

Caractérisation d'un sol grossier naturel, apport des méthodes géophysiques

Étienne REY

Géolithe SA, Crolles, France

Philippe GOTTELAND*

*L3S-R, Grenoble université Recherche,
Grenoble, France*

Stéphane GARAMBOIS

Denis JONGMANS

*LGIT, Grenoble université Recherche,
Grenoble, France*

*(Travail réalisé au sein du Lirigm,
université Joseph Fourier, Grenoble, France)*

■ RÉSUMÉ

La caractérisation des sols grossiers naturels par les méthodes géotechniques traditionnelles est rendue très difficile par la présence d'hétérogénéités de grandes dimensions. Les méthodes géophysiques apparaissent comme une alternative intéressante aux essais géotechniques *in situ*. L'objectif de cette étude est de préciser l'apport des mesures de type électrique et sismique et d'en tester l'applicabilité en conditions réelles. La mesure de la vitesse des ondes de cisaillement dans un terrain hétérogène, par inversion des ondes de surface, permet d'estimer la composition du terrain. La résistivité électrique présente une très large gamme de variation et s'avère très sensible à la présence d'inclusions résistives au sein d'un matériau à matrice plus conductrice. De plus, des simulations par éléments finis montrent que la résistivité électrique effective d'un milieu hétérogène bi-composant (matrice et inclusions) permet d'évaluer la concentration des inclusions contenues dans le milieu. Un sol grossier naturel a été caractérisé en associant géophysique et géotechnique. Le pourcentage de blocs calcaires présents dans le sol à matrice argileuse a pu être estimé et s'est avéré être en bon accord avec la granulométrie du sol mesurée directement.

Characterization of a natural coarse soil:
Contribution of geophysical methods

■ ABSTRACT

The characterization of natural coarse soils using conventional geotechnical methods has been complicated to a considerable extent by the presence of large-sized heterogeneities. Geophysical methods would appear to be an attractive alternative to in situ geotechnical tests. The objective of this study is to specify the contribution of both electrical and seismic type measurements and to test their applicability under actual operating conditions. Measuring shear wave velocity within a heterogeneous soil, by means of surface wave inversion, enables estimating the soil composition. Electrical resistivity displays an extremely broad range of variation and is highly sensitive to the presence of resistive inclusions in a material with a more conductive matrix. In addition, finite element simulations reveal that the effective electrical resistivity of a two-component heterogeneous medium (matrix and inclusions) serves to evaluate the concentration of inclusions contained in the medium. A natural coarse soil was characterized by associating geophysics with geotechnics. The percentage of limestone blocks present in the clayey matrix soil could be estimated and proved in good agreement with the particle size distribution of directly-measured soil.

*** AUTEUR À CONTACTER :**

Philippe GOTTELAND

philippe.gotteland@hmg.inpg.fr

INTRODUCTION

Les essais géotechniques classiques sont généralement inopérants pour caractériser les sols hétérogènes grossiers (éboulis, moraines, alluvions grossières, cônes de déjection...) dès lors que ceux-ci contiennent des éléments de dimension déci à pluri-décimétrique.

In situ, la nature ponctuelle des essais mis en œuvre est inadaptée à l'hétérogénéité des matériaux grossiers étudiés, chaque essai pouvant affecter au hasard une zone meuble ou une zone de blocs. Un essai de pénétration dynamique, ou *a fortiori* statique, est en effet facilement stoppé par la présence d'un bloc de taille décimétrique. Les essais nécessitant la réalisation préalable d'un forage, tels que le pressiomètre ou le phicomètre [1], sont en pratique limités à des tailles de blocs de l'ordre de 150 mm (norme NF P 94-120, [2]).

Au laboratoire, les essais de caractérisation mécanique sur des matériaux grossiers réalisés au triaxial [3-6] ou à la boîte de cisaillement direct [7-9] ont souligné la nécessité d'utiliser des appareils de dimension nominale au minimum 10 fois supérieure au D_{max} du matériau testé. En pratique, cette condition limite ce type d'essais à des matériaux comportant des éléments de diamètre 100 mm. En d'autres termes, lorsque la dimension des plus gros éléments excède 100 à 150 mm, le volume élémentaire représentatif (V.E.R.) du sol devient beaucoup trop important (norme NFP 94-056, [10]) pour les dispositifs d'essai classiques.

Dans ce contexte, les méthodes géophysiques, utilisées simultanément, non intrusives et capables de caractériser un grand volume de sol, constituent une alternative intéressante aux essais géotechniques *in situ*. Leur rapidité de mise en œuvre, alliée à un coût relativement modéré, peut permettre une caractérisation des matériaux hétérogènes sur une surface étendue, ainsi qu'éventuellement une détection des variations latérales à l'échelle du site. Si les méthodes géophysiques ne permettent pas d'accéder directement aux propriétés mécaniques du sol en grande déformation, des corrélations existent entre les paramètres géophysiques et géotechniques [11, 12].

Des études récentes concernant l'homogénéisation des sols hétérogènes par la méthode d'inversion des ondes de surface [13, 14] ou par la tomographie électrique [15] montrent qu'il est *a priori* possible, grâce à ces deux méthodes, d'estimer la composition d'un sol hétérogène bicomposant uniquement à partir de mesures géophysiques. Afin de tester l'applicabilité de ces méthodes électriques et sismiques en conditions réelles, une campagne de mesures associant géophysique et géotechnique a été menée sur un site de la région de Grenoble. Des mesures électriques et sismiques ont été réalisées selon plusieurs profils géophysiques permettant une investigation du sol sur une profondeur d'environ 3 à 4 mètres. Le prélèvement et l'analyse d'échantillons de sols situés à l'aplomb de ces profils ont permis de comparer la granulométrie réelle des dépôts avec les informations déduites de leurs propriétés géophysiques.

