des terrains très argileux et très humides à plusieurs dizaines de milliers d'ohms-mètres pour des matériaux rocheux très sains, en passant par toutes les valeurs intermédiaires.

### ⊗ Dispositif ABMN : trois mises en œuvre

- Sondage électrique

- variation de  $\rho$  en fonction de la profondeur  $\longrightarrow$  épaisseur des couches
- longueurs croissantes du dispositif ABMN
- structure tabulaire seulement  $\longrightarrow$  pas de variations de la résistivité dans les directions horizontales

- Traîné de résistivité

- carte des résistivités électriques superficielles
- déplacement du dispositif ABMN (dimensions constantes)

✦ Panneaux électriques :

- Diagraphie

- dispositif ABMN placé sur une sonde descendue dans un forage
- variation de la résistivité des terrains traversés par le forage, en fonction de la profondeur

### ⊗ Sondage électrique

#### Principaux dispositifs

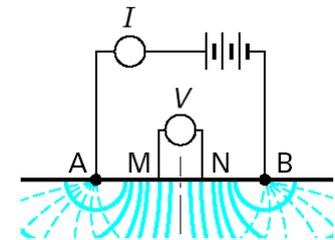
Géométrie du quadripôle ABMN symétriques (quatre électrodes alignées)

- le dispositif Wenner :

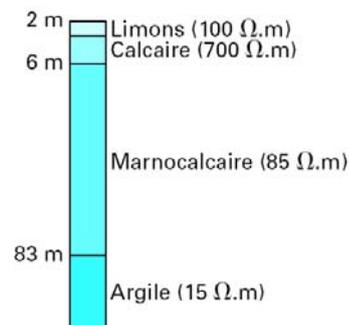
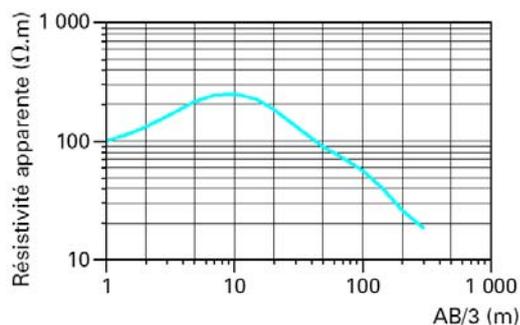
$$AM = MN = NB = a \longrightarrow k = 2\pi a$$

- le dispositif Schlumberger :

$$MN \ll AM \longrightarrow k = \frac{\pi AB^2}{4MN}$$



$$k = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$



## ⊗ Sondage électrique

- Applications

- position des interfaces
- profondeur de discontinuités
- étudier la fracturation
- épaisseur d'altération
- épaisseur d'un matériau de recouvrement ou du matériau stérile avant exploitation d'une carrière
- épaisseur d'une couche de gravier ou de sable entre une couche altérée de surface et un substratum rocheux

- Conditions nécessaires

- contraste de résistivité
- faibles variations latérales de résistivité
- étalonnage des mesures (à partir de sondage mécanique)
- conditions de mesure : mesure de potentiel aussi peu perturbée que possible par les courants circulant dans le sol au voisinage des installations urbaines et industrielles

## ⊗ Exemple : interprétation d'un bicouche

- Des abaques permettent de déterminer la profondeur  $h$  séparant deux terrains à partir de la variation de la résistivité et de la distance AB.
- Les valeurs de résistivité dépendent pour une grande part de la quantité et de la qualité de l'eau qu'ils renferment.

