

ESSAIS CROSS-HOLE

L'objectif des essais Cross-Hole est de déterminer les modules dynamiques des diverses couches du sous-sol. Pour cela, on doit déterminer les vitesses des ondes sismiques de compression, ou ondes P, et de cisaillement, ou ondes S, dans les différentes couches.

GÉNÉRALITÉS

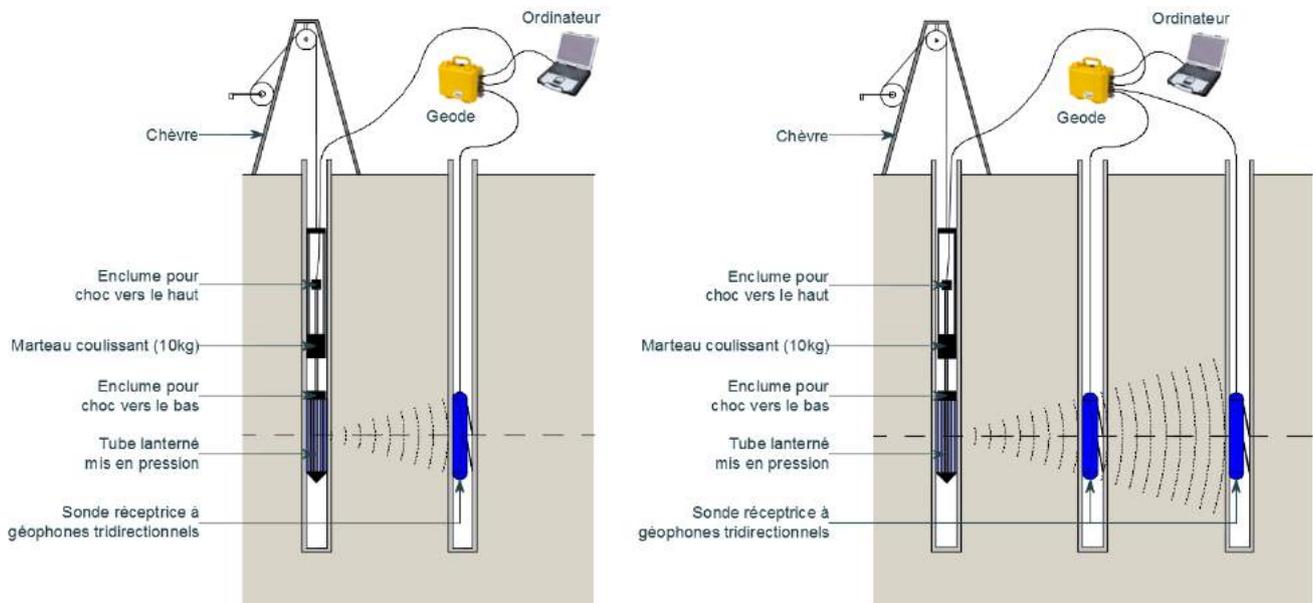
L'expression mathématique des paramètres dynamiques est une fonction, pour un matériau donné, de la masse volumique ρ (kg/m^3) et des vitesses de propagation des ondes sismiques de compression, ou onde P de vitesse V_p , et de cisaillement, ou onde S de vitesse V_s , exprimées en m/s. Ces ondes correspondent aux déformations de compression et de cisaillement du milieu élastique en faibles déformations. Les vitesses sont reliées par les paramètres dynamiques du milieu qui sont les suivants :

- coefficient de Poisson : $\nu = (V_p^2 - 2 \cdot V_s^2) / 2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)$
- module de compression (MPa) : $E = 2 \cdot \rho \cdot V_p^2 \cdot (1 + \nu)$
- module de cisaillement (MPa) : $\mu = G = \rho \cdot V_s^2$

PRINCIPE

Le mode opératoire consiste à exécuter des mesures de vitesses entre deux ou plusieurs forages. On émet un signal à un niveau déterminé dans un forage et on réceptionne ce signal au même niveau dans un ou plusieurs forages voisins alignés. Les signaux à l'émission et à la réception sont enregistrés simultanément. La détermination des temps de propagation des ondes P et S entre l'émission et la ou les réceptions permet de calculer les vitesses des ondes P et S, connaissant les distances séparant les points d'émission et de réception.

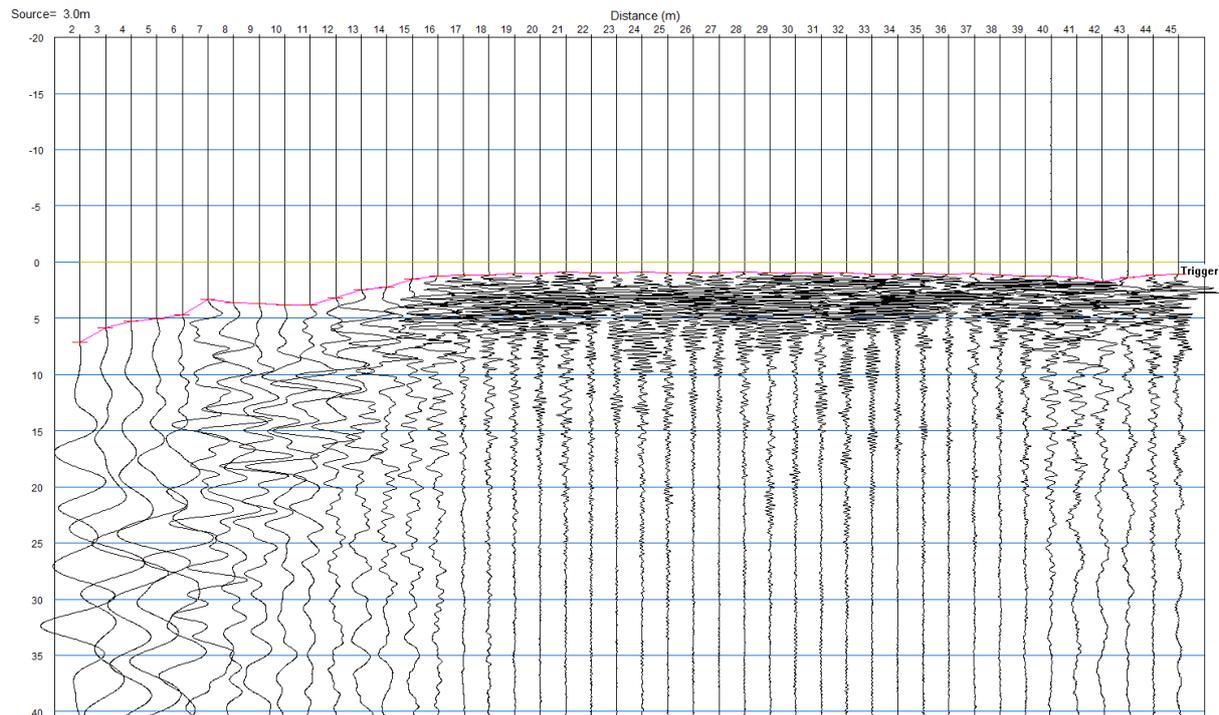
La réalisation des essais dans trois forages alignés permet de disposer de 3 manières de pointer des temps de propagation des ondes P et de 4 manières de pointer des temps d'arrivée des ondes S (entre panneaux et cross-corrélation).



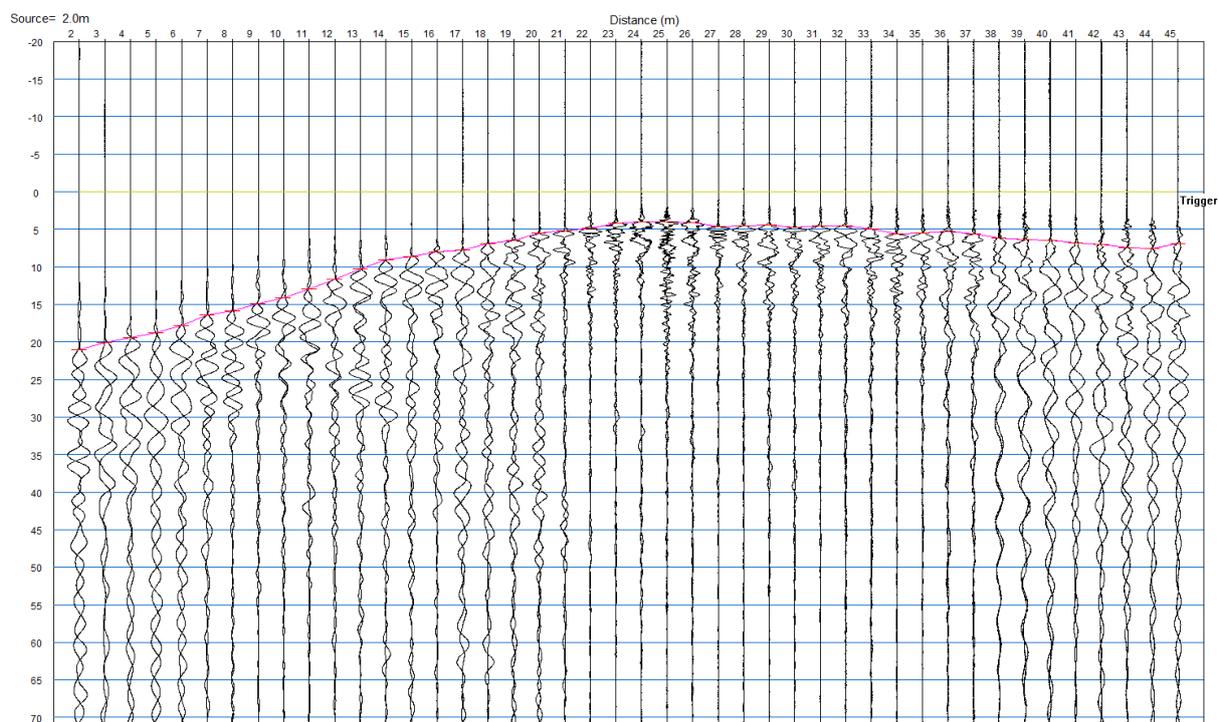
MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel de mesure utilisé par ME2i est constitué des éléments suivants :

- Sondes émettrices réversibles pour ondes P et S (chocs vers le haut et vers le bas). La masse de 10 kg coulisse sur une tige de 1,2 m de long.
- Sonde émettrice Sparker pour ondes de compressions P.
- Sondes réceptrices équipées de capteurs triaxiaux (géophones ou accéléromètres).
- Enregistreur numérique pour la mesure et le stockage des signaux.
- Matériel de mesures d'inclinométrie (distance entre points d'émission et de réception).

RÉSULTATS DES MESURES

Pointé des ondes P



Pointé des ondes S grâce aux frappes opposés

FORAGES

Les résultats des mesures cross-hole dépendent avant tout du **tubage** et de la qualité du **scellement**. Le couplage tube PVC-terrain **est primordial** et détermine la qualité des signaux. Le tube doit avoir un bouchon de pied et être couplé au terrain par un scellement annulaire réalisé par une injection du coulis de ciment par le bas (par tube plongeur).

ESSAIS AU DILATOMÈTRE

L'essai dilatométrique a pour but de déterminer les caractéristiques de déformation d'un terrain en place (massif rocheux ou sol raide). Il est réalisé au moyen d'une sonde introduite dans un forage vertical ou non.

L'essai dilatométrique consiste à dilater diamétralement une sonde cylindrique mise en place dans un forage, à mesurer à la fois la pression appliquée au terrain par l'intermédiaire de la membrane de la sonde et le déplacement diamétral de la paroi du forage dans trois directions de l'espace orthogonales à l'axe de la sonde.

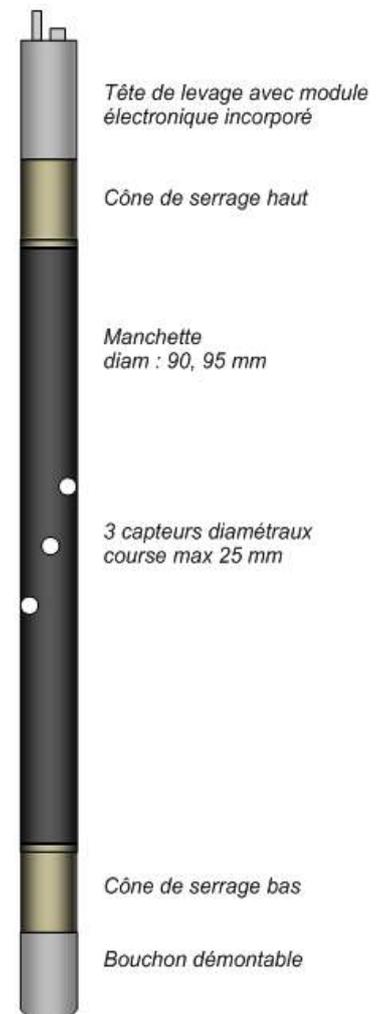
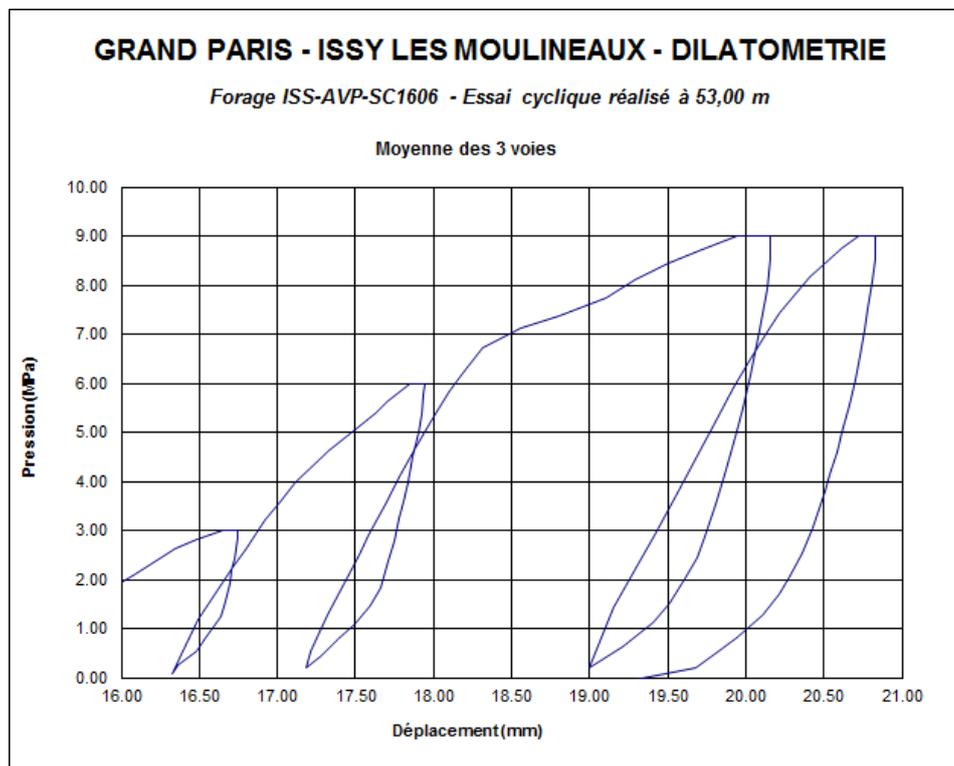
ME2i réalise ces essais conformément aux spécifications de la norme NF P 94-443-1.

Ce dilatomètre a été conçu pour pouvoir réaliser aussi bien des essais classiques que des essais à grande profondeur (de 200 à plus de 1 000 m). Il est également conçu pour tester tous forages réalisés au carottier à câble sans avoir à les réalésés. ME2i possède 2 dilatomètres de diamètres différents qui couvrent une grande partie des forages couramment réalisés :

- Ø 90 mm pour les essais dans les forages de diamètre 96 mm
- Ø 95 mm pour les forages de diamètre 101 mm

SPÉCIFICATIONS

- Poids : 55 kg
- Longueur de la manchette : 1 000 mm
- Diamètres extérieurs : 90, 95 mm
- Course des palpeurs : +/- 25 mm
- Pression différentielle de service : 120 bars
- Température max : 45°
- Résolution : 1µm
- Précision : +/- 25µm



ESSAIS DOWN-HOLE

Les essais Down-Hole ont pour but de déterminer les modules dynamiques du sous-sol.