MATÉRIAUX

Un site expérimental ayant fait l'objet d'études géotechniques antérieures afin de définir les modalités de réemploi du matériau comme remblai a été étudié par différentes méthodes géophysiques (électrique, sismique, radar). Le cône de déjection du torrent Manival (figure 1a) se situe dans la vallée du Grésivaudan (environ 15 km au NE de Grenoble), en bordure Est du massif de la Chartreuse. Deux formations géologiques principales composent la partie active du bassin versant du torrent (figure 1b) et sont à l'origine des dépôts grossiers du cône de déjection (figure 1c). Les blocs centimétriques à décimétriques sont produits par la désagrégation mécanique des calcaires marneux du Séquanien, tandis que la matrice limono-argileuse a pour origine l'altération des marnes de l'Argovien. Les dépôts étudiés ont donc une granulométrie très étendue et sont relativement hétérogènes puisqu'ils contiennent simultanément des particules limono-argileuses et des blocs calcaires décimétriques.

Les courbes granulométriques (figure 2) sont donc issues d'échantillons ayant des volumes relativement réduits (2-3 m³, soit 30 à 50 kN). Le faisceau granulométrique est relativement homogène, avec un léger décalage vertical des courbes dû à la présence de blocs de masse importante en proportion variable, d'où une non-représentativité des échantillons. En effet, compte tenu de la dimension des plus gros blocs observés en surface ($D_{max} = 800$ mm), le prélèvement d'une masse de sol représentative est impossible (masse supérieure à 250 t selon la norme géotechnique NFP 94-056).

figure 1

a : Vue générale du torrent Manival.
b : Partie active du bassin versant.
c : Zone de dépôts principale (ZDP) dans laquelle sont localisés les profils géophysiques (P0a ; P1 à P4 ; cf. **figure 3**).

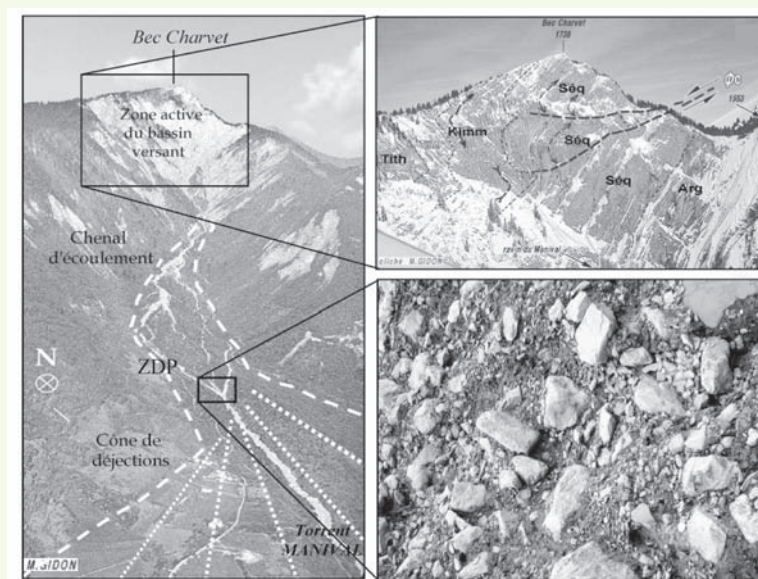
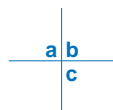
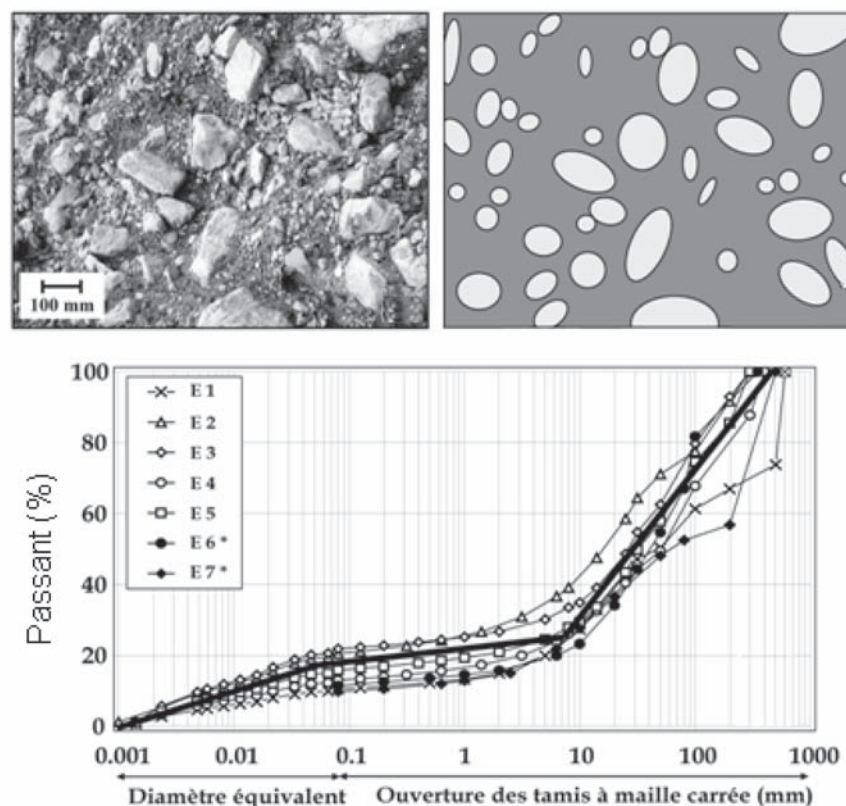
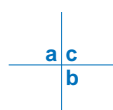


figure 2

a : Dépôts du cône de déjection du torrent Manival.
b : Distributions granulométriques obtenues par tamisage et sédimentométrie sur 5 échantillons (les courbes E6* et E7* sont issues de travaux antérieurs). La courbe schématique est représentée en trait gras.
c : Représentation du sol comme un matériau bicomposant où co-existent des blocs rocheux (en blanc) et une matrice fine limono-argileuse (en gris).