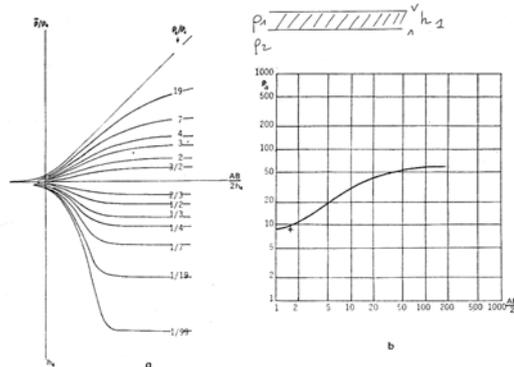


FIG. 58. — Interprétation du bicouche  
 a) abaque théorique  
 b) courbe expérimentale, l'exemple présenté correspond à  
 $h_1 = 1,6 \text{ m}$ ;  $\rho_1 = 8,5 \Omega\text{m}$ ;  $\rho_2 = 7\rho_1 = 60 \Omega\text{m}$ ,

Résistivité ( $\Omega\cdot\text{m}$ )	Nature de la roche
plusieurs milliers	Roches cristallines
500 - 10000	Grès
30 - 10000	Sables
100 - 5000	Calcaires
100 - 300	Craie
40 - 250	Schistes
4 - 30	Argiles - Marnes

## ⊗ Traîné de résistivité, panneaux électriques

↪ combinaison des techniques de traîné et de sondage

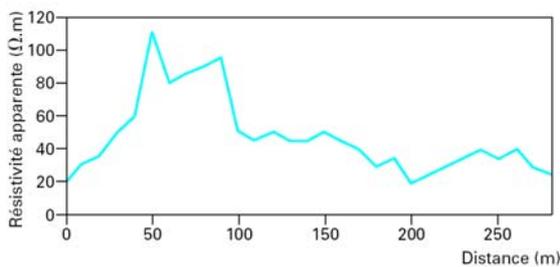
- Variations de l'épaisseur et des propriétés du terrain de recouvrement
- Zone d'altération
- Gisements de matériaux

↪ cartographie géologique, en précisant la position des contacts lithologiques ou tectoniques

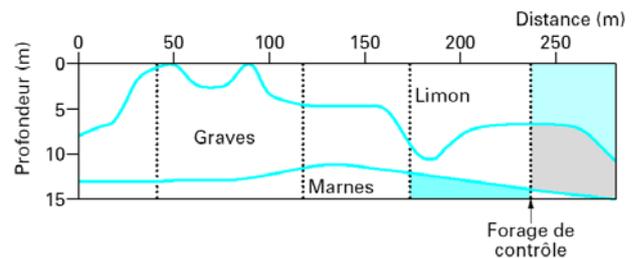
✦ Lorsque A et B sont proches, le courant circule dans la partie superficielle du sol de résistivité  $\rho_1$ .

Plus on agrandit la distance AB, plus le courant électrique va profondément et est susceptible de traverser un deuxième terrain de résistivité différente ( $\rho_2$ ).

On obtient alors un graphe de la résistivité en fonction de AB.



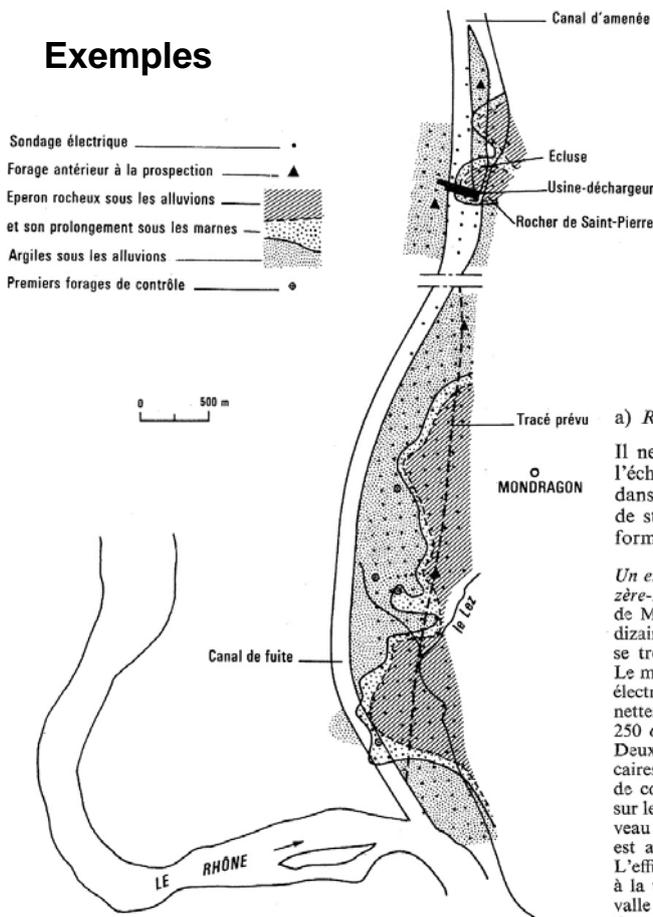
(a) profil (traîné de résistivité apparente par courant continu)