GÉNÉRALITÉS

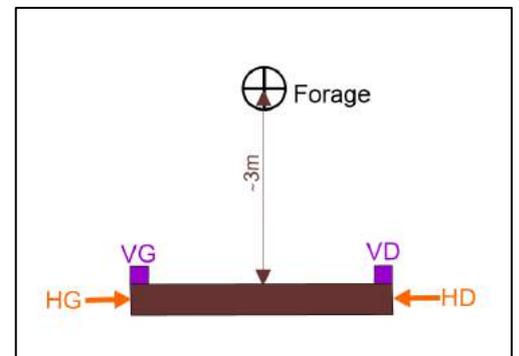
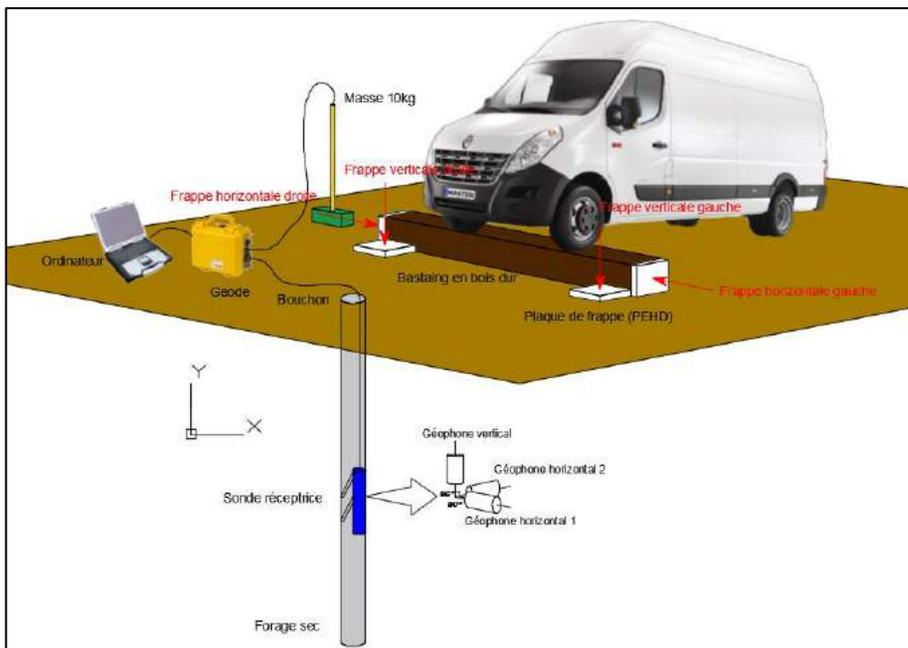
L'expression mathématique des paramètres dynamiques est une fonction, pour un matériau donné, de la masse volumique ρ (kg/m^3) et des vitesses de propagation des ondes sismiques de compression, ou onde P de vitesse V_p , et de cisaillement, ou onde S de vitesse V_s , exprimées en m/s. Ces ondes correspondent aux déformations de compression et de cisaillement du milieu élastique en faibles déformations. Les vitesses sont reliées par les paramètres dynamiques du milieu qui sont les suivants :

- coefficient de Poisson : $\nu = (V_p^2 - 2.V_s^2) / 2.(V_p^2 + V_s^2)$
- module de compression (MPa) : $E = 2.\rho.V_p^2.(1 + \nu)$
- module de cisaillement (MPa) : $\mu = G = \rho.V_s^2$

PRINCIPE

Le down-hole consiste à mesurer le temps de propagation d'une onde sismique entre un point d'émission situé en surface à une distance d'environ 3 m d'un forage et une sonde réceptrice placée dans ce même forage. Les signaux à l'émission et à la réception sont enregistrés simultanément. La détermination des temps de propagation des ondes P et S entre l'émission et la réception permet de calculer les vitesses des ondes P et S par couche géologique.

On utilise le logiciel PSLog de Geometrics pour le calcul des vitesses par tranche.

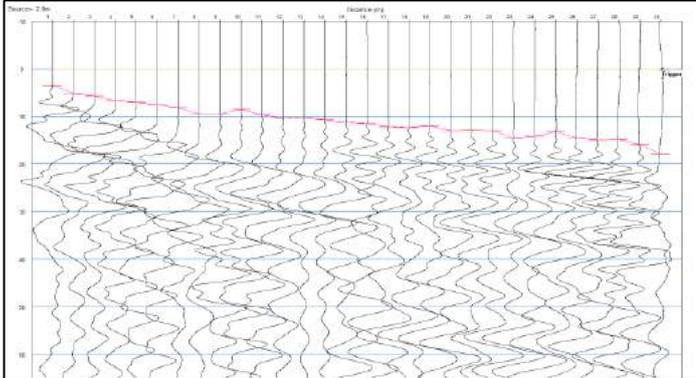


MATÉRIEL DE MESURE

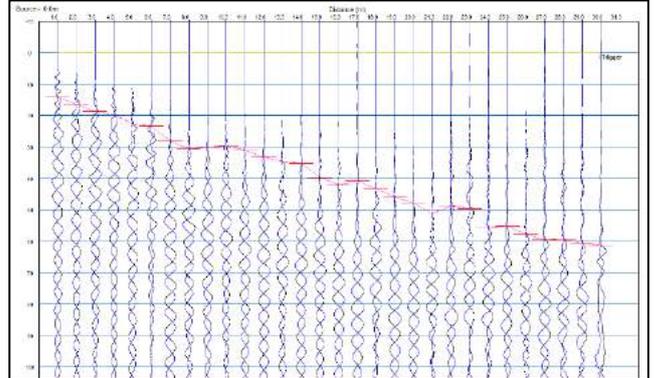
Le matériel de mesure utilisé par ME2i est constitué des éléments suivants :

- Emission : masses de 8 et 10 kg avec bastaing en bois dur.
- Sondes réceptrices équipées de capteurs triaxiaux (géophones ou accéléromètres).
- Enregistreur numérique type Geode 24 voies de Geometrics pour la mesure et le stockage des signaux.

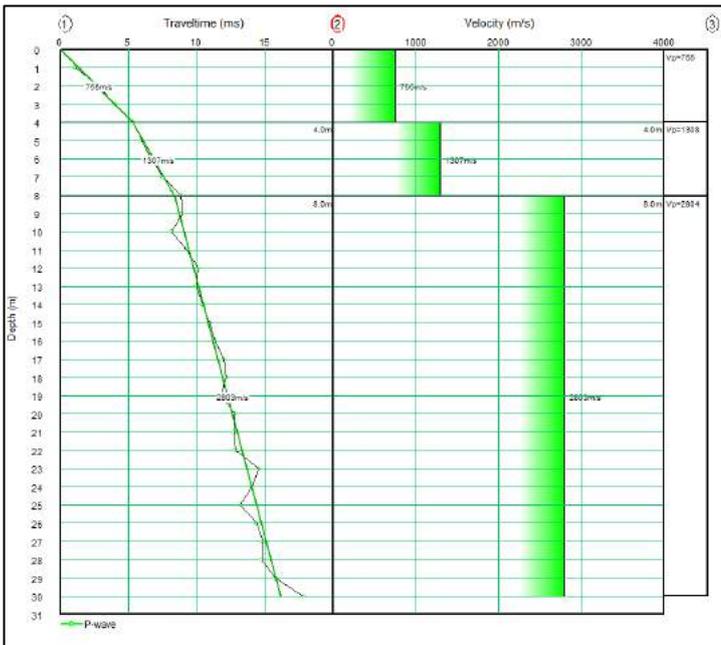
RÉSULTATS DES MESURES



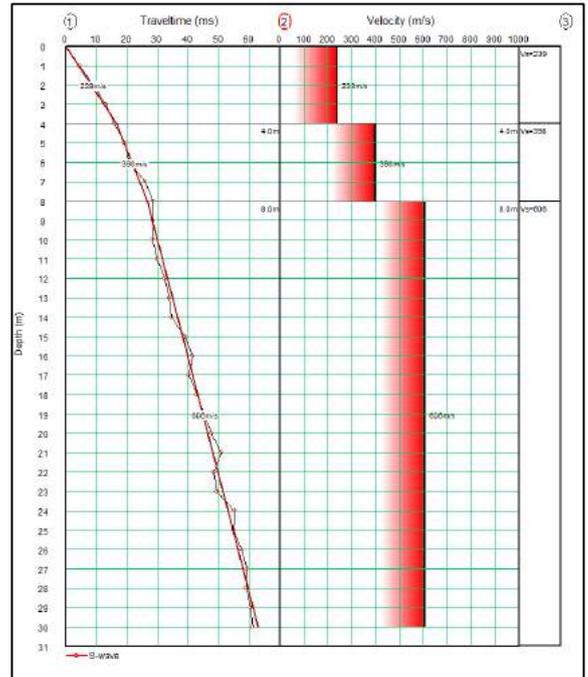
Frappe verticale
Pointé des ondes P.



Combinaison des frappes horizontales gauche et droite après polarisation
Pointé des ondes S.



Exemple : Vitesses par tranches des onde P.



Exemple : Vitesses par tranches des onde S.

FORAGES

Les résultats des mesures down-hole dépendent avant tout du **tubage** et de la qualité du **scellement**. Le couplage tube PVC-terrain **est primordial** et détermine la qualité des signaux. Le tube doit avoir un bouchon de pied et être couplé au terrain par un scellement annulaire réalisé par une injection du coulis de ciment par le bas (par tube plongeur).

EM31-MK2

L'EM31-MK2 cartographie les variations des couches géologiques, les sols contaminés et toute surface caractérisée par des changements en conductivité du sol.

PRÉSENTATION

L'EM31-MK2 utilise une technologie électromagnétique qui permet de mesurer la conductivité dans le sol sans planter d'électrodes. Avec cette méthode de mesure inductive, on peut pratiquer des études dans la plupart des terrains géologiques, même sur les couches superficielles ou surfaces très résistantes comme du sable, des graviers et de l'asphalte.

La profondeur d'exploration effective est d'environ 6 ou 4 mètres, ce qui rend l'EM31-MK2 idéal pour les applications géotechniques et environnementales de caractérisation de sols.

L'un des avantages majeur de l'EM31-MK2, est sa rapidité de mise en œuvre. Il permet de faire des études de grandes surfaces avec un bon rendement.

D'autre part, pendant que la surface de mesures est couverte en continu, la précision de l'EM31-MK2 permet de remarquer les plus faibles changements de conductivité dans le sol. La composante "inphase" est particulièrement utile dans la détection d'objets métalliques enterrés.

PRINCIPE

La méthode électromagnétique Slingram utilisée par l'EM31 permet de mesurer les variations de la conductivité électrique (l'inverse de la résistivité électrique). On génère en surface un champ électromagnétique dit primaire à l'aide d'une bobine émettrice et celui-ci se diffuse dans le sol induisant des courants dits de Foucault en profondeur qui génèrent à leur tour un champ électromagnétique dit secondaire (Dubois et al, 2011). Ce dernier est mesuré par une bobine réceptrice placée en surface (figure 1).

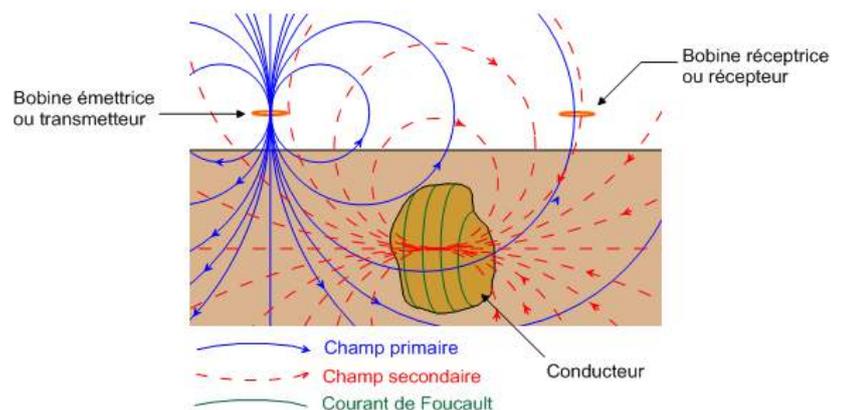


Figure 1 – Principe d'induction Electromagnétique

La connaissance des composantes horizontales et verticales des champs magnétiques

primaires et secondaires permet d'obtenir la conductivité apparente σ_a exprimée en Siemens/mètre. La conductivité apparente est l'inverse de la résistivité apparente exprimée en Ohm.mètre

MATÉRIEL DE MESURE

On lit directement la conductivité du sol sur le data logger (quadrature) et la susceptibilité magnétique (inphase). Les mesures peuvent être géoréférencées. Le data logger se retire facilement du boîtier EM31 pour le transfert ultérieur des données acquises. On peut aussi connecter un ordinateur directement sur la sortie RS232 disponible en face de l'EM31.

Photographie 1 – Matériel de mesure



TRAITEMENT DES DONNÉES

Lorsque les mesures sont effectuées en continu, les résultats peuvent être affichés sous forme de courbe d'évolution de la résistivité apparente mesurée en fonction de la distance sur le profil (figure 2) ou sous forme de carte de conductivités apparentes (figure 3). Lorsque les mesures sont effectuées de manière discrète, les résultats peuvent être affichés sous forme de tableau de conductivités apparentes ou sous forme de carte de conductivités apparentes si le maillage le permet.

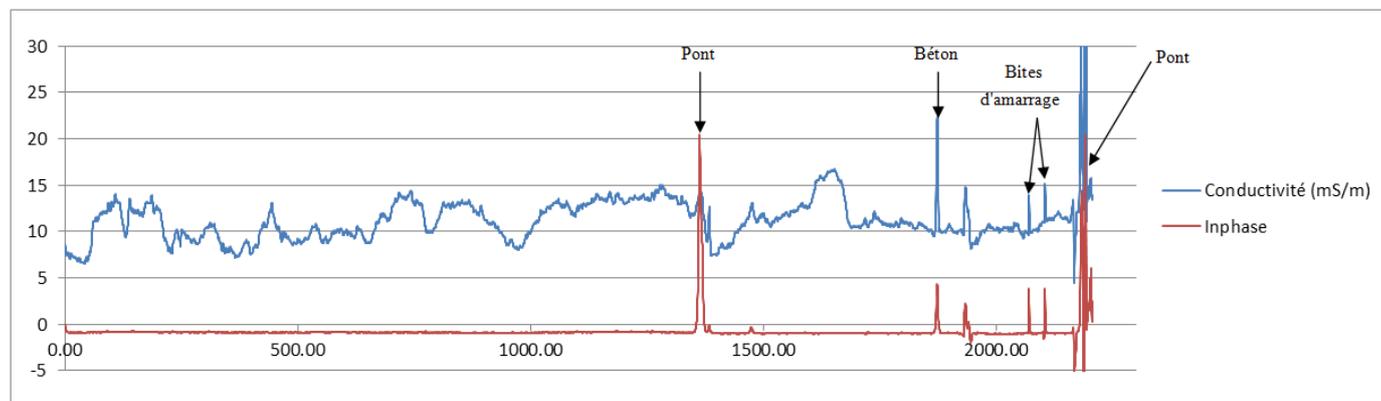


Figure 2 – Courbe de conductivité et d’Inphase



Figure 3 – Carte de conductivité apparente

EM34

L'EM34 cartographie les variations des couches géologiques, les sols contaminés et toute surface caractérisée par des changements en conductivité du sol.

PRINCIPE

La méthode électromagnétique Slingram utilisée par l'EM34 de Geonics, permet de mesurer les variations de la conductivité électrique (l'inverse de la résistivité électrique). On génère en surface un champ électromagnétique dit primaire à l'aide d'une bobine émettrice et celui-ci se diffuse dans le sol induisant des courants dits de Foucault en profondeur qui génèrent à leur tour un champ électromagnétique dit secondaire (Dubois et al, 2011). Ce dernier est mesuré par une bobine réceptrice placée en surface (figure 1).

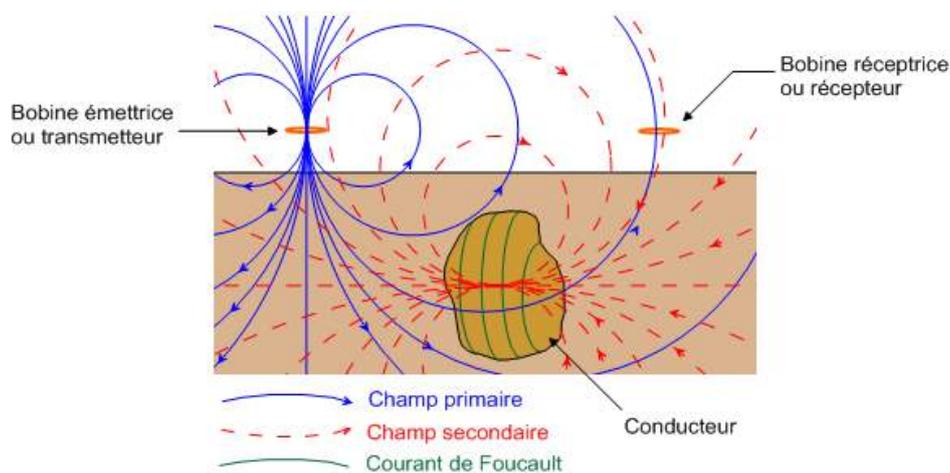


Figure 1 – Principe d'induction Electromagnétique

La connaissance des composantes horizontales et verticales des champs magnétiques primaires et secondaires permet d'obtenir la conductivité apparente σ_a exprimée en Siemens/mètre. La conductivité apparente est l'inverse de la résistivité apparente exprimée en Ohm.mètre ($\rho_a=1/\sigma_a$).

MATÉRIEL DE MESURE

En pratique, on réalise les mesures en continu le long des profils établis ou par mesures discrètes sur des points implantés au préalable (Maillage). Elles s'effectuent avec les bobines placées horizontalement (axe de la bobine verticale et champ magnétique vertical DMV) et/ou verticalement (axe de la bobine horizontale et champ magnétique horizontal DMH). Le tableau suivant récapitule les profondeurs d'investigation en fonction de l'espacement inter-bobines et du mode retenu.

Méthode	Dipôle	Distance inter-bobines (m)	Profondeur d'investigation (m)
EM34	Horizontal	10	7,5
EM34	Vertical	10	15,0
EM34	Horizontal	20	15,0
EM34	Vertical	20	30,0
EM34	Horizontal	40	30,0
EM34	Vertical	40	60,0

La valeur de conductivité apparente affichée par l'appareil est calculée automatiquement. Elle est enregistrée par l'appareil toutes les 3 secondes environ et ce paramètre est modifiable. Un géoréférencement des points de mesure est possible en connectant un GPS à l'EM34 via un data-logger.



Photographie 1 – EM34 en mode dipôle horizontal, espacement inter-bobines de 10m.

TRAITEMENT DES DONNÉES

Lorsque les mesures sont effectuées en continu, les résultats peuvent être affichés sous forme de courbe d'évolution de la résistivité apparente mesurée en fonction de la distance sur le profil ou sous forme de carte de conductivités apparentes.

Lorsque les mesures sont effectuées de manière discrète, les résultats peuvent être affichés sous forme de tableau de conductivités apparentes ou sous forme de carte de conductivités apparentes si le maillage le permet.

EM38-MK2

L'EM38-MK2 cartographie les variations des couches géologiques de surface, en particulier pour étudier des zones arables, des terrains agricoles, des sols contaminés et toute surface caractérisée par des changements en conductivité du sol.

PRÉSENTATION

L'EM38-MK2 utilise une technologie électromagnétique qui permet de mesurer la conductivité dans le sol sans planter d'électrodes. Avec cette méthode de mesure inductive, on peut pratiquer des études dans la plupart des terrains géologiques, même sur les couches superficielles ou surfaces très résistantes comme du sable, des graviers et de l'asphalte.