Outre l'étalement de la granulométrie, ces résultats montrent une répartition discontinue (quasi-bimodale) de la taille des grains. Le net radoucissement de la pente (palier) observé sur les courbes granulométriques cumulées entre 0,08 et 5-10 mm traduit la quasi-absence d'éléments de ce diamètre. Cette caractéristique permet de considérer ce sol comme un milieu hétérogène bicomposant où une fraction fine inférieure à 0,08 mm (matrice) et des blocs de taille supérieure à 5-10 mm (inclusions) coexistent.

MÉTHODES D'ÉTUDE¹

Après une phase préliminaire de reconnaissances géophysiques sur le site, la démarche expérimentale adoptée a consisté à définir quatre profils géophysiques (P1 à P4) dans la partie supérieure du cône de déjection (**figure 1a**), au niveau de la plage de dépôts principale (ZDP) destinée à stocker les matériaux arrachés au bassin versant lors d'événements orageux provoquant des laves torrentielles. Des mesures électriques et sismiques ont été réalisées sur chacun des profils ainsi définis. Le terrain a ensuite été excavé pour permettre de visualiser le sol selon une coupe verticale à l'aplomb de chaque profil. Cinq échantillons (de volume 2 à 3 m³) ont été prélevés en différents points dans la tranche de profondeur 0-3 m étudiée. Par quartages et fractionnements successifs, une masse représentative de la fraction 0/50 mm (supérieure à 20 kg selon les prescriptions normatives) a été isolée puis ramenée au laboratoire pour analyse granulométrique complète (tamisage et sédimentométrie). Les résultats ont permis de comparer la distribution granulométrique réelle avec les informations déduites de la géophysique (**figure 2b**).

■ Tomographie électrique

Parmi les propriétés géophysiques facilement mesurables, la résistivité électrique présente un large éventail de valeurs entre les différents matériaux naturels, variant de quelques $\Omega \cdot m$ dans le cas d'argiles ou de sols pollués, à plus de $10^4 \Omega \cdot m$ pour des roches massives telles que le calcaire ou le granite [16]. Si elle n'est pas directement liée aux propriétés mécaniques du sol, la résistivité électrique d'un matériau hétérogène s'avère cependant très sensible à la présence des hétérogénéités résistives qu'il contient [17, 18].

La méthode la plus couramment utilisée pour mesurer la résistivité d'un sol est la tomographie électrique [19, 20]. Cette technique consiste à planter une série d'électrodes équidistantes le long d'un profil puis à effectuer une séquence de mesures en combinant les électrodes 4 à 4 (quadripôles). On obtient alors une coupe en résistivité apparente du terrain étudié. Lors de travaux récents, Rey *et al.* [15] ont montré par des simulations numériques avec le code d'éléments finis CESAR-LCPC [21, 22] que la tomographie électrique permettait d'« homogénéiser » un sol hétérogène, c'est-à-dire d'accéder à sa résistivité effective ρ^* (appelée encore homogène équivalente) en moyennant directement les valeurs de résistivité apparentes de la pseudo-section [23]. Dans la mesure où le sol hétérogène peut être représenté par des inclusions isolées (de résistivité ρ_i), dispersées aléatoirement dans une matrice plus conductrice (de résistivité ρ_M), la mesure de cette résistivité effective ρ^* nécessite un espacement inter-électrodes (dispositif Wenner- α) supérieur ou égal à 8 fois le rayon des inclusions résistives contenues dans le sol. Les résultats de ces simulations numériques ont mis en évidence le lien existant entre la concentration C en inclusions résistives et ρ^* , en accord avec la relation d'homogénéisation proposée par Bussian [24] :

$$C = \frac{\left(\frac{\rho_M}{\rho_i} \right) \left(\frac{\rho^*}{\rho_M} \right)^{(m-1)/m} - \left(\frac{\rho^*}{\rho_M} \right)^{-1/m}}{1 - \left(\frac{\rho_M}{\rho_i} \right)} \quad (1)$$

Le coefficient m , appelé facteur de cimentation, représente l'arrangement géométrique des inclusions. Dans le cas d'une dispersion tridimensionnelle aléatoire, ce facteur prend une valeur égale à 1,5 [17, 25] et l'équation (1) permet d'estimer la composition d'un sol hétérogène connaissant sa résistivité effective ρ^* et les résistivités de chacun de ses constituants (ρ_i, ρ_M).

■ Inversion des ondes de surface

L'inversion des ondes de surface est une méthode géophysique qui permet aussi d'évaluer la composition d'un sol hétérogène. Les ondes de Rayleigh, qui se propagent à la surface du terrain, affec-