(b) coupe du sous-sol

PO IC - Géologie de l'ingénieur

## Exemples



- 1- Canal de fuite
- 2- Zone tourbeuse
- 3- Glissement Alpes

### a) Recherche de structures cachées

Il ne s'agit pas ici de la reconnaissance de grandes structures géologiques à l'échelle régionale dont ont besoin, par exemple, la prospection pétrolière et, dans certains cas, la prospection minière, mais seulement de la recherche de structures de détail avec, si possible, détermination concomitante de leur forme, de leurs dimensions et de leur position par rapport au sol.

Un exemple classique d'application de la méthode électrique : l'aménagement de Donzère-Mondragon sur le Rhône (fig. 1-12). — Un sondage mécanique rencontre près de Mondragon, sur le tracé du canal de fuite, les grès calcaires du Turonien à une dizaine de mètres sous les alluvions de la plaine du Rhône. Le radier du canal devant se trouver à une cote inférieure, l'excavation risquait d'être difficile et coûteuse. Le maître de l'œuvre décide une campagne de prospection géophysique. La méthode électrique convient parfaitement, les résistivités des diverses formations étant assez nettement différenciées (limons de surface : 25-30  $\omega \cdot m$ ; alluvions sablo-graveleuses : 250  $\omega \cdot m$ ; argiles bleues plaisanciennes : 30  $\omega \cdot m$ ; grès calcaires : 45 à 90  $\omega \cdot m$ ). Deux cents sondages électriques permettent de délimiter l'extension des grès calcaires sous les alluvions, puis sous les argiles bleues. Des sondages mécaniques de contrôle confirment les résultats de la prospection électrique (erreur moyenne sur les estimations de l'épaisseur de recouvrement : 10 %). En conséquence, un nouveau tracé du canal de fuite, passant à l'ouest de l'éperon rocheux sous-alluvial, est adopté.

L'efficacité de la méthode étant ainsi démontrée, il est décidé d'étendre la prospection à la totalité du tracé. Cette nouvelle campagne amène la découverte, dans l'intervalle de deux sondages mécaniques qui n'avaient pas révélé sa présence, d'un éperon de calcaires crétacés dit « rocher de Saint-Pierre », masqué par 10 m d'alluvions seulement. Ce haut-fond providentiel devait constituer un emplacement idéal pour fonder la centrale André Blondel et l'écluse.

Fig. 1-12. — PROSPECTION GÉOPHYSIQUE : CANAL DE DONZÈRE-MONDRAGON  
Intervention de la méthode électrique dans le choix du tracé du canal de fuite (document C.G.G.).

Étude d'une zone tourbeuse sur un tracé d'autoroute (BERTRAND, 1967). — Des sondages électriques ont révélé, de part et d'autre d'un affleurement rocheux, dans des secteurs où le bed-rock est déprimé (profils reconnus par sismique-réfraction), l'existence d'une couche très conductrice, identifiée comme étant de la tourbe par les sondages mécaniques de contrôle. Des sondages électriques complémentaires ont permis de délimiter la zone tourbeuse en extension et en puissance (fig. 1-21); de plus, grâce au calcul des valeurs  $h/\rho = h \cdot \sigma$  de la couche tourbeuse, on a pu avoir une idée des risques de tassement, l'amplitude de ces derniers étant proportionnelle à l'épaisseur  $h$  de la couche et à sa conductivité  $\sigma$ .