La profondeur d'exploration effective est d'environ 0,75 (dipôle horizontal) ou 1,5 mètres (dipôle vertical), ce qui rend l'EM38-MK2 idéal pour les applications géologiques de surface.

L'un des avantages majeur de l'EM38-MK2, est sa rapidité de mise en œuvre. Il permet de faire des études de grandes surfaces avec un bon rendement.

D'autre part, pendant que la surface de mesures est couverte en continu, la précision de l'EM38-MK2 permet de remarquer les plus faibles changements de conductivité dans le sol. La composante "inphase" est particulièrement utile dans la détection d'objets métalliques enterrés.

PRINCIPE

La méthode électromagnétique Slingram utilisée par l'EM38 permet de mesurer les variations de la conductivité électrique (l'inverse de la résistivité électrique). On génère en surface un champ électromagnétique dit primaire à l'aide d'une bobine émettrice et celui-ci se diffuse dans le sol induisant des courants dits de Foucault en profondeur qui génèrent à leur tour un champ électromagnétique dit secondaire (Dubois et al, 2011). Ce dernier est mesuré par une bobine réceptrice placée en surface (figure 1).

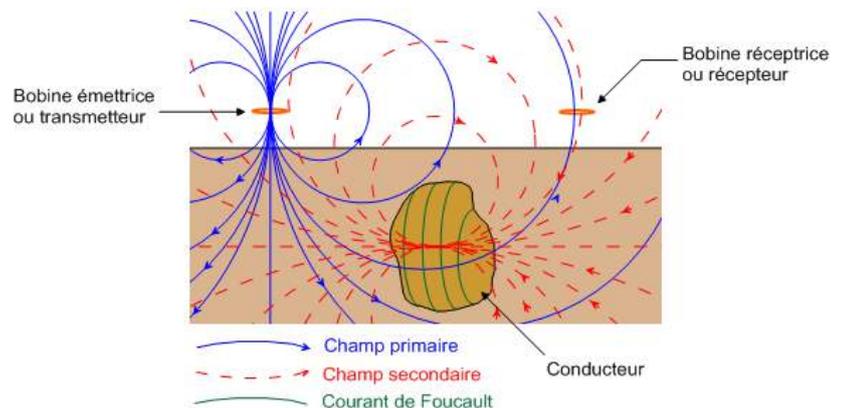


Figure 1 – Principe d'induction Electromagnétique

La connaissance des composantes horizontales et verticales des champs magnétiques

primaires et secondaires permet d'obtenir la conductivité apparente σ_a exprimée en Siemens/mètre. La conductivité apparente est l'inverse de la résistivité apparente exprimée en Ohm.mètre

MATÉRIEL DE MESURE

On lit directement la conductivité du sol sur le data logger (quadrature) et la susceptibilité magnétique (inphase). Les mesures peuvent être géoréférencées. Le data logger est séparé de l'EM38 pour le transfert ultérieur des données acquises.

Photographie 1 – Matériel de mesure



TRAITEMENT DES DONNÉES

Lorsque les mesures sont effectuées en continu, les résultats peuvent être affichés sous forme de courbe d'évolution de la résistivité apparente mesurée en fonction de la distance sur le profil (figure 2) ou sous forme de carte de conductivités apparentes (figure 3). Lorsque les mesures sont effectuées de manière discrète, les résultats peuvent être affichés sous forme de tableau de conductivités apparentes ou sous forme de carte de conductivités apparentes si le maillage le permet.

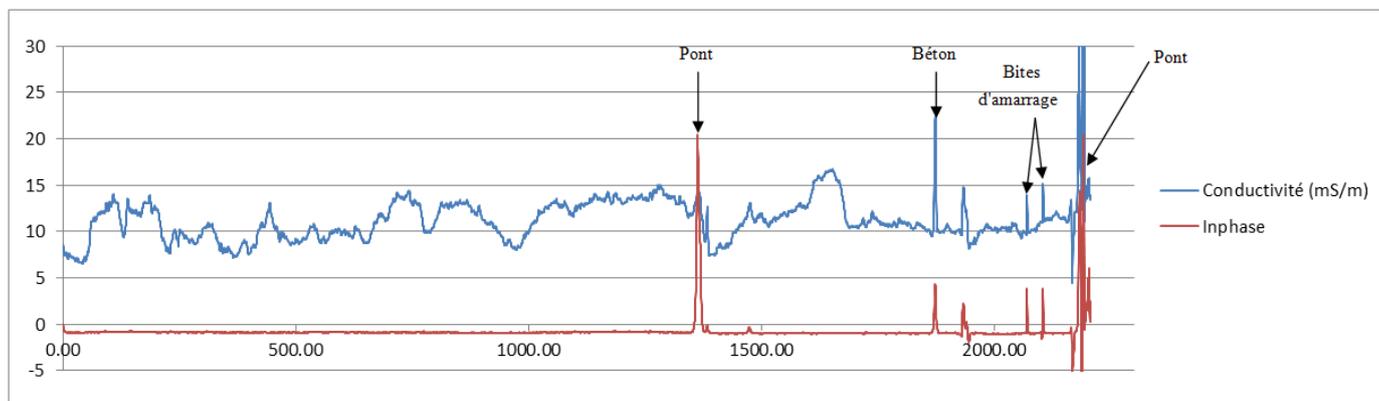


Figure 2 – Courbe de conductivité et d’Inphase



Figure 3 – Carte de conductivité apparente

DÉTECTEUR DE MÉTAUX EM61-MK2

PRÉSENTATION

L'EM61-MK2 permet de détecter des objets ferreux et non-ferreux, avec une grande précision grâce à la technologie d'induction pulsée. Un fût de 200 litres peut être détecté à plus de 3 m.

PRINCIPE

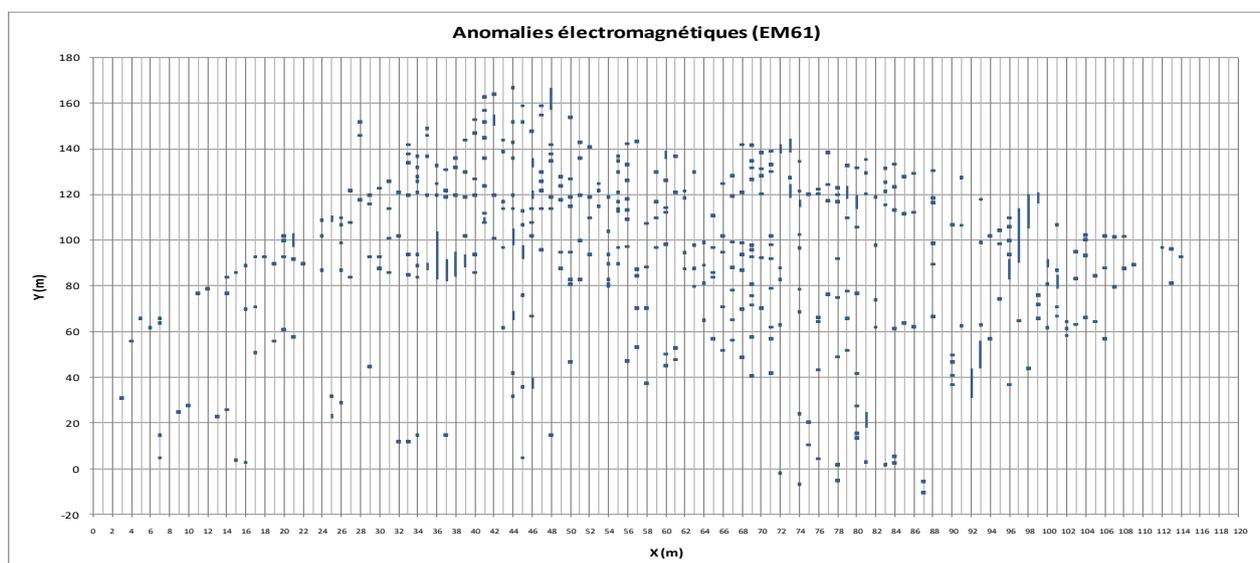
Un émetteur génère un puissant champ électromagnétique cyclique dans le sol. Ce champ électromagnétique primaire crée des courants de Foucault dans les objets conducteurs enterrés. Les deux bobines réceptrices mesurent la réponse du champ magnétique secondaire induit par ces courants de Foucault. Le choix judicieux des fenêtres de mesure rend la réponse de l'EM61-MK2 indépendante de la conductivité du sol.

Grâce à sa grande dynamique, l'**EM61-MK2** est insensible aux interférences telles que les clôtures ou les lignes haute-tension.

MATÉRIEL DE MESURE

L'acquisition de données est contrôlée par un Data Logger Allegro. Cet ordinateur de terrain possède des applications importantes comme l'affichage en temps réel des données acquises (pour le contrôle qualité), une grande capacité mémoire (min. 1 million de données), mais aussi permet de connecter simultanément l'EM61 et un GPS. La liaison GPS est immédiate.

Les bobines sont installées sur un chariot muni d'un codeur pour la mesure de la distance parcourue.



FISSUROMÉTRIE - EXTENSOMÉTRIE

Une fissure dans un ouvrage est le signe visible d'un mouvement de la structure qui peut devenir dangereux si on ne le suit pas. La fissurométrie est le suivi des fissures dans le temps. Le but est de comprendre le mouvement de la structure afin d'évaluer sa dangerosité.

PRÉSENTATION

Une fissure est la transcription visible d'un mouvement d'une structure. Ce mouvement peut s'effectuer dans les trois directions de l'espace. La fissurométrie va permettre de suivre dans le temps l'ouverture et la fermeture des fissures dans ces 3 directions.

Le suivi peut s'effectuer en continu grâce à des extensomètres reliés à une centrale d'acquisition qui envoie en temps réel via internet les résultats de mesures effectuées à une fréquence donnée.

Le suivi peut également s'accomplir manuellement. Dans ce cas, un technicien relève sur site tous les mois les variations indiquées sur des jauges en plastique.

MÉTHODE D'ACQUISITION

Que ce soit dans le cas des extensomètres ou des jauges en plastique, ces instruments sont placés de part et d'autre de la fissure afin de mesurer l'ouverture ou la fermeture de celle-ci.

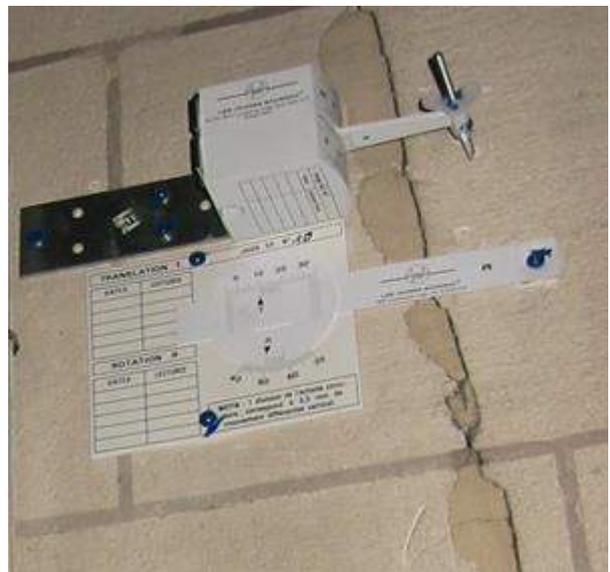
MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel de mesure utilisé par ME2i est constitué des éléments suivants :

- ♦ Des extensomètres de course variable (de 25 à 50mm).
- ♦ Des jauges Sagnac de type G3 permettant de mesurer les désaffleurements des lèvres de la fissure.
- ♦ Des jauges Sagnac de type G6 permettant de mesurer l'ouverture ou la fermeture ainsi que la rotation d'une fissure.
- ♦ Tous les autres types de jauges Sagnac.



Extensomètre de course égale à 50mm



Jauges Sagnac G3 (en haut) et G6 (en bas)

TRAITEMENT DES DONNÉES

Les mesures sont comparées d'un relevé à l'autre (différence) afin de constater l'ouverture ou la fermeture entre ces deux instants. Un cumul des différences peut également être donné. Il permet d'apprécier les mouvements à un instant t depuis la pose des instruments.

DIAGRAPHIE GAMMA RAY

PRINCIPE

Mesure quantitative, en continu (en nombre de coups par seconde) et en fonction de la profondeur, de la radioactivité naturelle des matériaux traversés par un forage.

La mesure est réalisée au moyen d'une sonde possédant un compteur à scintillation. ME2i possède 2 sondes de diamètre 28 mm et 39 mm.

APPLICATION

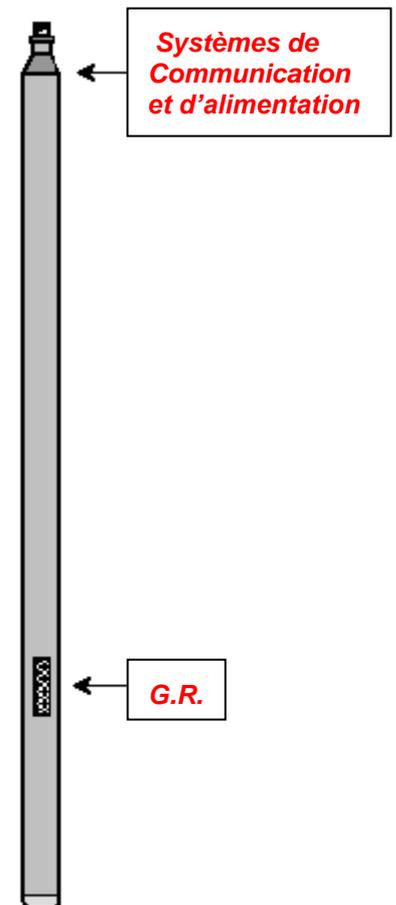
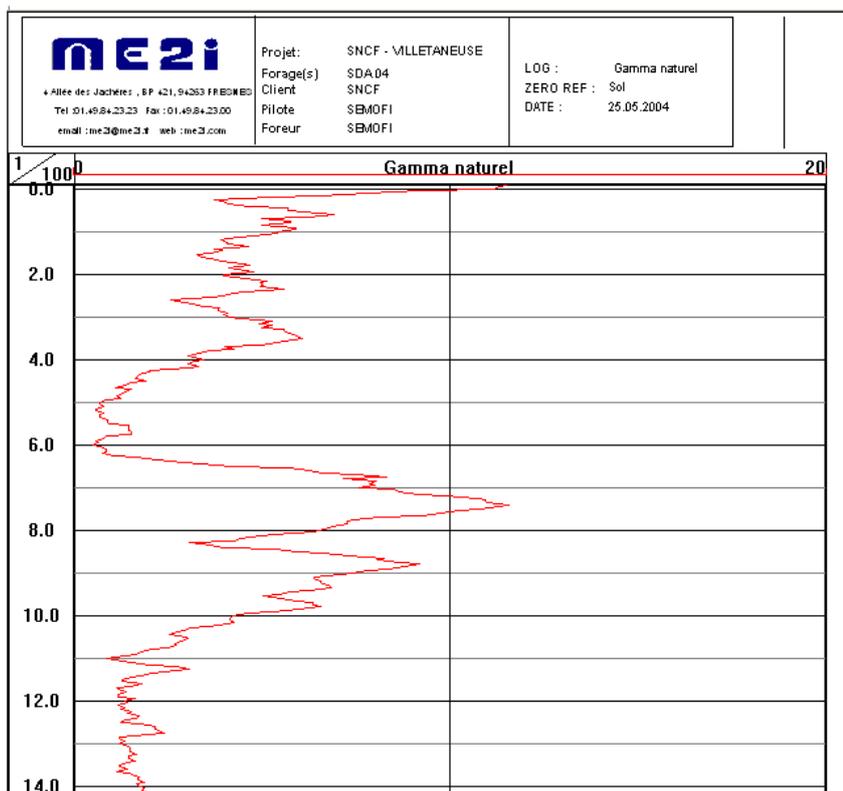
Mise en évidence de terrains présentant des contrastes de radioactivité naturelle (argile, granite...).

CARACTÉRISTIQUES DES SONDES

Diamètre : 28 mm et 39 mm

Longueur : 78 cm et 100 cm

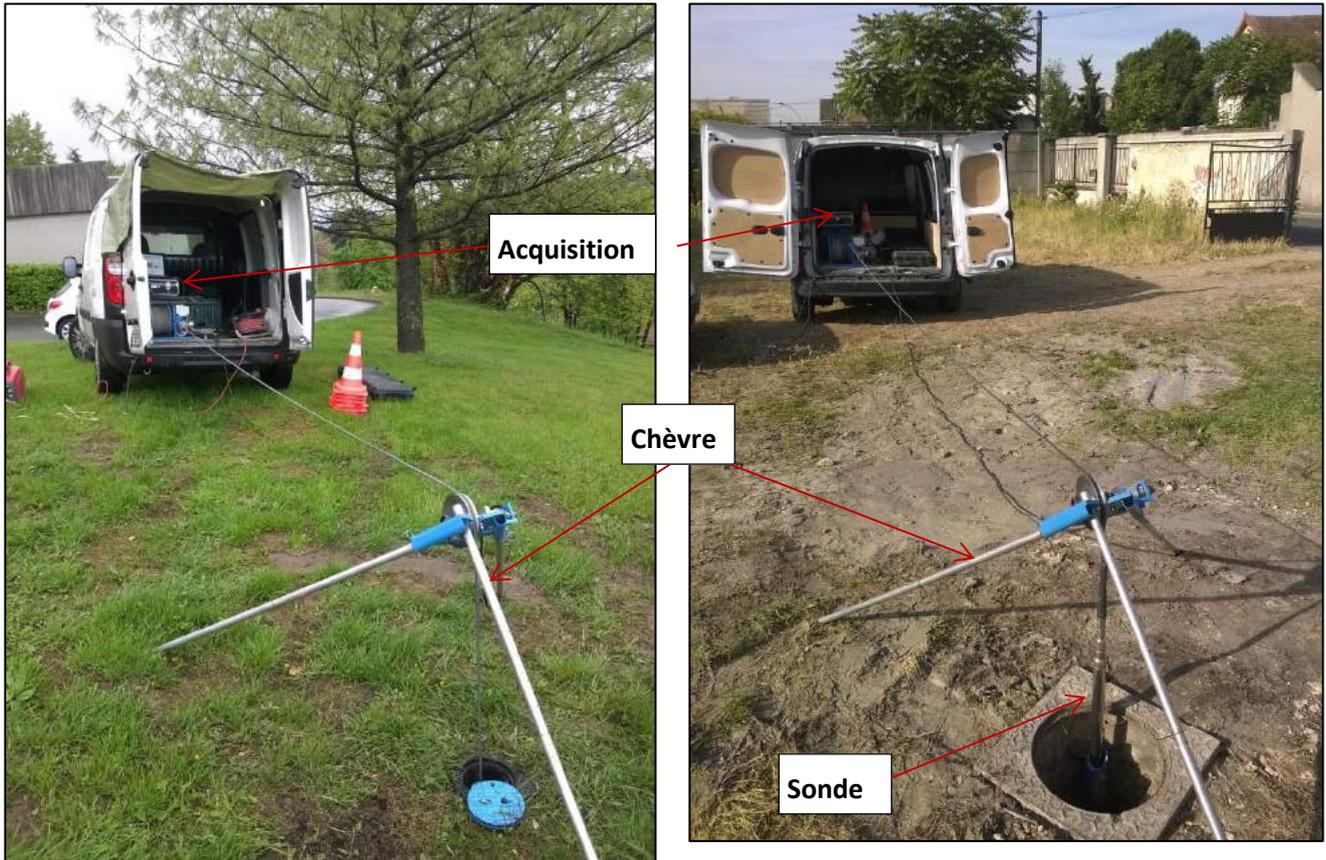
Température / Pression maximale : 70°C / 150 bar



Enregistrement du rayonnement Gamma en fonction de la profondeur du forage.