¹ la liste des symboles se trouve en fin de document

tent une profondeur d'autant plus grande que leur fréquence est basse. La vitesse de propagation des ondes de surface est donc fonction de leur fréquence et des propriétés élastiques des terrains rencontrés dans le sous-sol. L'inversion des ondes de surface permet d'obtenir des profils verticaux de vitesse en ondes S [26]. Comme la tomographie électrique, cette méthode est intéressante pour caractériser les sols difficiles à échantillonner [27]. Des simulations numériques réalisées par Chammas *et al.* [13, 14] ont montré en effet que les ondes de Rayleigh étaient bien adaptées pour déterminer la vitesse effective (ou homogène équivalente) V_s^* d'une couche hétérogène de sol formée d'inclusions rigides (vitesses V_{PP} , V_{SI}) réparties aléatoirement dans une matrice souple (vitesses V_{PM} , V_{SM}). La vitesse effective V_s^* , obtenue numériquement par inversion des ondes de surface, augmente en fonction de la concentration en inclusions rigides. Ceci est en cohérence avec la théorie d'homogénéisation du « multiple-scattering » fondée sur les modules élastiques des matériaux, selon laquelle :

$$A \left(\frac{\mu^*}{\mu_M} \right)^2 + B \left(\frac{\mu^*}{\mu_M} \right) + D = 0 \tag{2}$$

où les coefficients A, B et D sont fonction des vitesses sismiques V_{SI} , V_{PP} , V_{SM} et V_{PM} , des masses volumiques ρ_i et ρ_M et de la concentration volumique en inclusions rigides C dans le milieu (voir formulation détaillée dans [27] et développements de Chammas [14]).

RÉSULTATS

■ Mesures électriques

Des mesures de résistivité électrique (ρ^*) ont été d'abord effectuées le long des profils P1, P2 et P4 (figure 3), d'une part par tomographie électrique et d'autre part avec une méthode électromagnétique inductive, ces deux méthodes permettant d'accéder à la résistivité du sol [18]. Les mesures de tomographie ont été réalisées avec 32 électrodes par profil et une équidistance égale à 0,80 m. Cet espacement, égal au D_{max} du matériau étudié (0,80 m), permet de discerner rapidement les mesures ne respectant pas la condition d'homogénéisation requise $a \geq 8R_{max}$ [15]. L'appareillage utilisé *in situ* est un résistivimètre Syscal R1+ (Iris Instruments). Les mesures électromagnétiques inductives (Geonics EM31-D) ont été effectuées tous les mètres. Elles ne nécessitent pas d'installation de matériel *in situ* et intègrent directement la résistivité du terrain sur les 3 à 6 premiers mètres de profondeur. L'avantage de cette dernière méthode est sa rapidité ainsi qu'une intégration spatiale directe de la résistivité apparente sur la tranche de sol étudiée.

Les résultats (figure 3, tableau 1) montrent des valeurs très proches des résistivités quelle que soit la méthode utilisée, malgré quelques variations sur le profil P4. À l'échelle du site, la valeur moyenne de résistivité est identique avec les deux méthodes de mesures, soit 182 $\Omega.m$.

Afin de pouvoir interpréter ces valeurs de résistivité en terme de composition du sol, des mesures électriques ont été ensuite réalisées sur chacun des composants du sol hétérogène (blocs calcaires et matrice limono-argileuse). Le même matériel que précédemment a été utilisé à deux échelles différentes : celle des affleurements (échelle métrique) et celle des échantillons (échelle centimétrique). Les mesures ont fourni des résultats comparables.

tableau 1
Résistivité effective ρ^*
($\Omega.m$) mesurée sur chaque
profil. L'incertitude
représente deux écarts-
types sur chaque
population de mesures
considérée.

ρ^*	P1	P2	P4	Site
Électrique (Wenner- α)	192 \pm 12	201 \pm 13	151 \pm 14	181 \pm 26
Électromagnétique (EM 31)	186 \pm 7	191 \pm 5	172 \pm 14	183 \pm 12
Moyenne	191 \pm 9	199 \pm 13	156 \pm 17	182 \pm 23

figure 3
Données électriques et électromagnétiques mesurées pour chacun des profils P1, P2 et P4. Sur les pseudo-sections, les zones en gris atténué (en surface) représentent les mesures de la pseudo-section qui ne répondent pas à la condition d'homogénéisation $a \geq 8R_{max}$.