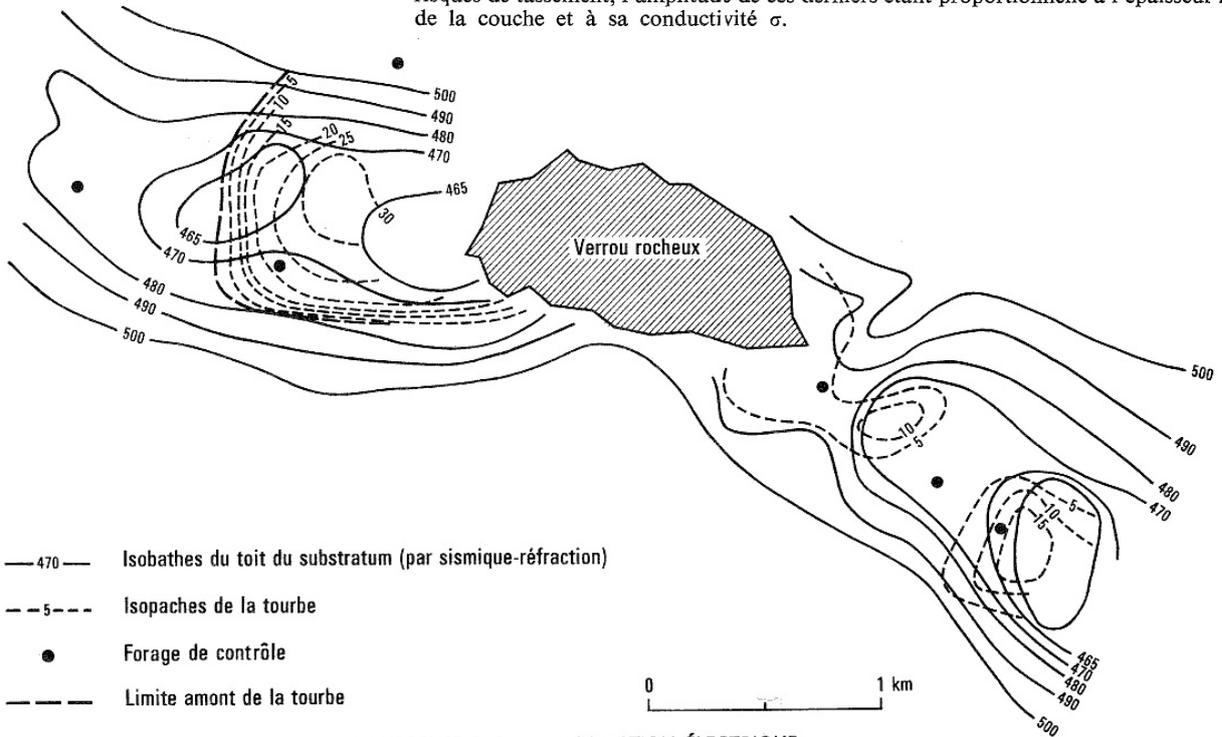


Fig. 1-21. — LOCALISATION D'UNE ZONE TOURBEUSE PAR LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE (d'après BERTRAND, 1967)