Le matériel utilisé pour la réalisation des mesures gamma-ray est composé des éléments suivants :

- Une chèvre équipée d'une poulie encodeuse et un treuil pour descendre la sonde dans le forage.
- Une sonde gamma-ray.
- Un module d'acquisition.
- Un micro-ordinateur pour piloter l'acquisition.



Matériel de mesure gamma-ray.

MISE EN OEUVRE

Les différentes étapes de réalisation d'un essai cross-hole sont les suivantes :

- ♦ La sonde gamma-ray est descendue dans le forage.
- ♦ Le déclenchement des mesures est actionné par le codeur monté sur la chèvre dès le début de la descente de la sonde pilotée par le treuil. La mesure se fait jusqu'au fond du forage.
- ♦ Une fois au fond du forage, l'opérateur arrête la descente de la sonde.
- ♦ Une autre mesure est réalisée en remontant la sonde.
- ♦ La vitesse de descente et de remontée de la sonde est de l'ordre de 3 m/minute.
- ♦ Une fois la sonde arrivée en tête de forage, l'opérateur stoppe l'acquisition.
- ♦ La phase de mesure est terminée et l'opérateur ramasse le matériel pour passer au forage suivant.

GÉORADAR GÉOPHYSIQUE

L'investigation géoradar constitue un procédé géophysique léger et non destructif permettant d'effectuer de manière précise, et en continu, des études géologiques de subsurface et des auscultations d'ouvrages.

PRÉSENTATION

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 métallique.

MÉTHODE D'ACQUISITION

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.

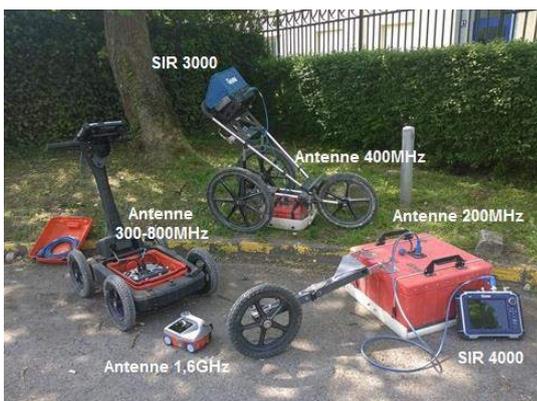
MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel de mesure utilisé par ME2i est constitué des éléments suivants :

Une antenne : 100 MHz, 200 MHz, 400 MHz, 900 MHz, 1,6 GHz, bifréquence 300-800MHz..

Un boîtier d'acquisition SIR 3000 de GSSI.

Une roue codeuse montée sur chariot.



TRAITEMENT DES DONNÉES

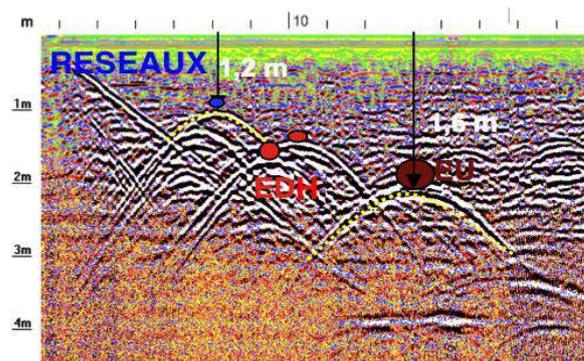
La méthode géoradar permet la localisation des anomalies dans le sol, ou plus généralement des contrastes entre les formations et les structures présentes dans le sol. Si le sol était homogène, aucune anomalie n'apparaîtrait sur les radargrammes. Certaines structures enterrées ont des signatures typiques, comme par exemple les canalisations (signature hyperbolique) et sont facilement identifiables. D'autres structures ou phénomènes du sol sont plus difficiles à identifier, comme par exemple les vides, les décompressions de sol, les objets enterrés de forme irrégulière... Dans ce cas, on parle en termes d'anomalies qu'il faut identifier par des méthodes destructives.

APPLICATIONS

Génie civil

- Auscultation béton.
- Détection de canalisations (métal, béton).
- Localisation ferrailages.

Le radargramme suivant montre un exemple des signatures hyperboliques obtenues lors de la rencontre de réseaux.



Géotechnique

- Détermination de l'homogénéité et de la stabilité des sols.
- Résistance à l'excavation.

Géologie et hydrogéologie

- Reconnaissances des structures géologiques et hydrogéologiques (profondeur du rocher, localisation précise de failles, détection gros blocs, cavités, zone humide ou polluée).

GRAVIMÉTRIE

La méthode gravimétrique est particulièrement adaptée à la recherche de cavités souterraines.

PRÉSENTATION

Ce type de prospection consiste à mettre en évidence les variations anormales de la pesanteur occasionnées par des variations de densité du terrain et, en particulier par la présence de cavités souterraines (déficit de masse).

Une mesure gravimétrique rend compte de toutes les structures géologiques et anthropiques présentes. Lorsqu'on se déplace d'un point A du sol à un autre point B voisin du précédent, les structures profondes ont le même effet sur les deux points et seules les variations de la géologie superficielle peuvent être de nature à fournir des valeurs de g différentes en A et B.

PRINCIPE

L'expression du champ gravifique terrestre g découle directement de la loi de Newton qui s'exprime par la relation : $F = K.m.m'/d^2$, où d est la distance séparant les masses m et m' , K étant la constante gravitationnelle. Dans le cas de la reconnaissance microgravimétrique, m' est la masse du peson du microgravimètre et m peut se lire Δm ou déficit de masse dans le terrain. Cette formule montre bien que l'influence d'une masse (ou d'un déficit de masse) est d'autant plus importante qu'elle est proche du point de mesure (d faible). Elle montre également que plus la masse perturbatrice est importante, plus l'anomalie qu'elle provoque est intense (m élevée).

Les irrégularités des structures superficielles se traduisent sur les mesures par des anomalies à faible rayon de courbure, portées par des anomalies à grand rayon de courbure causées par la géologie régionale. Les valeurs mesurées doivent être traitées et corrigées de certains effets risquant de masquer les anomalies éventuelles qu'on cherche à mettre en évidence.

MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel utilisé est un gravimètre de haute précision : le SCINTREX CG5 Autograv (photographies 1 et 2). La topographie du site est prise avec un niveau de chantier de précision Leica pour l'altimétrie et un système GPS Leica pour la planimétrie.



Photographies 1 et 2 : Gravimètre SCINTREX CG5 Autograv

Les mesures sont réalisées au microGal (μgal) près, c'est à dire $10^{-8}\text{m}^2/\text{s}^2$, l'ordre de grandeur du milliardième de g . La précision des mesures est de l'ordre de $5 \mu\text{gal}$. De ce fait, les anomalies mesurées sont significatives si elles sont de l'ordre du centième de mgal .

La maille de prospection est définie en fonction du problème posé. Notons cependant qu'on adopte le plus souvent un maillage de 3 à 10 m en étude de détail (bâtiment, ouvrage d'art, ouvrages souterrains, lignes S.N.C.F).

TRAITEMENT DES DONNÉES

Les valeurs de g les plus importantes déterminées lors du traitement sont :

Le Bouguer :

C'est la valeur de g corrigée des influences suivantes :

- Influence de l'altitude du point de mesure : on ramène par le calcul tous les points de mesure à une même altitude de référence.
- Influence des masses latérales : c'est la correction de terrain
- Influence de la latitude : la correction à apporter est de -0,8 μ gals /m vers le Nord.
- Influence des structures environnantes qui peuvent provoquer des anomalies parasites sur le point de mesure.
- Influence luni-solaire et dérive instrumentale : afin de corriger l'influence luni-solaire et de la dérive, on reprend la même station gravimétrique dite "base" à intervalles réguliers. La différence entre les deux valeurs consécutives de la base est répartie sur les stations effectuées dans cet intervalle de temps.

En théorie, la valeur du Bouguer ne dépend que de la géologie profonde et superficielle à l'aplomb du point de mesure.

Le Régional :

Les anomalies qui nous intéressent dans le cadre de cette reconnaissance sont situées à faible profondeur. On élimine les variations de g créées par les structures profondes et semi-profonde qui provoquent des anomalies à grand rayon de courbure. Cet effet de la géologie est appelé "Régional".

Le Résiduel :

Le résiduel est obtenu en soustrayant le Régional au Bouguer. On a la formule suivante :

$$\text{Résiduel} = \text{Bouguer} - \text{Régional}$$

La carte d'isovaleur du résiduel est la carte des influences des terrains superficielles par rapport à une valeur de référence toujours voisine de zéro. Ce niveau de référence correspondrait à une lithologie homogène exempte d'anomalie de densité.

SEUIL DE SIGNIFICATION DES MESURES

Avant de parler d'anomalies, il importe de bien connaître le seuil au-dessus duquel une variation dans la mesure du champ de gravité ne sera pas confondue entre autre avec l'erreur instrumentale systématique.

Considérons deux mesures du champ de pesanteur g_1 et g_2 , effectuées en deux points différents. La différence $\Delta g = g_1 - g_2$ ne peut avoir un sens physique et traduire l'existence d'une différence de densité entre le sous-sol des deux stations que lorsqu'elle est supérieure à un certain seuil appelé seuil de signification. En deçà de ce seuil, on considère que cette valeur Δg est due aux imprécisions de mesure et à la dispersion liée aux causes lithologiques indiscernables.

Les capacités du gravimètre, au niveau de la lecture sont bien connues (le μ gal peut être lu). Les points jugés anormaux sont repris pour éliminer les erreurs de mesure. Dans le cas de cette étude, près de 10% des points ont été repris.

La valeur du seuil de signification est liée au gravimètre et au site (conditions locales de travail et certains aléas lithologiques superficiels de faible importance).

L'analyse des écarts entre deux ou plusieurs mesures au même point amène à considérer que la précision effective est de l'ordre de 6 à 10 μ gals. En pratique, une anomalie de 15 μ gals commence à être significative.

En résumé, on peut admettre que :

- les anomalies inférieures à 15 μ gals ne doivent pas être prises en considération,
- les anomalies supérieures à 15 μ gals doivent faire l'objet d'une vérification. Ces anomalies n'ont pas forcément pour cause des cavités ou des fontis en évolution. Elles peuvent correspondre à des différences lithologiques d'un point de mesure à un autre.

MÉTHODE MULTI-CHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW)

La méthode Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) utilise la dispersion des ondes de surface afin de déterminer la variation des vitesses des ondes de cisaillement (V_s) dans le sol.

PRÉSENTATION

La dispersion, en mécanique ondulatoire, est le phénomène affectant une onde dans un milieu dispersif, c'est-à-dire dans lequel les différentes fréquences constituant l'onde ne se propagent pas à la même vitesse. L'étude de cette dispersion permet de déterminer la distribution des vitesses des ondes de cisaillement (V_s) dans le sol.

Il s'agit d'une méthode non destructive utilisée pour évaluer la vitesse de cisaillement V_s et le module de cisaillement μ ou G des différentes couches du sous-sol. Les vitesses des ondes de compression V_p sont déterminées à l'aide de dispositifs de sismique réfraction.

La profondeur d'investigation dépend de la gamme de fréquences enregistrée. En effet, la propagation des ondes basses fréquences (grande longueur d'onde) donne des informations en profondeur alors que les ondes hautes fréquences vont donner des informations sur les couches plus en surface. En général, la profondeur qui pourra être atteinte est de l'ordre de 15 m. Pour des profondeurs plus importantes, il faut réaliser les essais cross-hole.

MÉTHODE D'ACQUISITION

La méthode MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Waves, *Park et al., 1999*) est une méthode active qui utilise une source (masse, explosif) pour créer une onde de choc qui va se propager dans le sol. La profondeur d'investigation moyenne permise est généralement égale à la moitié de la longueur du dispositif mais dépend grandement de la qualité du signal d'origine. Pour des profondeurs plus importantes, il est recommandé de réaliser des essais cross-hole.

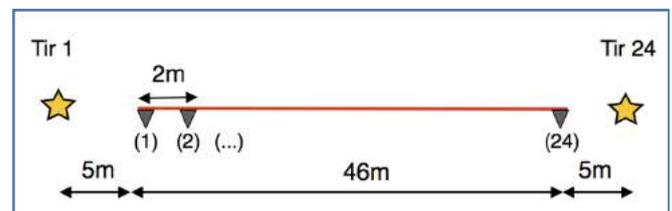
La résolution va dépendre du nombre de capteurs. Ainsi, plus il y a de géophones, plus la gamme de fréquences pouvant être enregistrée est grande. La gamme de longueurs d'ondes mesurées dépend directement de la géométrie du dispositif :

$$\lambda_{min}=DX_{min} \quad \text{et} \quad \lambda_{max}=2R, \quad \text{avec}$$

DX_{min} l'espace inter-géophones et R la longueur total du dispositif.

La configuration d'acquisition est linéaire et constituée en général de 24 traces, espacées de 1 m à 2 m. Seuls les tirs en bout sont exploités pour traiter la dispersion des ondes de surface. Les résultats des deux tirs sont ensuite comparés pour s'assurer de l'homogénéité des formations.

Plusieurs stacks sont enregistrés pour chaque tir afin d'améliorer le rapport signal/bruit. Le schéma suivant décrit le dispositif de mesure.



MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel de mesure utilisé par ME2i est constitué des éléments suivants :

- 24 géophones verticaux basses fréquences (4,5 Hz).
- 2 flûtes sismiques de 12 traces chacune.
- 1 séismographe GEODE de marque *Geometrics*.
- 1 ordinateur de terrain permettant le pilotage du séismographe.
- 1 déclencheur (trigger) relié à la source sismique.



TRAITEMENT DES DONNÉES

La dispersion des ondes de surface est obtenue par méthode FK (fréquence - nombre d'onde). Tout d'abord les signaux sont transformés dans le domaine fréquentiel par transformée de Fourier. Cette méthode calcule, pour chaque fréquence f , l'énergie correspondant à toutes les propagations d'ondes planes possibles (azimuts, vitesses) dans une gamme de nombre d'onde k prédéfinie. Ensuite, on passe de l'espace "fréquence-nombre d'onde" à l'espace "fréquence-vitesse de phase" en suivant la relation $v(f)=k/(2\pi f)$. On obtient alors le diagramme de dispersion des ondes de surface. Les zones les plus énergétiques de ce diagramme sont ensuite retenues pour pointer la courbe de dispersion. Cette courbe permet, par le biais d'un processus d'inversion, d'obtenir un modèle 1D de la variation de vitesse des ondes S des terrains sous-jacents. Pour cela, ME2i utilise les logiciels dédiés les plus récents (SeisImager/SW de Geometrics, MASW de Roma).

L'inversion se fait en tentant de minimiser l'écart entre la courbe de dispersion pointée et la courbe de dispersion synthétique issue du modèle. Le processus d'inversion implémenté dans le logiciel SeisImager/SW utilise une méthode des moindres carrés pondérée par un algorithme de voisinage. Une fois que le processus d'inversion converge, on obtient alors le diagramme des vitesses des ondes S dans le sol (figure 1).