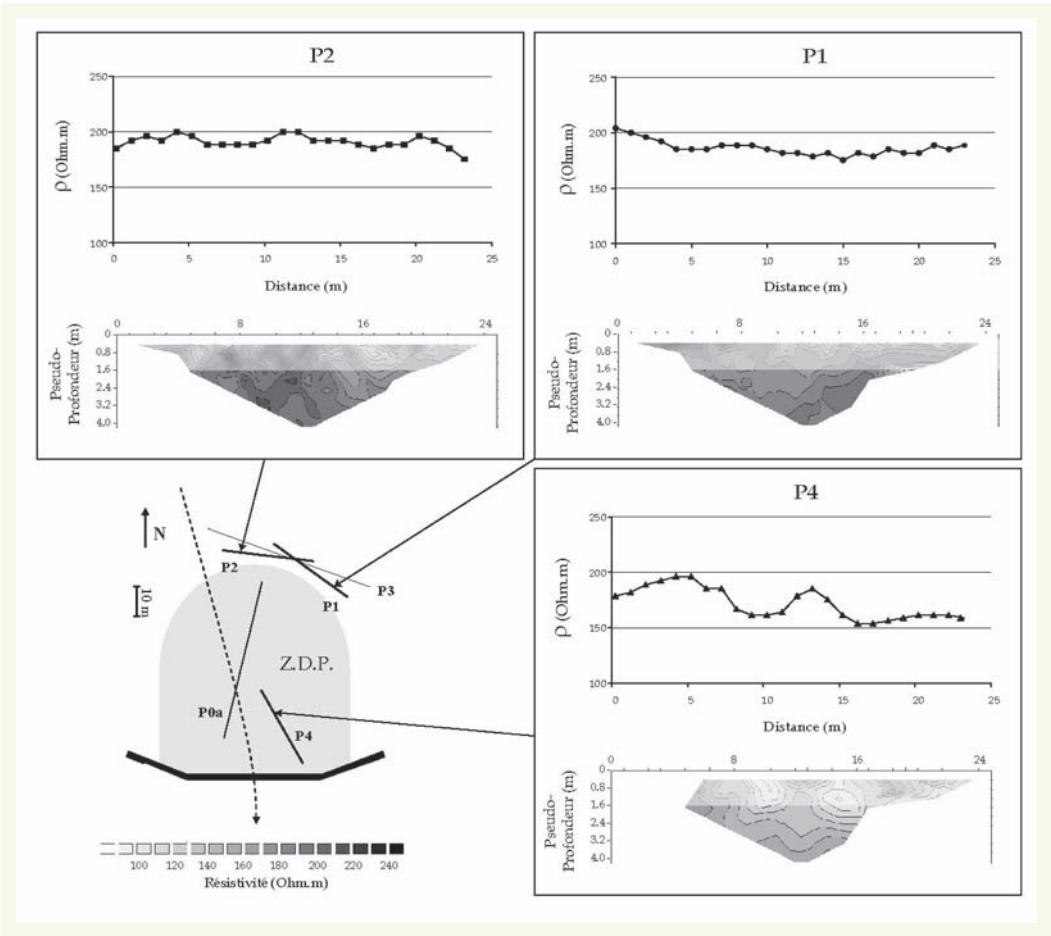


tableau 2
Résistivités ρ_i et ρ_M ($\Omega.m$) relatives aux blocs et à la matrice constituant les dépôts hétérogènes.

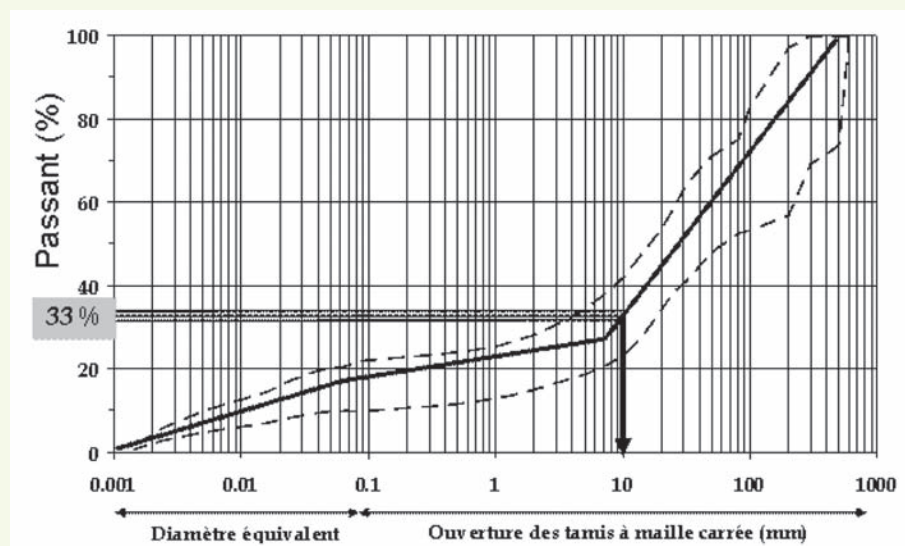
Échelle	Blocs (ρ_i)	Matrice (ρ_M)
Métrique (affleurements)	$\rho_i = 690 \pm 150$ (calcaires marneux séquanien)	$\rho_M = 57 \pm 6$ (marnes argoviennes)
Centimétrique (échantillons)	$\rho_i = 580 - 820$ (moyenne : 665 $\Omega.m$)	$\rho_M = 50 \pm 3$ (fines)

Les marnes de l’Argovien constituant la source de la matrice argileuse, leur résistivité en place ($57 \pm 6 \Omega.m$) doit être considérée plutôt comme une limite haute pour la résistivité de la matrice. À l’inverse, compte tenu de la présence de fractures de fréquence décimétrique, parfois remplies d’argiles dans la formation du Séquanien, la résistivité mesurée à l’échelle du massif étudié constitue plutôt une borne inférieure par rapport à celle des blocs présents dans les dépôts hétérogènes. Les valeurs retenues sont donc celles mesurées à l’échelle centimétrique pour la matrice limono-argileuse ($\rho_M = 50 \pm 3 \Omega.m$) et les valeurs obtenues à l’échelle métrique pour les blocs calcaires ($\rho_i = 690 \pm 150 \Omega.m$).

À partir de ces valeurs mesurées et de la résistivité effective du matériau ($\rho^* = 182 \pm 23$), la loi de mélange proposée par Bussian [24] permet d’estimer à 67 % la concentration en blocs calcaires résistifs présents dans le sol, avec une incertitude sur cette valeur égale à $\pm 1 \%$ [23]. La proportion complémentaire de 33 % en matériaux constituant la matrice fine permet de situer *a posteriori* la limite entre blocs et matrice à environ 10 mm, dimension qui s’avère en accord avec les données granulométriques obtenue par tamisage (figure 4). Cette étude de cas montre que les mesures électriques permettent une bonne estimation de la composition d’un sol hétérogène bicomposant.

figure 4

Obtention d'une limite matrice-blocs sur le faisceau granulométrique obtenu par tamisage par report de la composition estimée par la relation de Bussian [24] (33 % de matrice fine, 67 % de blocs calcaires).



■ Mesures sismiques

Une démarche analogue a été appliquée sur ces dépôts hétérogènes réels à partir des données sismiques. Parallèlement à l'inversion des ondes de surface (V_s), deux autres méthodes ont été utilisées pour mesurer les vitesses sismiques effectives des ondes P et S sur les matériaux étudiés : la sismique réfraction (V_p , V_s) et la tomographie sismique (V_p) [16]. L'acquisition des signaux a été réalisée sur chaque profil avec 24 géophones équidistants de 1 m reliés à un dispositif d'acquisition Strataview (Geometrics). Pour chaque profil, sept tirs ont été réalisés : deux tirs avec offset, deux tirs aux extrémités du profil, un tir central et deux tirs intermédiaires. Deux types de géophones ont été utilisés :

- des géophones verticaux, de fréquence propre 4,5 Hz, pour enregistrer les ondes P et les ondes de Rayleigh basse fréquence ;
- des géophones horizontaux, de fréquence propre 14 Hz, disposés transversalement par rapport au profil de mesures, pour enregistrer les ondes SH en tomographie.