### Utilisation de 2 techniques en parallèle

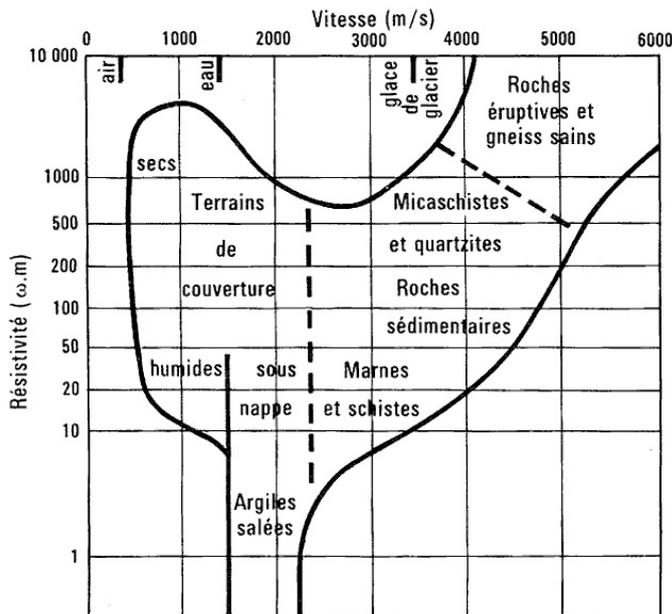


Fig. 1-11

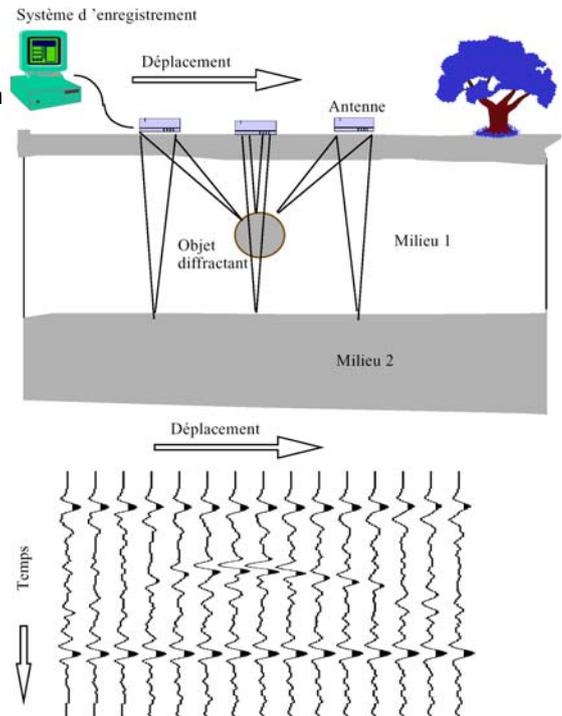
GRAPHIQUE DE LA SITUATION DES ROCHES COURANTES AU REGARD DES DEUX PARAMÈTRES GÉOPHYSIQUES LES PLUS UTILISÉS

Le domaine occupé par chacune d'entre elles est défini en abscisses par une gamme de vitesses sismiques (ondes longitudinales) et en ordonnées par une gamme de résistivités. Aucune limite franche ne peut être tracée entre les diverses catégories pétrographiques (d'après DUFFAUT, 1967).

## Principe

- Une antenne envoie à cadence élevée des ondes électromagnétiques dans le terrain sous la forme d'une impulsion de très courte durée. Les ondes sont captées après propagation dans le matériau ausculté et réflexion sur les cibles constituées par les discontinuités entre les différents milieux physiques. Ces cibles peuvent être par exemple : des cavités, des interfaces entre deux milieux différents, des armatures métalliques...
- L'antenne émettrice-réceptrice est déplacée à vitesse lente et régulière le long de la surface à ausculter (sol, paroi,...). La coupe temps ainsi obtenue est transformée en coupe profondeur après détermination de la vitesse de propagation caractéristique du milieu. Celle-ci est une fraction de la vitesse de la lumière dans le vide et dépend de la constante diélectrique relative du matériau.
- Le choix de la fréquence de travail détermine en partie la résolution et la profondeur d'investigation. En effet, la résolution en profondeur la plus fine (distance minimale entre deux anomalies susceptibles d'être décelées) est obtenue pour les plus hautes fréquences.

## 5.4 Radar géologique

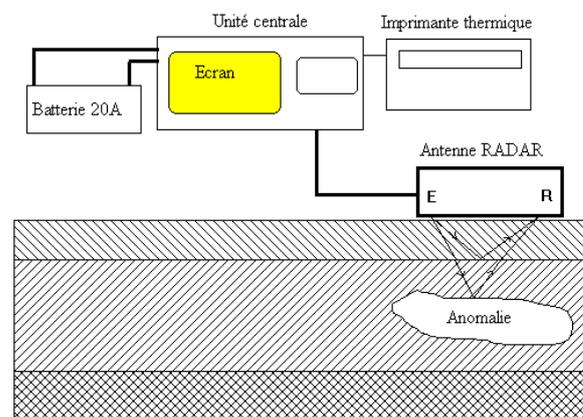
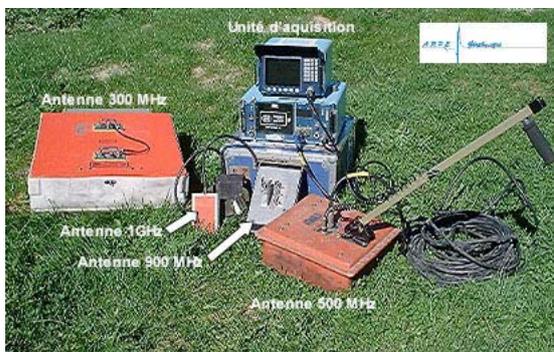