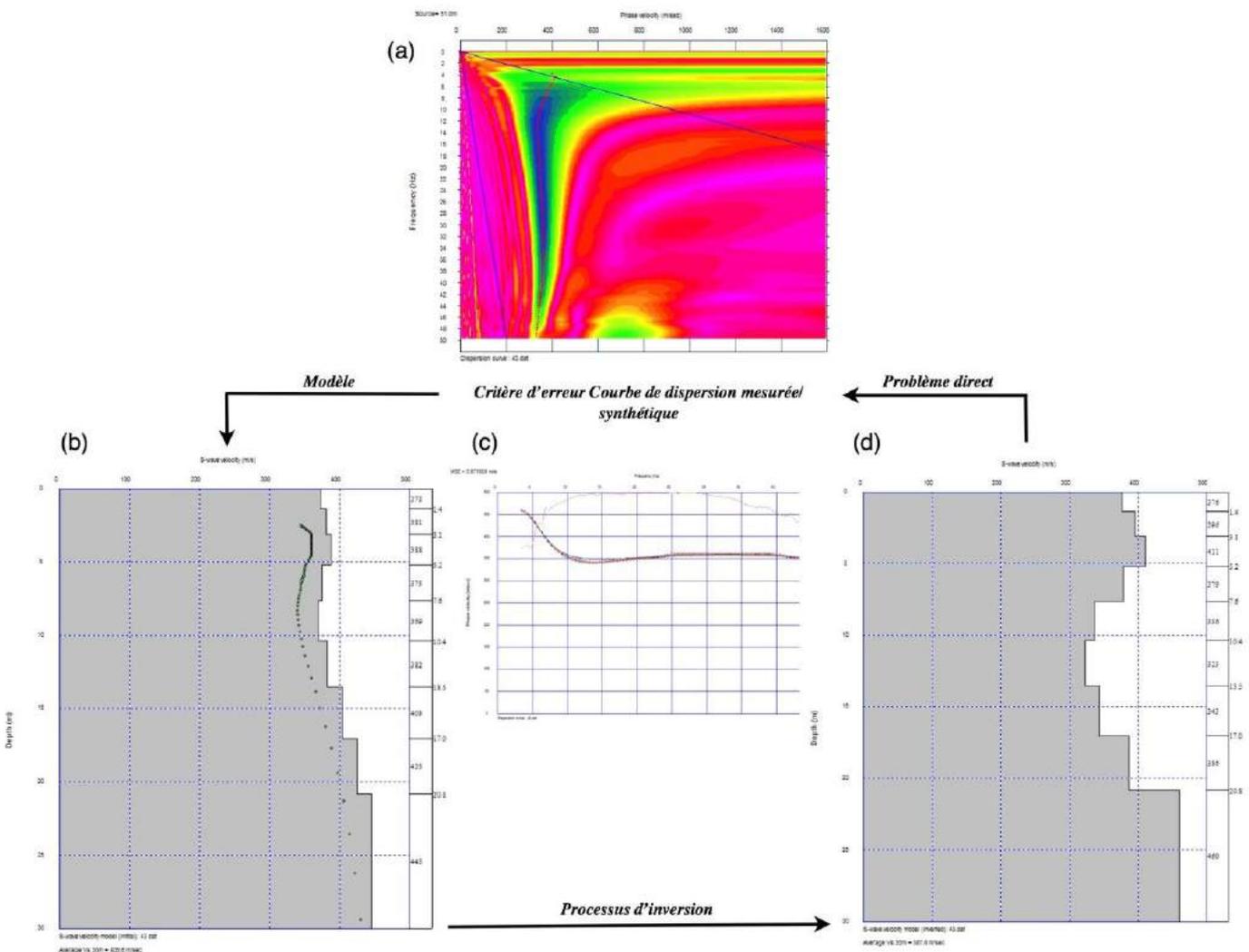


Figure 1 – Processus d’inversion de la courbe de dispersion :
 (a) Diagramme de dispersion de l’énergie transportée par les ondes.
 (b) Modèle initial déduit de la courbe de dispersion.
 (c) Courbes de dispersion mesurée et synthétique.
 (d) Modèle final de la distribution des ondes S dans le sol.

MÉTHODE SISMIQUE PARALLÈLE

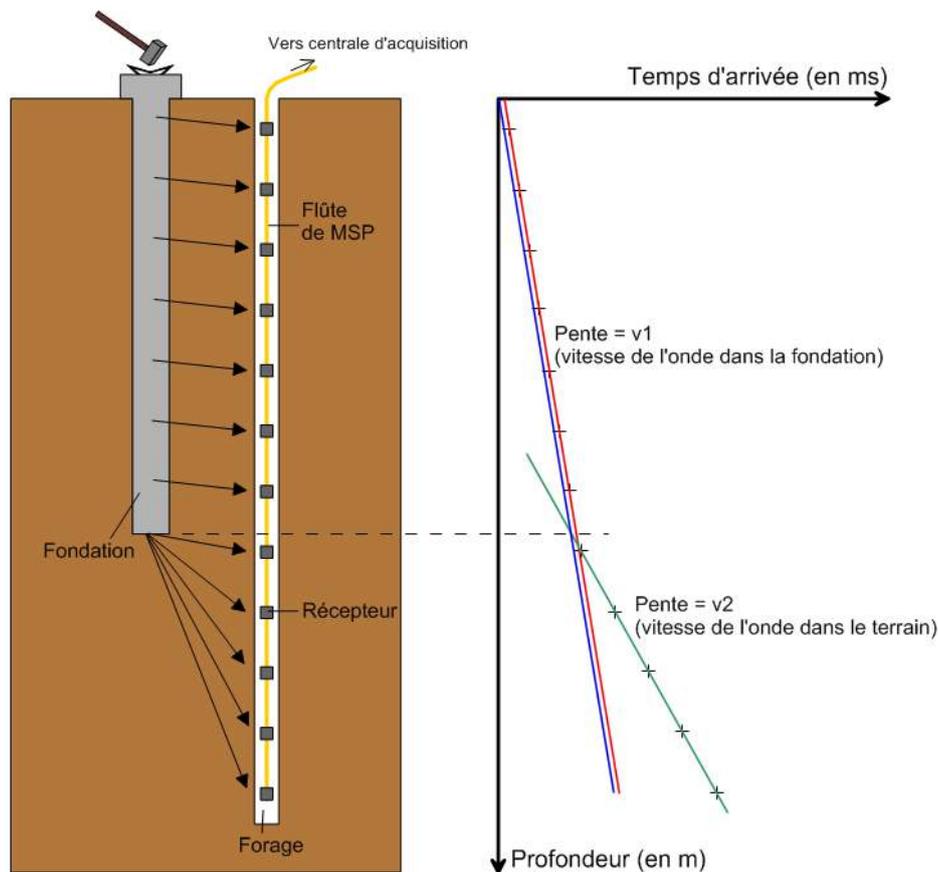
Norme NF P 94 160-3

La méthode sismique parallèle est utilisée pour le contrôle des fondations profondes. Elle permet de déterminer la longueur d'une fondation et la vitesse de propagation des ondes dans le matériau constitutif. Ce dernier paramètre renseigne sur la qualité du matériau constitutif de la fondation.

PRÉSENTATION

La MSP est surtout utilisée pour le contrôle des fondations surmontées d'une structure. Cette méthode nécessite la réalisation d'un forage d'une longueur supérieure à celle de la fondation. Elle consiste à :

- Emettre un choc vertical en tête de la fondation ou de la structure solidaire de la fondation.
- Mesurer le temps de propagation de l'onde longitudinale entre le point d'émission et les positions successives du capteur dans le forage (capteurs sur flûte tous les 0,5 m).
- Tracer la courbe représentant le temps de propagation en fonction de la profondeur du capteur dans le forage.
- Déterminer la longueur de la fondation et la vitesse sismique dans les matériaux constitutifs.



PRINCIPE

Applications : pieux, micropieux, palplanches...

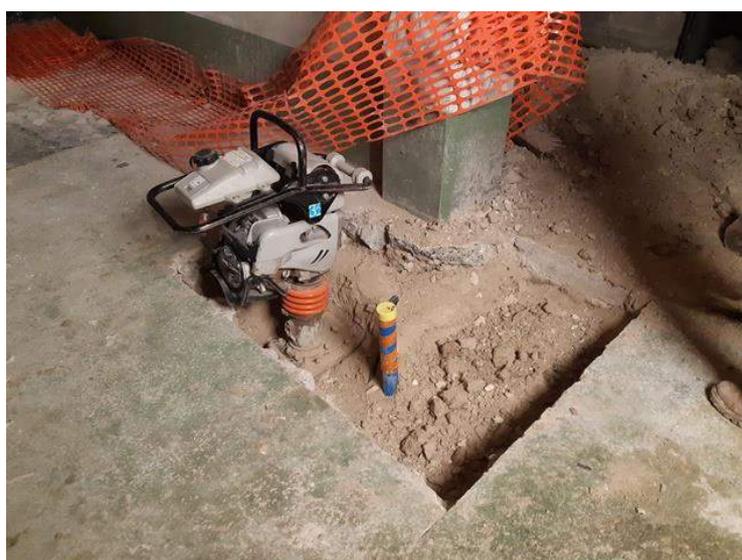
Avantages : grande précision sur la longueur et la qualité du pieu. Apporte également des précisions sur les terrains traversés.

Inconvénients : nécessité de réaliser un forage et de le tuber. Obligation d'injecter correctement l'annulaire entre le tube et le terrain.

MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel de mesure utilisé par ME2i est constitué des éléments suivants :

- ♦ 1 flûte sismique constituant un chapelet de 12 géophones verticaux espacés de 1m.
- ♦ 1 séismographe GEODE de marque *Geometrics*.
- ♦ 1 ordinateur de terrain permettant le pilotage du séismographe.
- ♦ 1 déclencheur (trigger) relié à la source sismique (masse).

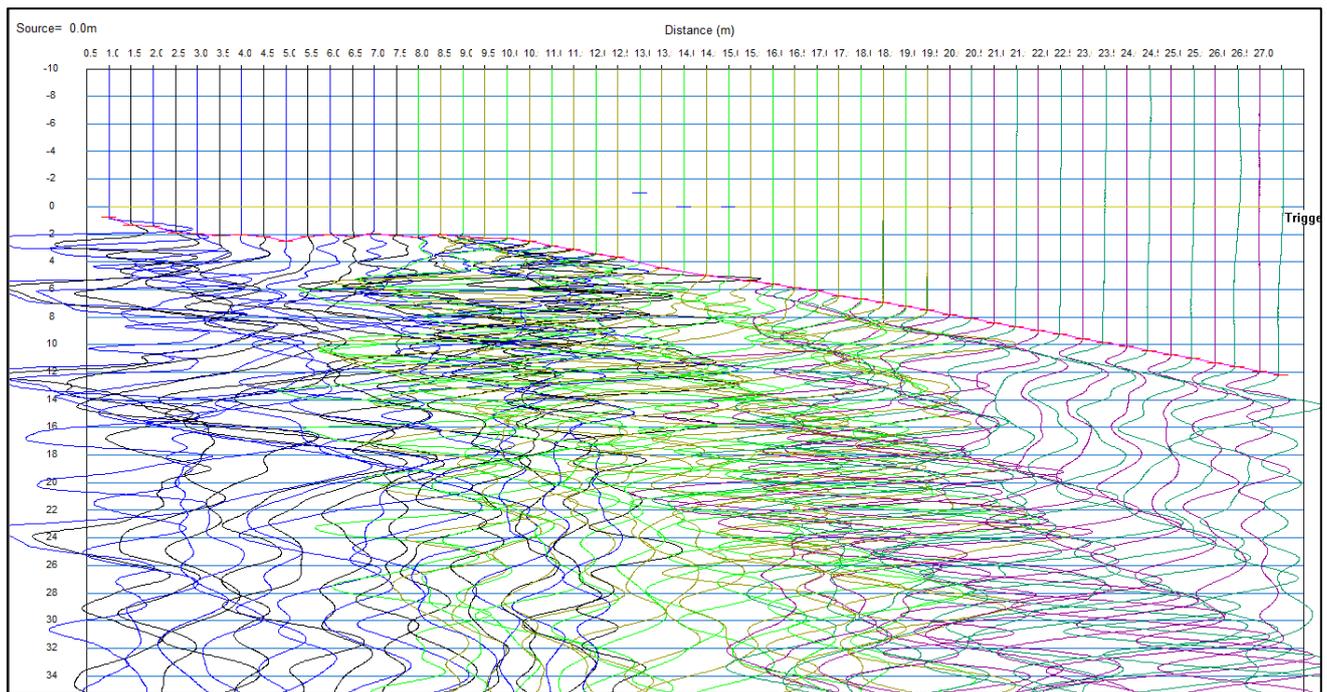


SPÉCIFICATIONS POUR L'ÉQUIPEMENT DU FORAGE

La longueur du forage doit être supérieure d'au moins 7 m à la longueur présumée de la fondation à contrôler.

Le diamètre de foration doit permettre la mise en place d'un tube en plastique indéformable de 50 mm de diamètre intérieur minimum. Les forages doivent être tubés avec un tube PVC rigide **scellé au terrain**. *Le couplage tube PVC-terrain (le scellement) est primordial et détermine la qualité des signaux. Le scellement annulaire doit être réalisé par une injection du coulis de ciment par le bas (par tube plongeur).*

Le tubage doit avoir un bouchon de pied et doit être étanche. Il doit être rempli d'eau claire.

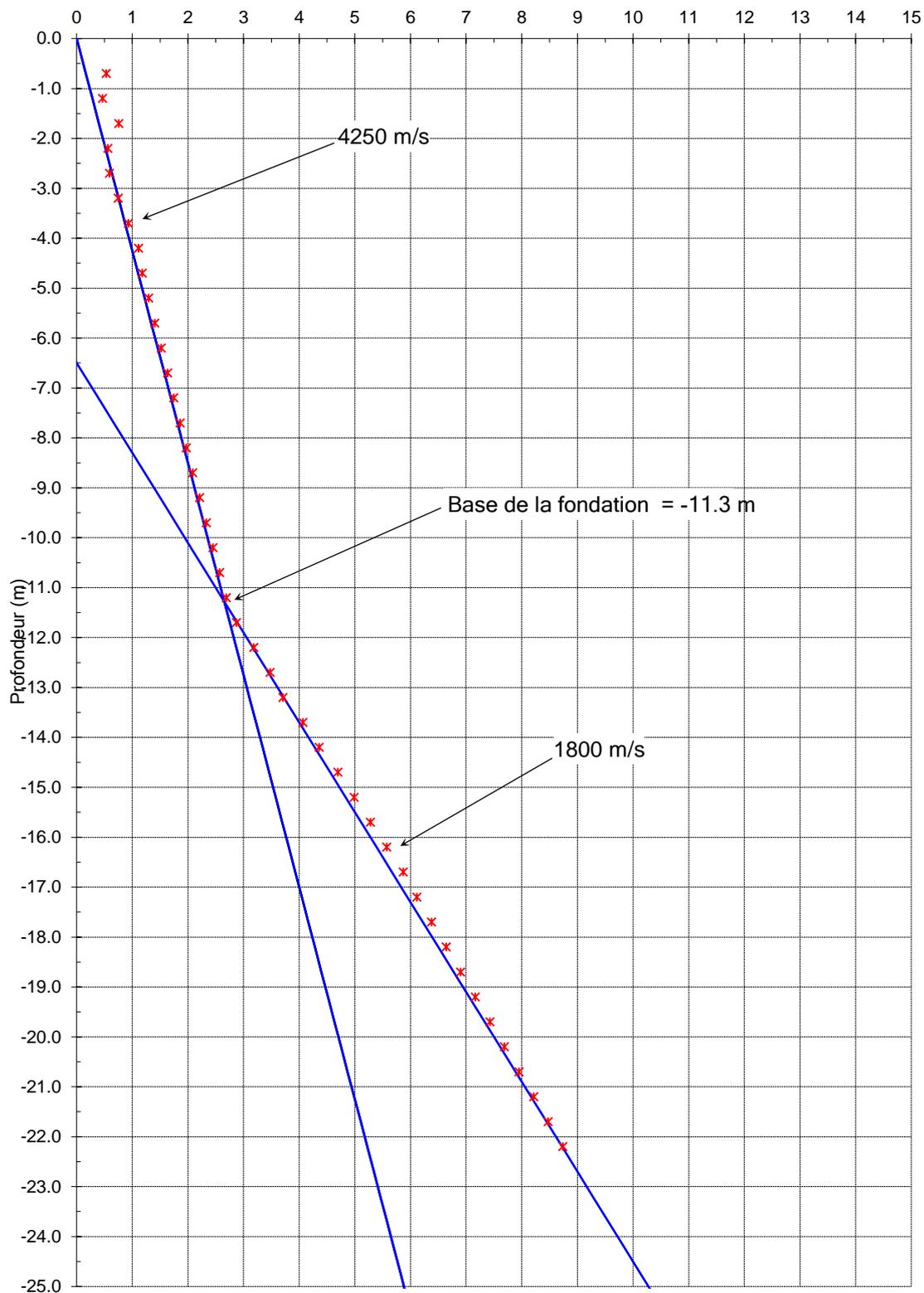


Exemple des signaux mesurés et pointés des arrivées premières.

Contrôle de pieu par méthode sismique parallèle

Pieu - Forage ASP1

Temps (ms)



RADAR HAUTE FRÉQUENCE

Le radar haute fréquence est l'outil idéal pour effectuer de manière précise, et en continu, des auscultations d'ouvrages

PRÉSENTATION

Le radar haute fréquence permet d'ausculter les parois, les revêtements de tunnel, les voiles, les planchers, les poteaux, les balcons, etc pour :

- Localiser le ferrailage (plan, enrobage)
- Localiser les anomalies (infiltrations, fissures, tuyaux oubliés, existence d'injections...)

PRINCIPE

Une antenne envoie à cadence élevée des ondes électromagnétiques dans l'ouvrage 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.

MÉTHODE D'ACQUISITION

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.

MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel de mesure utilisé par ME2i est constitué d'une antenne 1,6 GHz (profondeur d'investigation = 50 cm) ou 2,6 GHz (profondeur d'investigation = 30 cm) ayant un système d'acquisition intégré pour visualiser et enregistrer les radargrammes (films radar).



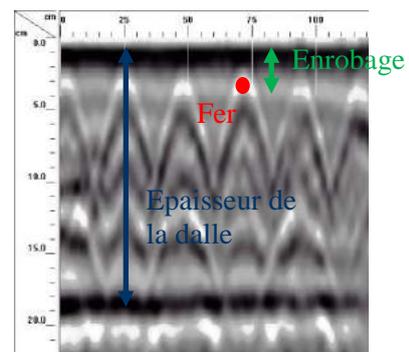
Antenne radar 1,6 GHz .



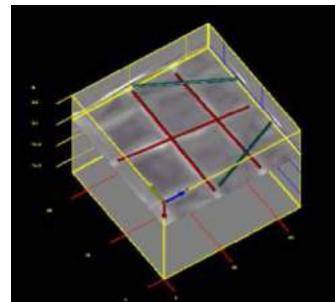
Mise en place de l'antenne.