L'adjonction d'un plot d'argile humide à l'interface sol/géophones a permis d'améliorer nettement le couplage des capteurs avec le terrain et donc la qualité des enregistrements. Les sources utilisées pour chaque acquisition étaient de type marteau.

Les résultats de l'inversion des ondes de surface sont présentés sur la **figure 5**. Les courbes de dispersion (vitesse de phase) des ondes de Rayleigh enregistrées sur les différents profils (**figure 5a**) sont ajustées à partir de courbes théoriques issues de la génération aléatoire d'un grand nombre de modèles de vitesses (**figures 5b** et **5c**). Pour chaque modèle de sol généré aléatoirement, la courbe de dispersion théorique est calculée et comparée à la courbe issue des données réelles par une fonction d'erreur (type RMS). La recherche des modèles de vitesse, permettant un ajustement optimal entre les courbes de dispersion calculée et réelle, est assurée par un algorithme de voisinage [28]. Les longueurs d'ondes de surface mesurées sont comprises entre 30 m et 6 m si l'on considère les données jusqu'à 70 Hz (**figure 5a**), valeurs suffisantes pour homogénéiser le sol compte tenu de la taille maximale des hétérogénéités observées en surface (0,8 m de diamètre). En effet, selon Chammas [14], un sol hétérogène est homogénéisé par des ondes de surface dès lors que leur longueur d'onde est supérieure ou égale à 7,5 fois la taille maximale des hétérogénéités qu'il contient.

Lorsque l'inversion est peu contrainte (**figure 5b**), on observe un gradient positif de V_s avec la profondeur, probablement dû à la compaction. Afin d'obtenir une vitesse moyenne sur la couche

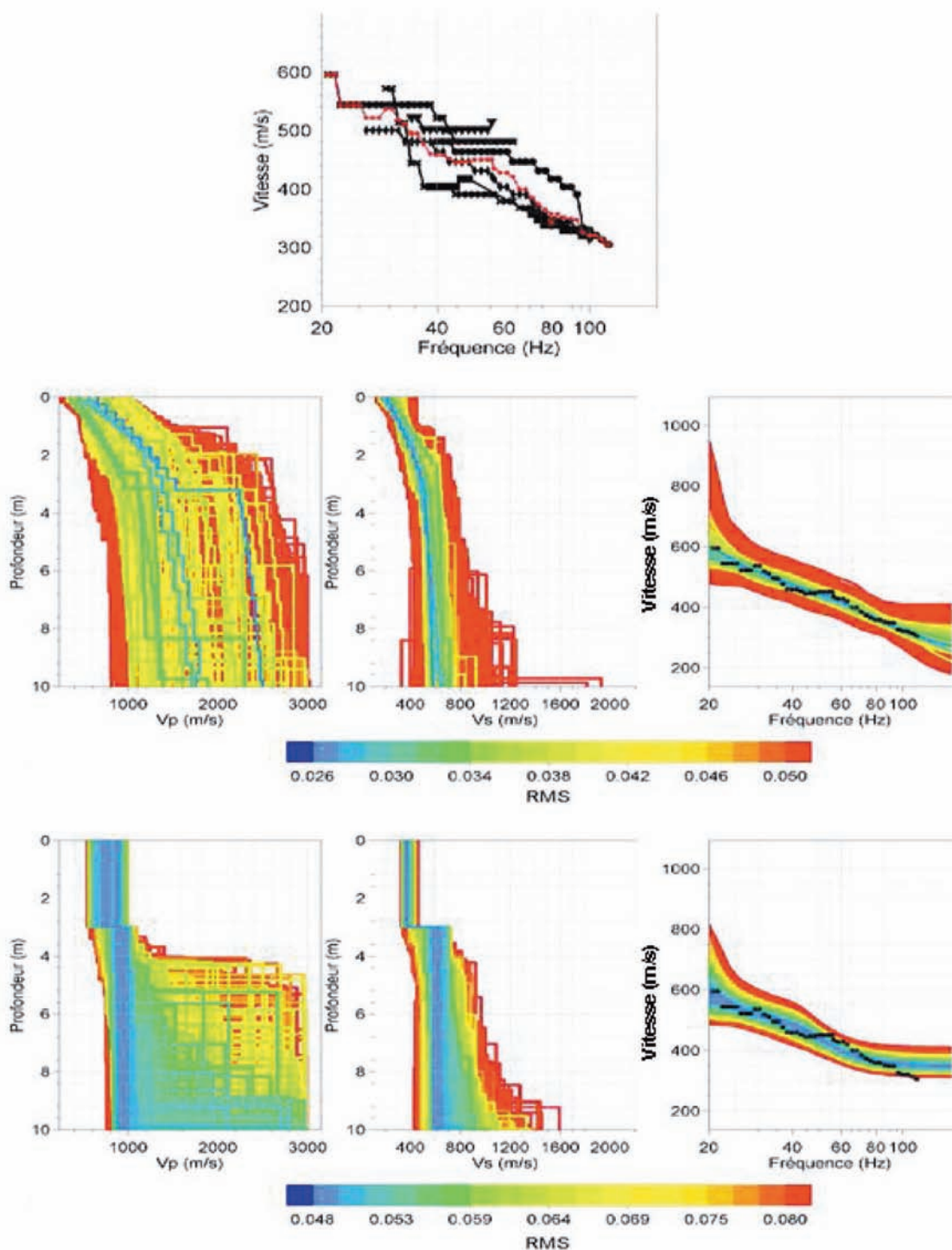


figure 5

Inversion des ondes de surface à l'échelle du site.

a : Courbes de dispersions correspondant aux six tirs extrêmes (deux pour chacun des trois profils) ; la courbe moyenne est donnée en rouge.

b : Résultats de l'inversion sans contrainte.

c : Résultats de l'inversion en imposant une vitesse constante sur la couche 0-3m.