## 5.4 Radar géologique

### Matériel

L'équipement complet comprend :

- une unité centrale de commande comportant un écran de visualisation couleur,
- une imprimante thermique,
- une antenne (40, 70, 400, 900 MHz, 1,5 GHz ou autres)
- un logiciel pour le traitement des données et l'édition des résultats.



### 🌀 Résultats fournis

Fréquence (MHz)	Profondeur (m)	Applications
40	15-20	Géologie
70	10-15	Géologie, géotechnique
400	0-5	Génie Civil, réseaux enterrés, Archéologie
900	0-1	Chaussée, structures en béton
1500	0-0,3	Chaussée, structures en béton

Le radar géologique sert surtout à détecter les réseaux (câbles, canalisations) enterrés, mais ses applications peuvent être variées : préciser la géologie superficielle, étudier la fracturation, détecter les cavités souterraines à faible profondeur. C'est un outil de contrôle non destructif des ouvrages (chaussées, pistes d'aéroports, ouvrages en béton, soutènements de tunnels). C'est une des meilleures techniques pour la géophysique en site urbain.

Fondé sur la propagation des ondes électromagnétiques dans les matériaux à des fréquences variant de quelques dizaines de mégahertz à 3 GHz, le radar géologique ne peut être efficace que si les ondes ne sont pas absorbées trop vite par les matériaux. Ceux-ci doivent donc être aussi peu conducteurs de l'électricité que possible. Plus le matériau est électriquement résistant, plus les ondes se propagent facilement et plus la profondeur d'investigation est importante. En pratique on considère que si la résistivité est inférieure à  $100 \Omega \cdot m$ , l'utilisation du radar géologique devient aléatoire. Elle est impossible dans les matériaux de résistivité inférieure à  $50 \Omega \cdot m$ . Ceci exclut l'emploi du radar géologique dans les sous-sols argileux.

Naturellement, les phénomènes que l'on désire mettre en évidence doivent être caractérisés par un contraste de propriétés électromagnétiques (constante diélectrique, permittivité magnétique).

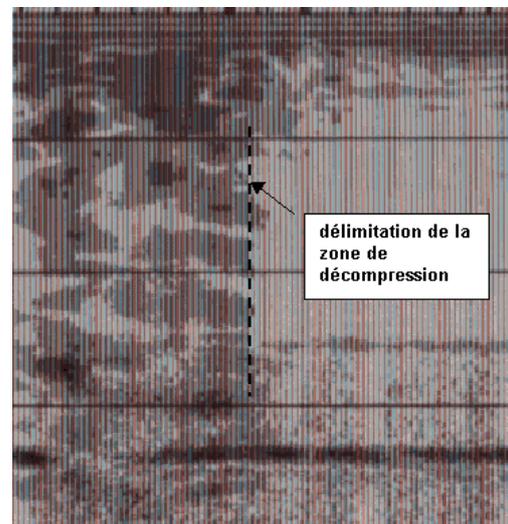
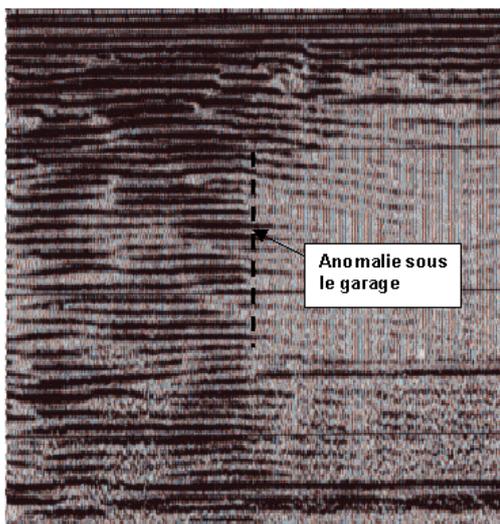
La **profondeur d'investigation** est de quelques mètres. Elle dépend des fréquences (plus la fréquence est basse, plus grande est la profondeur d'investigation) et des propriétés d'absorption du matériau. L'augmentation de la profondeur d'investigation se fait aux dépens de la résolution. À titre d'exemple la profondeur d'investigation peut être nulle dans un sol argileux, de plusieurs dizaines de mètres dans la glace ou des sables très secs.