TRAITEMENT DES DONNÉES

Les données radar sont traitées avec le logiciel Radan 7 qui permet d'afficher des radargrammes corrigés mais également d'établir un plan de ferrailage en 3D par exemple.



Exemple de radargramme où un ferrailage est visible



Exemple de bloc 3D pour visualiser le plan de ferrailage

APPLICATIONS

- Auscultation béton.
- Détection de canalisations (métal, béton).
- Localisation ferrailages.

RADIODÉTECTION

La radiodétection constitue un procédé géophysique léger et non destructif permettant de repérer et suivre des réseaux enterrés.

PRÉSENTATION

L'appareil de radiodétection utilise des signaux électromagnétiques afin de localiser et de suivre un réseau particulier.

MÉTHODE D'ACQUISITION

Il existe plusieurs modes d'acquisition :

- La méthode dite passive qui utilise l'émission de signaux électromagnétiques présents dans les conducteurs métalliques. Cette méthode est la moins précise et ne détecte que les réseaux conducteurs mais a l'avantage de ne nécessiter aucune émission électromagnétique de la part du sondeur.
- La méthode dite active par induction qui nécessite l'émission d'un signal électromagnétique par un générateur. Celui-ci est placé à proximité de la zone d'investigation et génère alors un signal qui sera induit sur tout conducteur métallique se trouvant à proximité.
- La méthode par raccordement direct qui s'effectue avec une pince émettrice et un piquet de terre pour fermer le circuit, le tout relié à un générateur. Ce dernier injecte un signal électrique le long du câble ou de la canalisation. Ce signal est facilement repérable avec le récepteur en surface et permet donc de suivre de manière précise le câble ou canalisation sur lequel on s'est branché. Cette méthode est la plus efficace mais nécessite de pouvoir se raccorder sur les réseaux.
- L'utilisation d'une aiguille détectable que l'on introduit dans le réseaux que l'on veut suivre. L'aiguille est couplée au générateur et émet un champ électromagnétique détectable par le récepteur RD 8000. L'ensemble du linéaire de l'aiguille introduite dans le réseau à suivre est alors détectable depuis la surface. De plus, le mode sonde de l'aiguille permet de localiser uniquement la sonde se situant au bout de celle-ci. Ce mode permet notamment de localiser l'extrémité d'un réseau ou son point de raccordement au réseau principal.

MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel de mesure utilisé par ME2i est un RD8000 PDL de SPX Radiodetection constitué des éléments suivants :

- Un récepteur RD8000
- Un générateur Tx-10 de puissance 10W.
- Pince émettrice.
- Une aiguille détectable de 50 ml.
- Des câbles de raccordement.
- Un piquet de terre

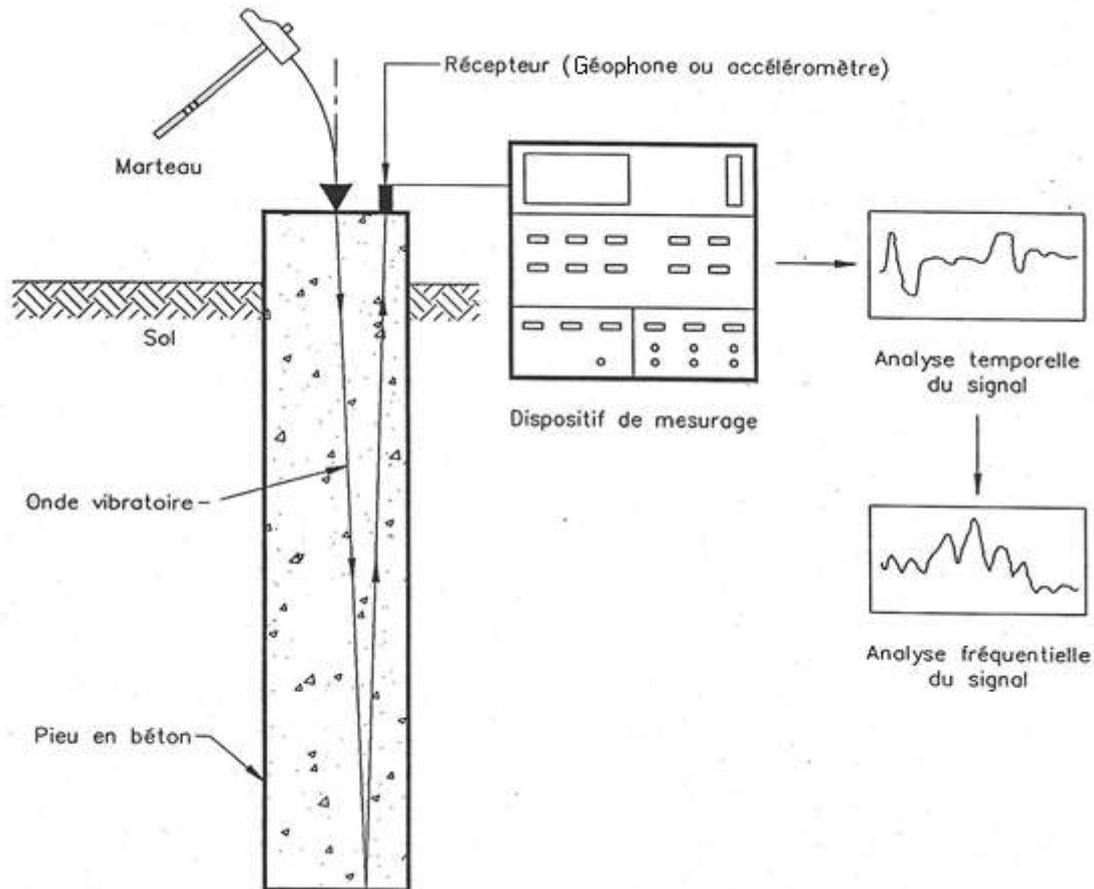


TRAITEMENT DES DONNÉES

Les réseaux localisés sont marqués à la bombe de couleur lors de la détection. Ils peuvent faire l'objet d'un report sur plan.

APPLICATIONS

- Cartographie de réseaux enterrés (électriques, pvc, télécommunication, assainissement).
- Localisation d'objet métalliques enterrés.

MÉTHODES PAR RÉFLEXION ET PAR IMPÉDANCE

Ces méthodes d'auscultation permettent d'apprécier la longueur d'un pieu et de détecter des anomalies en fonction de la célérité estimée des ondes planes dans le matériau constitutif.

La méthode par réflexion consiste à émettre un choc mécanique en tête du pieu et à mesurer à l'aide d'un récepteur l'amplitude de l'onde vibratoire induite par le choc. ME2i réalise cet conformément aux spécifications de la norme NF P 94-160-2 de novembre 1993.

La méthode par impédance est identique pour la mise en œuvre, mais utilise un marteau équipé d'un capteur de force pour l'émission du choc. En plus de l'amplitude de l'onde vibratoire de la tête du pieu, on mesure la force appliquée. ME2i réalise cet essai conformément aux spécifications de la norme NF P 94-160-4 de mars 1994.

En admettant que l'on connaisse la vitesse de propagation dans le pieu, on peut estimer la longueur de la fondation contrôlée.

Avantages :

- ♦ Rapidité des méthodes ;
- ♦ Facilité de mise en œuvre ;
- ♦ Bonnes méthodes de comparaison entre un grand nombre de pieux.

Inconvénients :

- ♦ Interprétation parfois délicate ;
- ♦ Précision insuffisante pour décider d'un refus de pieux sur un seul signal douteux.

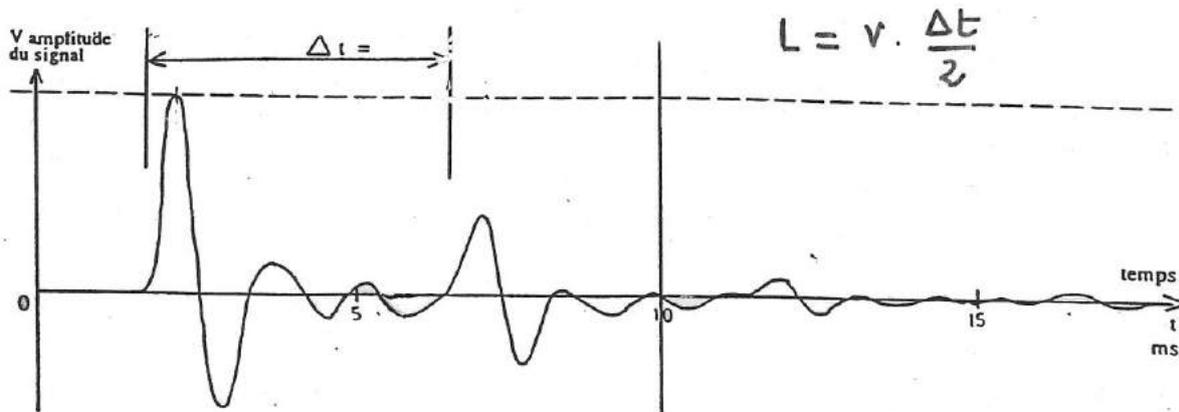
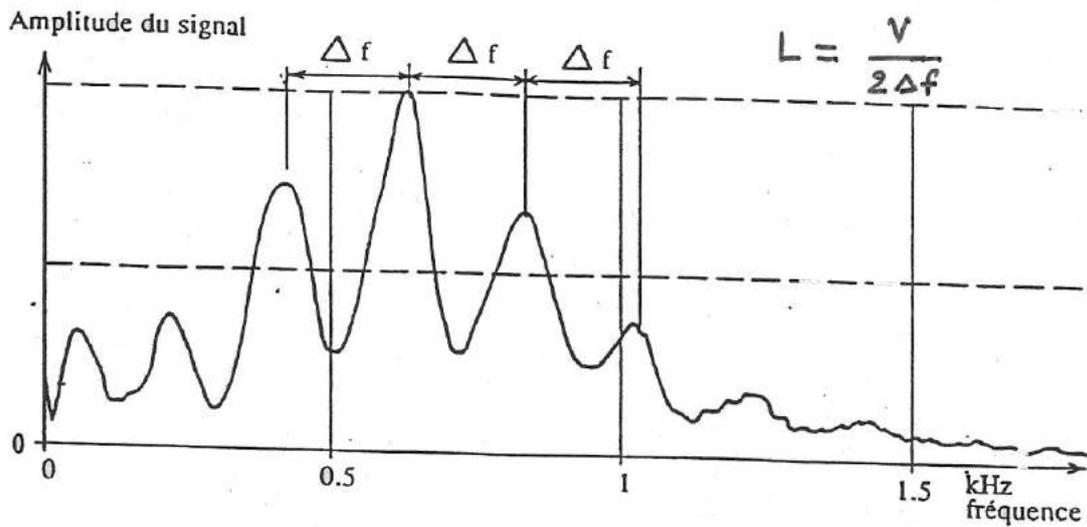


Figure 2a : Analyse temporelle — Amplitude du signal en fonction du temps
Norme NF P 94-160-2



Exemple de résultats méthode par réflexion

SÉCURISATION DE SONDAGES GÉOTECHNIQUES PAR MÉTHODES GEORADAR ET RADIODETECTION

Le but est de sécuriser des forages géotechniques en s'assurant de la non présence de réseaux ou d'objets enterrés au droit des sondages.

ME2i utilise la méthode géoradar et la méthode de radiodétection. Le matériel radar est composé d'un SIR4000 (ou SIR3000) de GSSI et de 2 antennes :

- ♦ Une antenne réseaux bi-fréquences 300MHz/800 MHz ayant une profondeur d'investigation de 2 m et de 5 m.
- ♦ Ou une antenne 400 MHz ayant une profondeur d'investigation de 2,5 m. Elle permet de localiser les réseaux et toute anomalie superficielle.
- ♦ En option, une antenne 200 MHz ayant une profondeur d'investigation de l'ordre de 7 m. Elle permet de localiser les anomalies de sol (objets, vides, obstacles...) sur la tranche de terrain comprise entre la surface et 7 m environ.

L'ensemble est monté sur un chariot équipé d'une roue codeuse permettant de déclencher l'acquisition des données et de mesurer la distance parcourue.

Les mesures seront réalisées suivant des profils longitudinaux et des profils transversaux distants de 1 m (figure 1). Les profils de mesures seront matérialisés sur le site le jour des essais.

Les mesures seront interprétées sur site et la validation ou le déplacement du point de forage sera décidé sur site le jour de la réalisation des essais, en accord avec le client.

Les mesures par méthode radar nécessitent que la surface du terrain soit dégagée de tout encombrant et obstacle (véhicules...) et sans végétation, car l'antenne doit être plaquée au sol pour une meilleure émission et réception des ondes.

Les points des sondages doivent être matérialisés sur le site avant notre intervention (piquets, marquage à la bombe...).

Le matériel de radiodétection est utilisé en complément du radar si nécessaire. La fiche technique ci-jointe décrit le principe de la méthode. ME2i soulèvera les tampons des chambres si EDF l'autorise pour vérifier les réseaux en place et utiliser la méthode de radiodétection.

La prestation comprend la rédaction d'un compte-rendu de mesures.

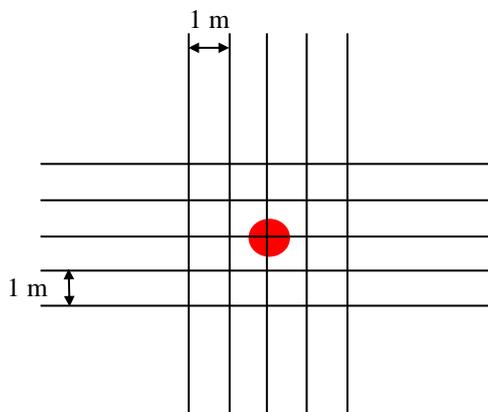


Figure 1 – Schéma de principe de mesure radar pour la sécurisation d'un forage. Le forage est matérialisé par le point rouge et les lignes noires sont les profils de mesure.

Radar SIR4000 et antenne 400 MHz montés sur chariot équipé d'une roue codeuse pour l'enregistrement de la distance parcourue.



Matériel de mesure radar : SIR4000 et antenne 200 MHz avec roue codeuse.



Matériel de mesure radar : SIR 4000 et antenne bi-fréquences 300 MHz/800 MHz avec roue codeuse.

Matériel de radiodétection.



SISMIQUE RÉFRACTION

La sismique réfraction utilise la propagation des ondes sismiques le long des interfaces géologiques. Cette méthode permet de déterminer l'état physique des diverses couches lithologiques composant le sol et d'obtenir une estimation de leurs épaisseurs. Elle est couramment utilisée pour déterminer la profondeur d'un substratum ou pour estimer l'état mécanique des roches (altérations, fissurations, fracturation).

PRÉSENTATION

Le principe de la sismique réfraction est d'envoyer un train d'ondes de type sonore dans le sol à l'aide d'une source (masse, fusil, explosif) puis d'enregistrer le retour en surface des ondes sismiques (ondes directes et ondes réfractées) à intervalle de distance régulier. L'onde de choc émise le long du profil se propage dans le sol et les vibrations induites sont captées puis converties en signal électrique par des géophones. Lorsque le train d'ondes atteint une couche ayant une densité plus importante, une partie de l'énergie est alors réfléchi. L'autre partie se propage au toit de la couche réfractrice (couche sous-jacente) quand le train d'onde atteint l'interface avec un angle dit angle critique (loi de Snell-Descartes) ; les ondes sont alors réfractées vers la surface. Les géophones disposés le long du profil vont alors enregistrer leurs arrivées. Le séismographe fournit les temps de propagation des ondes sismiques entre le point d'impact et les géophones du profil.

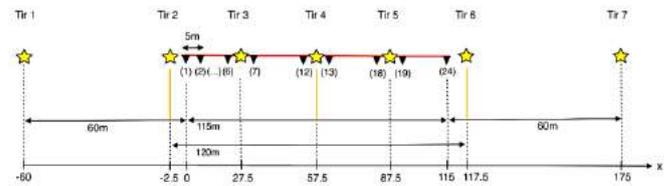
PRINCIPE

Les ondes de compression réfractées étant toujours les premières à atteindre les géophones, le pointé des temps des premières arrivées sur les enregistrements permet d'établir les dromochroniques (temps d'arrivées des premières ondes en fonction de la distance sur le profil) pour chaque tir. Leurs traitements aboutissent ensuite à la détermination des différents milieux traversés par les ondes, individualisés par leur épaisseur et leur vitesse sismique. Cette méthode est très bien adaptée aux cas de géométries subhorizontales et lorsque les formations présentent des contrastes marqués en terme de vitesse. Cependant, l'hypothèse de base de la sismique réfraction réside sur le fait que les vitesses des ondes P augmentent avec la profondeur. Ainsi, il est impossible de déterminer une couche possédant une vitesse faible sous une couche possédant une vitesse plus forte.

MÉTHODE D'ACQUISITION

Une acquisition classique comporte 5 tirs (2 offsets, 2 en bouts, 1 au milieu). Des tirs supplémentaires sont également nécessaires si le profil présente une topographie irrégulière (cuvette, talus) qui peut influencer le passage des ondes sismiques.

La géométrie d'un dispositif de mesure type (ici un profil de 115m de long) est présentée sur le schéma suivant :



Le nombre de géophones et l'espacement entre ceux-ci dépendent de la résolution et de la profondeur souhaitée. Les tirs sont en général réalisés à l'aide d'explosif de moyenne puissance (50 à 300g selon la situation). Pour les dispositifs courts (moins de 120 m), on peut utiliser une masse de 10 kg comme source.

MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel de mesure utilisé par ME2i est constitué des éléments suivants :

- ♦ 24 géophones verticaux (10 Hz).
- ♦ 2 flûtes sismiques de 12 traces chacune.
- ♦ 1 séismographe GEODE de marque *Geometrics*.
- ♦ 1 ordinateur de terrain permettant le pilotage du séismographe.
- ♦ 1 déclencheur (trigger) relié à la source sismique.



TRAITEMENT DES DONNÉES

La première étape du traitement consiste alors à pointer le temps des premières arrivées des ondes sismiques à chaque géophone et pour chaque tir, dont la géométrie a été précédemment renseignée.