Pour chaque hypothèse sont présentés de gauche à droite : les modèles de vitesse en VP, les modèles de vitesse en VS, les courbes de dispersions correspondant à chaque modèle, ainsi que la courbe de dispersion moyenne issue des mesures (points noirs). Courbes et modèles de sol sont présentés avec des couleurs correspondant à la valeur de la fonction d'erreur (RMS).

a
b
c

échantillonnée *in situ*, une vitesse constante a été imposée sur la couche 0-3 m (figure 5c). Cette épaisseur est comparable à celle obtenue par une interprétation en réfraction.

Les résultats obtenus par les trois méthodes étant relativement concordants (tableau 3), deux valeurs moyennes ont été retenues pour le sol hétérogène en place : $V_p^* = 832 \text{ m.s}^{-1}$, $V_s^* = 386 \text{ m.s}^{-1}$.

tableau 3
Vitesses sismiques
mesurées par les
différentes méthodes.
(a) Ondes P ; (b) Ondes S.

(a)	V_p^*	P1	P2	P3	Moyenne
Réfraction		761	914	786	820
Tomographie		773	899	860	844
Moyenne		767	906	823	832

(b)	V_s^*	P1	P2	P3	Moyenne
Réfraction		366	456	414	412
Inversion ondes de surface		370	400	360	360
Moyenne		368	428	387	386

À l'échelle centimétrique, des mesures ont été effectuées au laboratoire sur des échantillons de chaque composant du sol hétérogène (matrice et blocs) (figure 6). Ces mesures ont été réalisées à l'aide de deux capteurs (émetteur + récepteur) reliés à un oscilloscope fonctionnant à une fréquence de 10^5 Hz . Sur les blocs calcaires, les vitesses mesurées V_{pi} et V_{si} se sont avérées stables et très proches des valeurs mesurées dans les Pré-alpes françaises sur les mêmes formations calcaires [29]. Concernant la matrice, un prélèvement de la fraction fine du sol a été récolté à proximité du site de mesure, au fond de la zone de dépôts principale, avec pour objectif la mesure des vitesses sismiques V_p et V_s propres à la matrice. Ce matériau meuble, naturellement écrêté à 1 mm environ, a été mis en place par compactage manuel dans un moule cylindrique en PVC. Des mesures sismiques réalisées sur ce sol remanié ont montré des vitesses d'ondes de compression très importantes ($V_{PM} = 1\,760 \text{ m.s}^{-1}$) par rapport à la vitesse des ondes de cisaillement ($V_{SM} = 175 \text{ m.s}^{-1}$) (tableau 4). Un tel écart correspond à un coefficient de Poisson $\nu_M = 0,495$ et peut s'expliquer par un indice de saturation proche de 100 % [30].

figure 6
Mesures de V_p sur
échantillons de matrice :
a : Schéma du dispositif.
b : Photo des mesures *in situ*, mesure des longueurs
au pied à coulisse
(précision 1/10 mm).
c : Visualisation du
signal acoustique sur
oscilloscope
(précision visuelle).

Afin de confirmer ces valeurs, les matériaux fins déposés dans le lit du torrent ont été auscultés directement *in situ* avec, en plus du matériel présenté précédemment, un « Pundit » (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester). Cet instrument, généralement utilisé pour mesurer la vitesse des ondes acoustiques dans les bétons, fonctionne à une fréquence (environ 20 kHz) plus faible que le matériel de laboratoire (environ 1 MHz). La fréquence utilisée pour les mesures sismiques sur la matrice (1 MHz) a été adaptée à la taille des échantillons (~1 à 3 cm ; figure 6b). Par exemple, pour $V_s = 175 \text{ m/s}$, la résolution est d'environ $\lambda/4 = V/4f \sim 0,05 \text{ mm}$.

a | b | c



tableau 4
Vitesses sismiques
mesurées sur les différents
constituants du sol
hétérogène (m.s⁻¹).

	Sol hétérogène (V*)	Blocs calcaires (V _i)	Matrice fine (V _M)
V _p (m.s ⁻¹)	~ 815	~ 5 740	~ 1 760 (v _M = 0,495) ou ~ 350 (v _M = 0,33)
V _s (m.s ⁻¹)	~ 386	~ 3 170	~ 175