### 🌀 Applications du radar basse fréquence

- Présence de vides

*Vide dans une craie entre 6 et 14 m de profondeur (ancienne carrière souterraine de grande hauteur)*

*Le même signal filtré par traitement numérique ; la silhouette de la paroi verticale délimitant la cavité apparaît clairement*



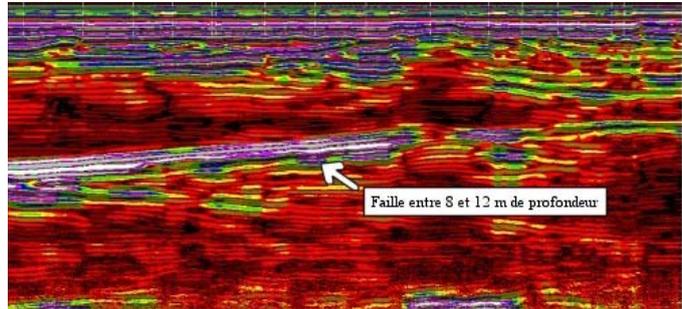
signal brut - zone décompressée sous un garage

signal filtré

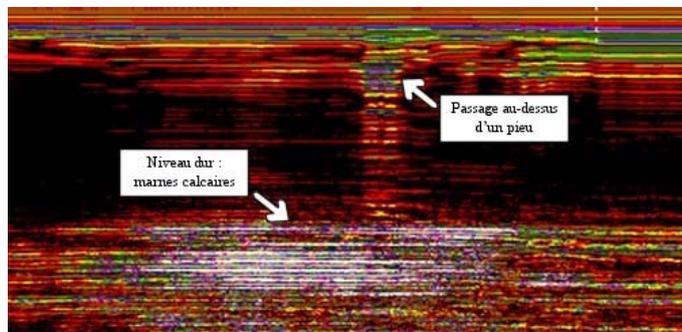
## Applications du radar basse fréquence

- Localisation d'une faille sur paroi verticale

*Faille d'une épaisseur voisine de 1 mètre entre 8 et 12 mètres de profondeur*



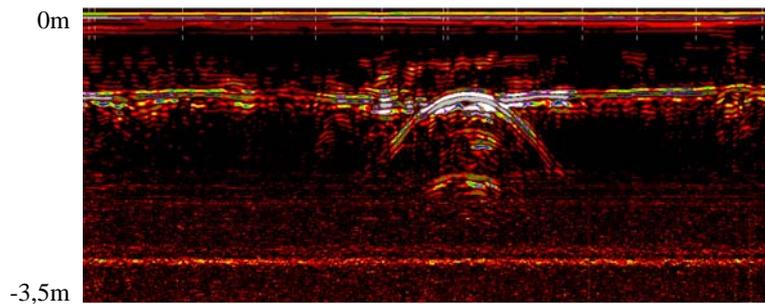
- Longueur de fondations profondes et position de leur encastrement



## Applications du radar moyenne fréquence

- Recherche et localisation de réseaux enterrés

*Conduite de 600 mm en acier à 1 m de profondeur, et nappe à 3 m de profondeur*



- Mise en évidence d'un mur enterré

*Recherche de murs anciens près du Grand Palais (Ville de Paris)  
Présence d'un mur de séparation (sommet à 1,60 m et fond à 4 m de profondeur)*