La deuxième étape du traitement consiste, à partir des dromochroniques, à calculer l'épaisseur et les vitesses des couches en résolvant les équations des hodochrones. La méthode dite du *Plus-Minus* (Hagerdoon, 1959) permet d'établir des coupes sismiques. Elle comporte trois étapes :

La résolution de la fonction *Minus* permet de déterminer la vitesse de fond, c'est-à-dire celle du substratum.

La construction du *Plus* consiste à déterminer le délai sismique en chaque point de réception, généralement à partir des dromochroniques des deux tirs offsets qui passent au toit du substratum sain.

L'association de ces deux fonctions permet alors d'obtenir les variations du toit du substratum.

Les données sont traitées suivant cette méthode à l'aide des logiciels SeisImager/2D (*Geometrics*) et WinSism 13 (*Geo2X*). La figure suivante présente les dromochroniques issues du pointage des sept tirs d'un profil de 115 m de long ainsi que la coupe sismique obtenue.

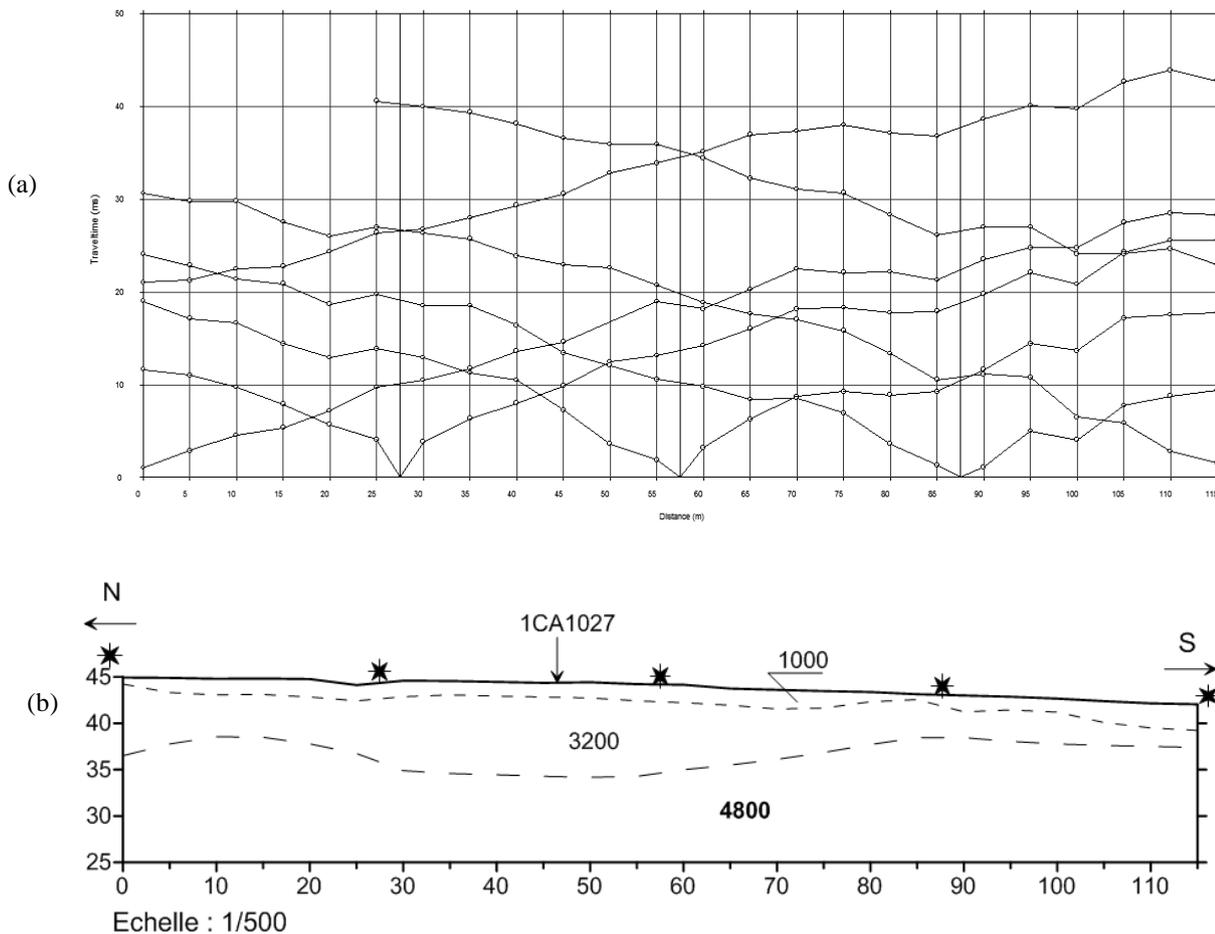


Figure 1 – (a) Dromochroniques obtenues après le pointage de tous les tirs d'un profil.
 (b) Coupe sismique 2D issue des dromochroniques en (a).

SONDAGE ELECTRIQUE

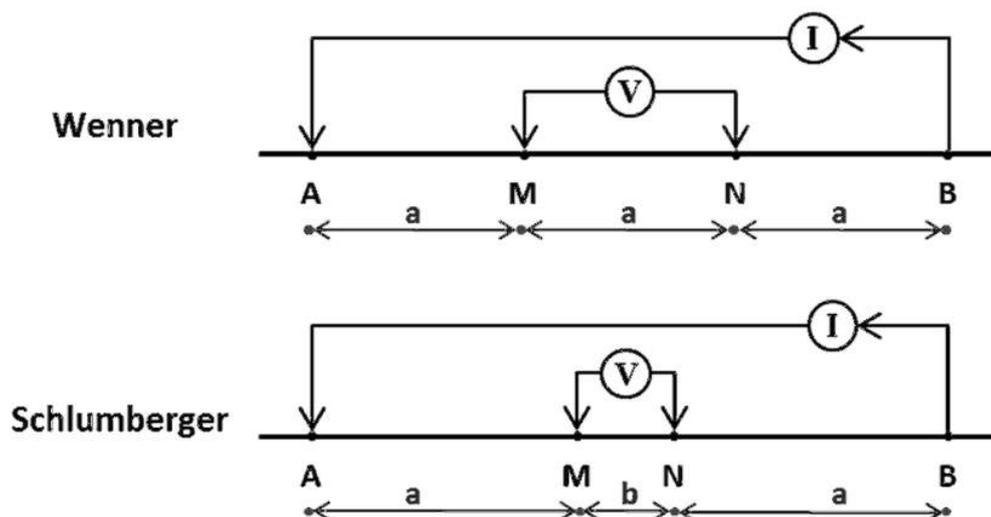
Principe : obtenir un log des résistivités des formations géologiques en place en un point donné.

Applications principales : stratigraphie-géologie, cavités et vides, structures enterrées...

Cette technique fait appel à la mesure de la *résistivité électrique* pour caractériser une formation du sous-sol. La résistivité est en effet très sensible à la nature minéralogique du milieu et à sa teneur en eau. On peut par conséquent distinguer les milieux les plus divers pourvu que le **contraste des résistivités soit assez étendu**.

Les mesures sont réalisées suivant un quadripôle d'électrodes dont la géométrie évolue au cours du temps (augmentation des espacements inter-électrodes dans un même plan sans déplacement du point central). La distance maximale entre les électrodes les plus éloignées (communément appelée distance AB) dépend directement de la profondeur à investiguer (en général, entre 4 et 5 fois la profondeur souhaitée).

Le protocole utilisée sera de type Schlumberger ou Wenner (figure ci-après).



La méthode électrique nécessite l'implantation d'électrodes (piquets métalliques inoxydables) dans le sol et la mise en place de câbles entre ces électrodes. Pour cela, le site doit être accessible et ne pas présenter d'obstacle à l'installation des dispositifs de mesure.

Les mesures sont réalisées par un ingénieur géophysicien, secondé par un technicien.

Les profils de mesure seront matérialisés sur le terrain, avant le commencement des relevés géophysiques.

ME2i utilise un LS 4 canaux de marque ABEM. Le système se compose d'un automate permettant la sélection physique des électrodes de mesure selon la configuration choisie et d'un ensemble pour la mesure à proprement dit, comprenant le contrôle de l'injection du courant et la mesure du potentiel.

La technique d'injection alternative à faible fréquence du courant permet de contrebalancer les effets perturbateurs de la P.S. (polarisation spontanée) sur la mesure du potentiel.

Les données sont traitées par les logiciels IX1D d'Interpex Limited avec calage sur les données géotechniques.

Les résultats sont présentés sous forme de log des résistivités apparentes au droit du point central du dispositif de mesure. La figure 2 montre l'exemple d'un résultat de sondage électrique.



Figure 1 - Matériel de mesures électriques

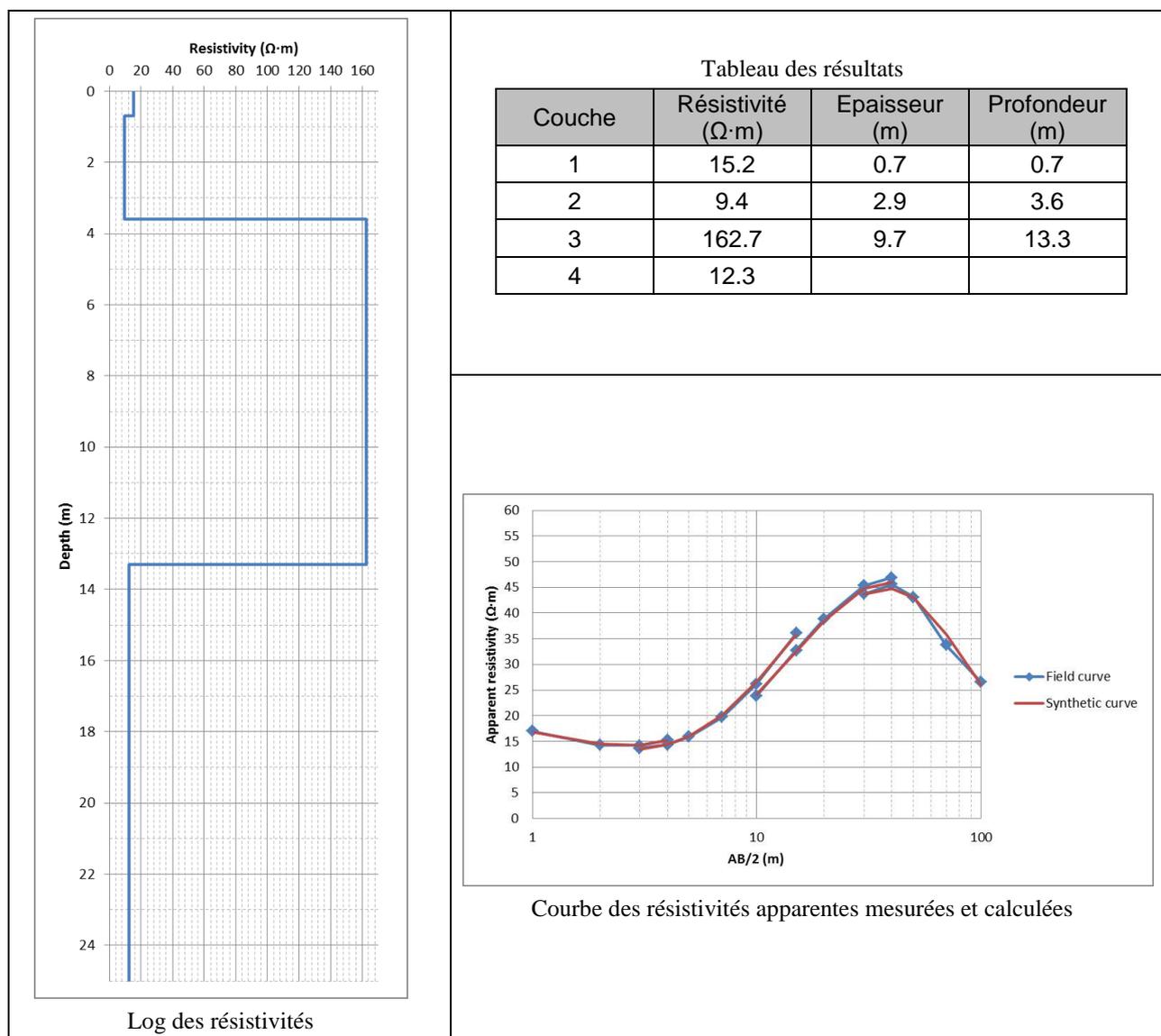


Figure 2 – Résultats d'un sondage électrique.

TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE

Les méthodes de prospections électriques permettent d'obtenir des informations sur la nature et la géométrie d'un terrain par interprétation de leurs résistivités électriques.

PRÉSENTATION

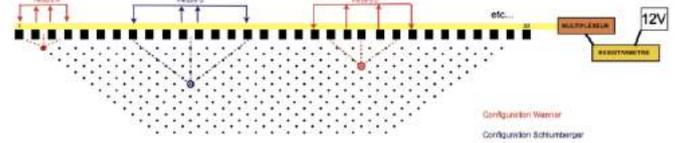
La résistivité ρ correspond à la capacité d'un milieu à s'opposer au passage d'un courant électrique. Cette propriété géophysique dépend essentiellement de la porosité des sols, paramètre lié à la taille et la répartition des grains constituant les sols. Ainsi, des sols très hétérogènes sont résistants, alors que des sols bien agencés de type argileux sont très peu résistifs. Cette particularité constitue l'avantage majeur des prospections géoélectriques, car il est possible d'identifier des variations infimes de la composition sédimentaire. La résistivité dépend également d'autres facteurs tels que la teneur en eau, la température ou encore l'état de fracturation des sols. Sa connaissance permet alors d'appréhender les structures et lithologies des formations sous-jacentes.

PRINCIPE

Les sondages par tomographie électrique consistent à mesurer en plusieurs points la différence de potentiel engendrée par l'injection d'un courant d'intensité connue dans le sol. Les différences de potentiel mesurées sur le terrain permettent ensuite de déterminer la résistivité apparente produite par les couches de sols sous-jacentes (loi d'Ohm). La valeur de la résistivité déduite est dite apparente, car elle prend en compte l'ensemble des contributions du volume de sol au-dessus du point de mesure. Afin d'obtenir un modèle des résistivités vraies des formations en place, il est alors nécessaire d'effectuer le traitement des données collectées en utilisant un processus d'inversion itératif.

MÉTHODE D'ACQUISITION

Le dispositif de mesure est constitué d'électrodes de réception et d'émission disposées en lignes et réparties selon un écart constant. Le résistivimètre sélectionne ensuite selon une séquence programmée, dépendant du protocole choisi, les électrodes utilisées pour l'injection du courant et celles utilisées pour la mesure du potentiel. L'écartement entre les électrodes d'injection et de réception permet de faire pénétrer le courant à des profondeurs variables dans le terrain. La figure suivante schématise les points de mesures obtenus par un protocole classique Wenner-Schlumberger.



MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel de mesure utilisé par ME2i est constitué des éléments suivants :



- Un résistivimètre TERRAMETER LS
- 2 flûtes de 32 électrodes.

TRAITEMENT DES DONNÉES

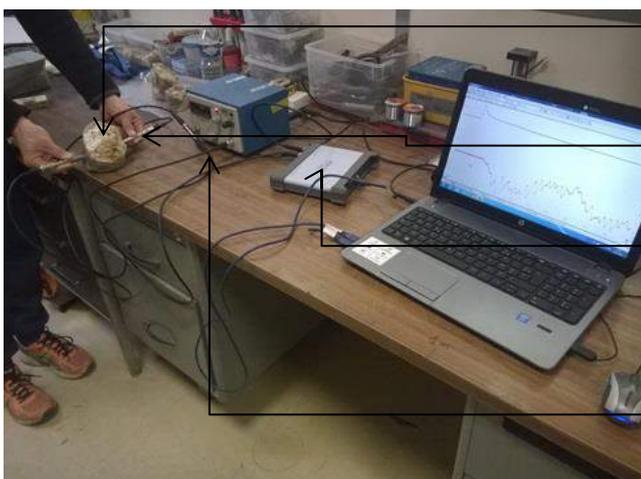
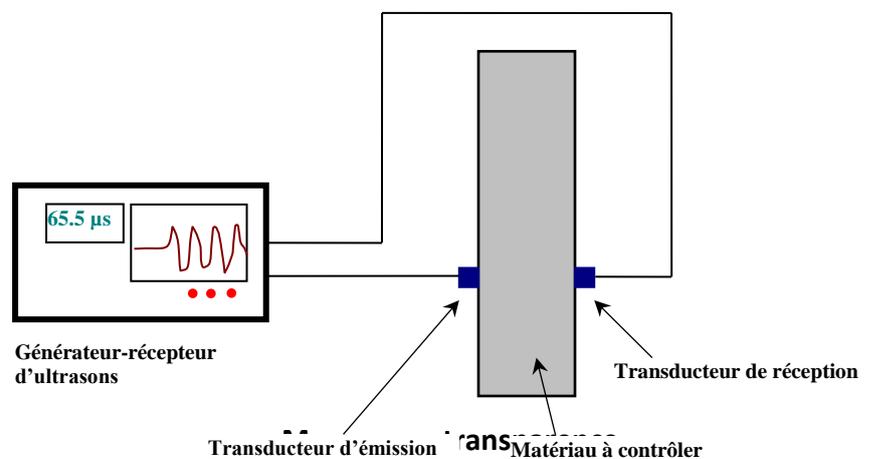
Les données sont inversées suivant l'algorithme développé par *Loke et Barker (1996)* contenu dans le logiciel Res2Dinv. Afin de représenter les mesures de différence de potentiel mesurées, le logiciel construit une coupe 2D des résistivités apparentes du terrain. Les résistivités vraies des formations sous-jacentes sont ensuite obtenues en résolvant le problème inverse. Le logiciel tente de déterminer un modèle de subsurface, c'est-à-dire de retrouver les résistivités vraies des terrains qui correspondraient le mieux aux résistivités apparentes mesurées.

Tout d'abord, un modèle initial est créé à partir des résistivités apparentes mesurées. Ensuite, à partir du modèle, l'algorithme calcule les valeurs des résistivités apparentes correspondantes. La pseudo-section obtenue est alors comparée avec celle déduite des mesures de terrain et le critère d'erreur est déterminé. L'algorithme utilise alors cette erreur afin de rajouter de l'information a priori au modèle. Le processus d'inversion poursuit ensuite ces étapes jusqu'à convergence du processus

MÉTHODE SONIQUE (DES ULTRASONS) POUR LE CONTRÔLE DE MATÉRIAU

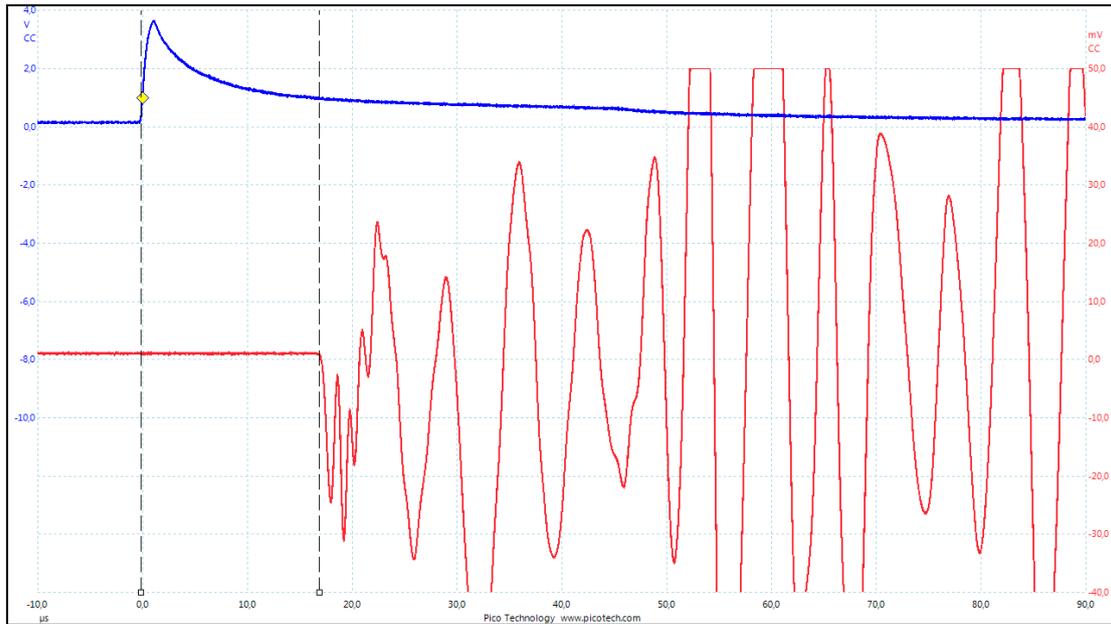
ME2i utilise la méthode des ultrasons ou sonique pour contrôler le matériau constitutif des structures : poteaux, murs, semelles, longrines, sol etc.

Le principe de la méthode est illustré par le schéma ci-après : le générateur d'ultrasons émet toutes les 100 millisecondes un pulse très étroit dépendant de la fréquence propre du transducteur. Le transducteur de réception reçoit ce pulse au bout d'un certain temps. Le temps de propagation mesuré (ou vitesse calculée) donne des indications sur la qualité du matériau ausculté.



- Echantillon
- Transducteurs
- Oscilloscope numérique
- Générateur – récepteur d'ultrasons

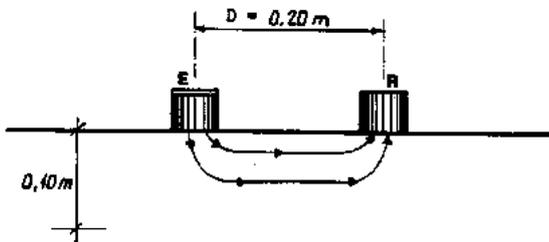
Matériel de mesure



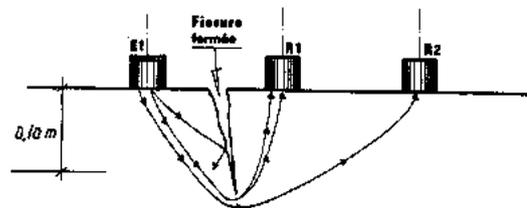
Exemple de signaux mesurés

QUELQUES EXEMPLES D'AUTRES APPLICATIONS

Situation normale (sans anomalie)



Existence d'une fissure en surface



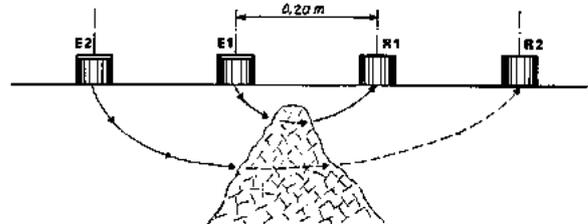
Le temps de propagation est allongé entre E1 et R1 : le signal peut-être interrompu par la fissure.

Zone désagrégée en surface



Elles sont bien visibles en surface sur les capteurs haute fréquence et sur des distances courtes : trajet E1-R1. Elles n'apparaissent pas sur les capteurs basse fréquence et les distances un peu plus longues.

Zone désagrégée en profondeur



Cette zone ne permet pas le passage de l'onde, même avec des capteurs basse fréquence, ou montrent des vitesses de propagation très faibles.

DOWN-HOLE UP-HOLE

Les essais Down-Hole et Up-Hole ont pour but de déterminer les modules dynamiques globaux du sous-sol. Ils ne remplacent pas les essais cross-hole, mais peuvent être utiles quand il est impossible de réaliser deux forages.

GÉNÉRALITÉS

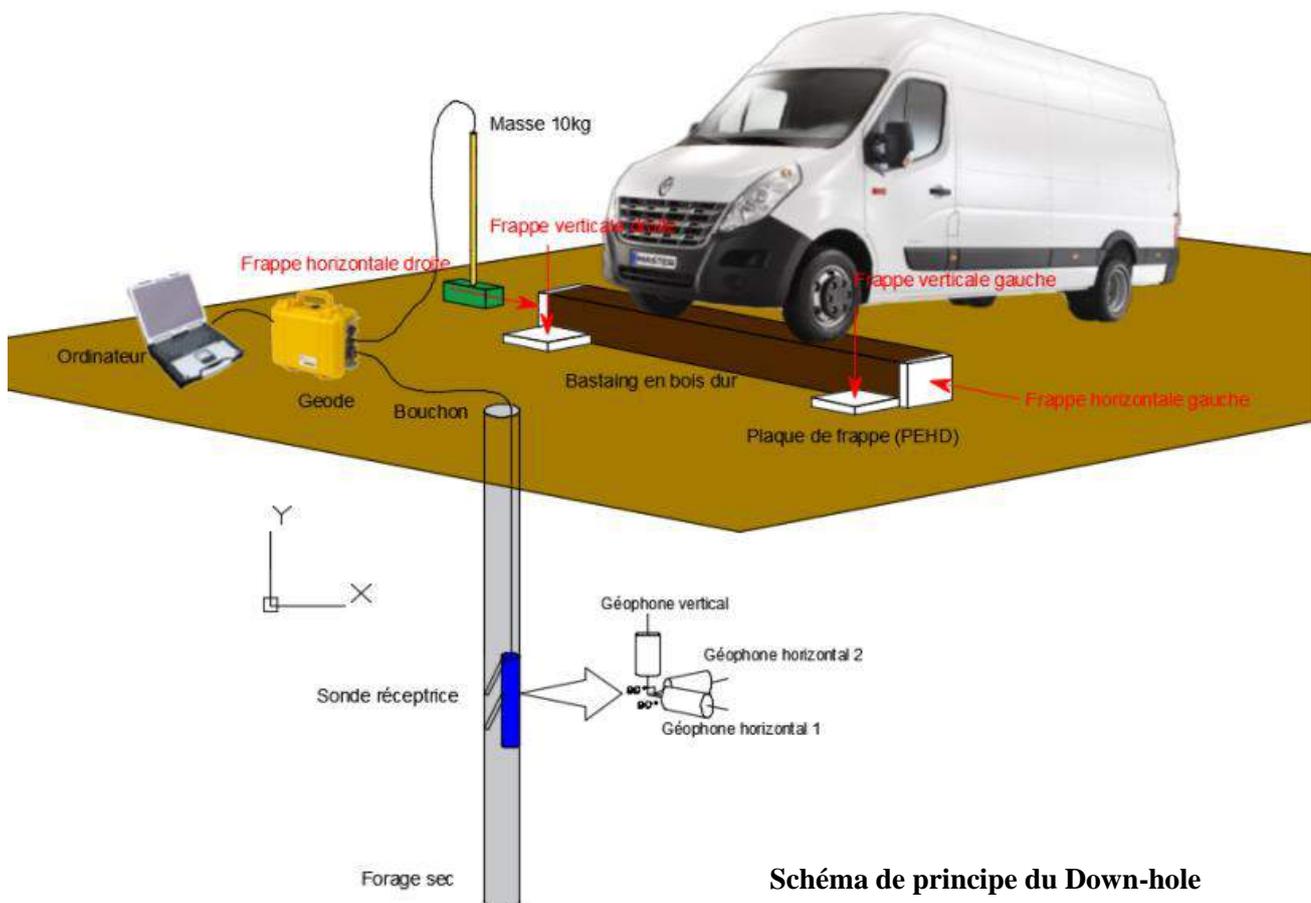
L'expression mathématique des paramètres dynamiques est une fonction, pour un matériau donné, de la masse volumique ρ (kg/m^3) et des vitesses de propagation des ondes sismiques de compression, ou onde P de vitesse V_p , et de cisaillement, ou onde S de vitesse V_s , exprimées en m/s. Ces ondes correspondent aux déformations de compression et de cisaillement du milieu élastique en faibles déformations. Les vitesses sont reliées par les paramètres dynamiques du milieu qui sont les suivants :

- ◆ Coefficient de Poisson : $\nu = (V_p^2 - 2 \cdot V_s^2) / 2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)$
- ◆ Module de compression (MPa) : $E = 2 \cdot \rho \cdot V_p^2 \cdot (1 + \nu)$
- ◆ Module de cisaillement (MPa) : $\mu = G = \rho \cdot V_s^2$

PRINCIPE

Le cross-hole consiste à exécuter des mesures de temps de propagation entre deux ou plusieurs forages. Dans certains cas, il n'est pas possible de réaliser plusieurs forages ou on préfère avoir des résultats moins précis mais plus nombreux; dans ce cas on utilise le down-hole ou le up-hole. Les deux méthodes ne diffèrent que par le sens de propagation de l'onde :

- ◆ down-hole : l'onde est produite par un choc en surface et enregistrée par une sonde en profondeur.
- ◆ up-hole : l'onde est produite par un marteau installé dans le forage et reçue par un capteur en surface.



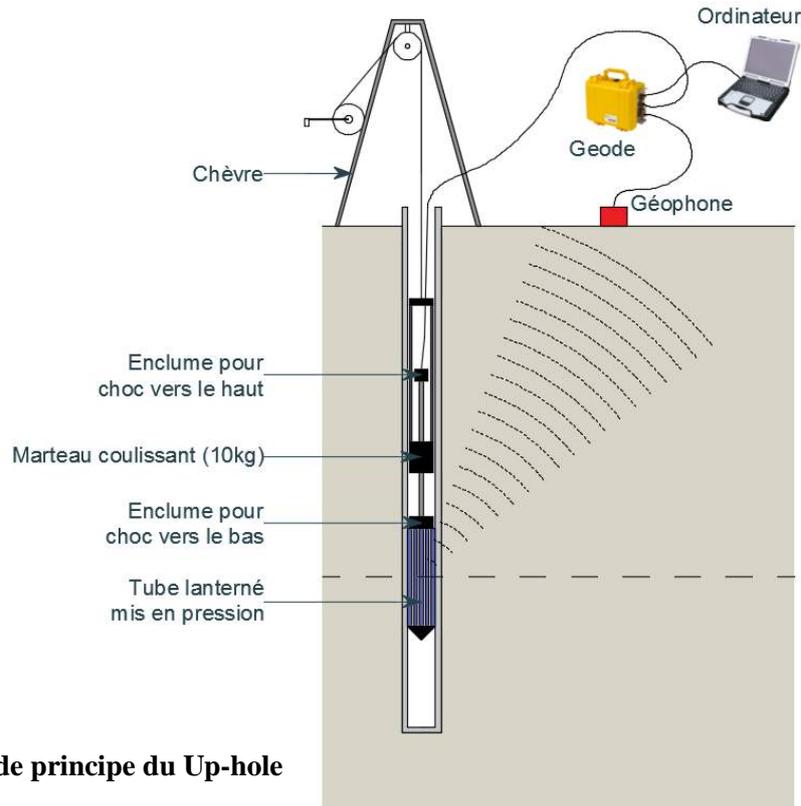


Schéma de principe du Up-hole

Les signaux à l'émission et à la réception sont enregistrés simultanément. La détermination des temps de propagation des ondes P et S entre le point d'émission et de réception permet d'estimer les vitesses des ondes P et S, connaissant les distances séparant les points d'émission et de réception. Dans tous les cas, les résultats sont nettement moins précis que ceux du cross-hole.

MATÉRIEL DE MESURE

Le matériel de mesure utilisé par ME2i est constitué des éléments suivants :

- ◆ Sondes émettrices réversibles (chocs vers le haut et vers le bas) équipées de capteurs pour le pointé de l'origine des temps. La masse de 10 kg coulisse sur une tige de 1,21 m de long.
- ◆ sonde émettrice pour forages obliques et horizontaux.
- ◆ sondes réceptrices équipées de capteurs triaxiaux (géophones ou accéléromètres).
- ◆ enregistreur numérique pour la mesure et le stockage des signaux ;

FORAGES

Les résultats des mesures down-hole (ou up-hole) dépendent avant tout du **tubage** et de la qualité du **scellement**. Le couplage tube PVC-terrain **est primordial** et détermine la qualité des signaux. Le tube doit avoir un bouchon de pied et être couplé au terrain par un scellement annulaire réalisé par une injection du coulis de ciment par le bas (par tube plongeur);

VIBRATIONS

MESURES, EXPERTISES ET DIAGNOSTICS

Les vibrations dans les terrains et les structures créent des sollicitations dynamiques transitoires ou permanentes dont les effets, s'ils ne sont pas contrôlés et limités, peuvent porter préjudice à l'environnement : individus, bâtiment, ouvrages, installations et équipements divers...

Les mesures permettent d'appréhender ces risques. Elles fournissent les éléments nécessaires pour caractériser l'influence de ces vibrations.

ME2i utilise les matériels les plus récents pour la réalisation des mesures et des traitements des données, suivant les procédures les plus avancées et conformément aux différentes normes en vigueur.

MÉTHODOLOGIE

Les principaux paramètres qui définissent une oscillation vibratoire sont : la fréquence, l'amplitude des déplacements (ou vitesse particulière ou accélération) et la durée.

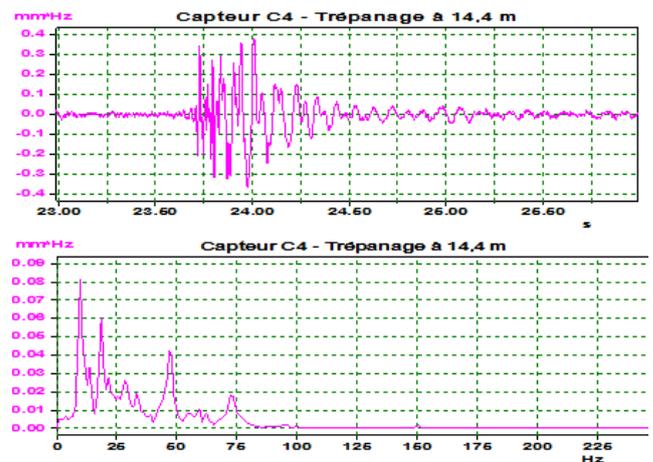
Les mesures sont réalisées en plusieurs points avec des capteurs adaptés au phénomène étudié. Elles permettent d'évaluer les niveaux vibratoires existants qui sont comparés à des critères ou seuils prédéfinis comme par exemple dans le cas :

- de l'étude de l'impact sur les individus ;
- de la réalisation d'une structure antivibratile ou du dimensionnement d'un massif supportant un appareil sensible;
- de l'analyse de l'effet de travaux sur des installations ou structures sensibles ;
- de l'étude des réponses de structures (bâtiments, ouvrages d'art, machines ...) aux vibrations.

CHAÎNE DE MESURE ET DE TRAITEMENT

L'ensemble du matériel utilisé par ME2i répond parfaitement aux spécifications des normes en vigueur. Les différents appareils sont contrôlés et étalonnés régulièrement. La chaîne de mesure se compose de capteurs de vitesse particulière très basse fréquence et de haute sensibilité (géophone), de capteurs d'accélération (accéléromètres), de capteurs de déplacement, de centrales d'acquisition numériques multivoies équipées d'amplificateurs et de filtres, et d'analyseurs de spectres.

ME2i utilise plusieurs logiciels pour le traitement des mesures et l'édition des résultats. Plusieurs types de traitement sont disponibles : filtrage numérique, découpage de signaux, calcul de la transformée de Fourier, calcul de la transformée de Wigner-Ville, calcul des fonctions de réponse en fréquence, calcul des valeurs efficaces, intégration et dérivation d'un signal...



APPLICATIONS

- Exposition des individus aux vibrations ;
- Exposition des équipements aux vibrations (ordinateurs, instruments de précision, objets d'art, machine-outil...);
- Comportement des structures sous sollicitations dynamiques (bâtiments, ouvrages d'art, monuments historiques ou classés...);
- Contrôles du dimensionnement de structures antivibratiles ;
- Propagation et atténuation des vibrations dans les sols et formations rocheuses ;
- Surveillance en continu des vibrations ;
- Conseil en mesure, expertises, diagnostics et formation.



Excitation de pieu