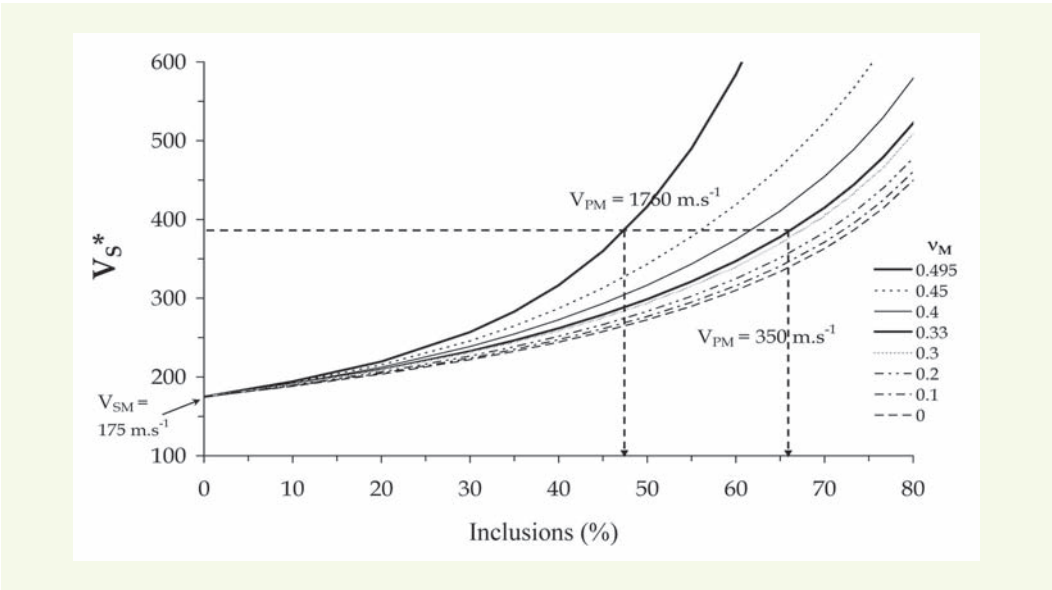
Les mesures au Pundit (20 MHz) ont été réalisées sur des échantillons décimétriques ($\lambda/4 \sim 1$ cm). Les mesures de distance ont été réalisées au pied à coulisse. Les vitesses ainsi mesurées avec le Pundit se sont avérées très variables (comprises entre 500 et 1 500 m.s⁻¹). De telles variations sont imputables d’une part à la variabilité des matériaux étudiés et d’autre part à la disposition relative des capteurs (coaxiaux ou axes parallèles). De plus, la difficulté majeure liée à cet appareil est l’absence de contrôle visuel du signal enregistré, ce qui rend très délicate l’identification de l’onde mesurée (ondes P, ondes de surface...). Les vitesses V_{PM} mesurées *in situ* avec le matériel de laboratoire étaient du même ordre de grandeur que précédemment ($V_{PM} \sim 1700\text{-}1800$ m.s⁻¹).

Compte tenu des difficultés rencontrées pour mesurer la vitesse des ondes de compression dans la fraction fine (V_{PM}), la concentration des blocs (inclusions) calcaires dans le sol a été estimée grâce au modèle d’homogénéisation de Christensen [31] pour deux valeurs différentes du coefficient de Poisson relatif à la matrice (v_M). La première valeur ($v_M = 0,495$) correspond à la vitesse mesurée avec le dispositif de laboratoire ($V_{PM} = 1\,760$ m.s⁻¹) ; c’est une valeur extrême. Une seconde valeur, beaucoup plus classique pour ce type de matériau, a été choisie ($v_M = 0,33$), le coefficient de Poisson des argiles et limons étant généralement compris entre 0,2 et 0,4 [30]. La première estimation de la concentration en inclusions conduit à 47 % de blocs calcaires dans le sol (figure 7), la seconde ($v_M = 0,33$) à 66 %. Ce dernier résultat est cohérent avec la méthode électrique et conforme au faisceau granulométrique obtenu par tamisage.

CONCLUSIONS

Deux méthodes géophysiques complémentaires ont été utilisées pour déterminer la concentration des blocs calcaires présents dans un sol grossier naturel constitué par les dépôts d’un cône de déjection de la région grenobloise.

figure 7
Estimation de la
concentration en blocs
calcaires dans le sol
hétérogène du torrent
Manival. Les courbes
correspondant au modèle
d’homogénéisation 3D
[31] sont représentées
pour différentes valeurs du
coefficient de Poisson de la
matrice (v_M).



La méthode fondée sur la résistivité nécessite la mesure de trois paramètres (ρ_i, ρ_M, ρ^*). Ces mesures de résistivité par les méthodes électromagnétiques sont rapides et nécessitent peu de traitements et d'interprétation. La résistivité électrique de chaque composant du sol hétérogène peut être mesurée directement avec le matériel de terrain sur les formations géologiques sources, à condition cependant que ces dernières soient proches de la zone étudiée et facilement accessibles. Le mode d'acquisition de ces données permet d'associer à chaque valeur moyenne (ρ_i, ρ_M, ρ^*) une incertitude statistique calculée à partir de l'écart-type sur la population de mesures effectuées (pseudo-section), et de fournir ainsi une incertitude sur la concentration estimée par la relation de Bussian.

La méthode sismique, fondée sur les propriétés élastiques des matériaux, requiert la mesure de six paramètres au minimum ($V_{Pi}, V_{PM}, V_P^*, V_{Si}, V_{SM}, V_S^*$), les masses volumiques intervenant dans le calcul des modules élastiques pouvant généralement être estimées à partir d'abaques. L'obtention des vitesses sismiques nécessite une interprétation des données. Le modèle d'homogénéisation utilisé pour estimer la composition du matériau hétérogène présentant une sensibilité non négligeable à la vitesse des ondes P au sein de la matrice (V_{PM}) (figure 7) et la mesure s'étant avérée délicate sur le site étudié, une valeur classique du coefficient de Poisson issue de la littérature a été retenue et a permis une estimation réaliste de la proportion de blocs calcaires présents dans le sol. La mesure de la vitesse des ondes P au sein de la matrice du sol en place reste donc un point délicat de la démarche.

Les deux méthodes, électrique et sismique, ont permis d'estimer la composition des dépôts grossiers du cône de déjection du torrent Manival et ont fourni des résultats en accord avec les données granulométriques mesurées par voie traditionnelle. Pour chaque sol hétérogène, le choix de la méthode la mieux adaptée sera fonction du contraste géophysique entre les différents composants en présence.

Notations

ρ_i, ρ_M, ρ^* : résistivité des inclusions, de la matrice, effective (homogène équivalente) [$\Omega.m$],

V_{Pi}, V_{PM}, V_P^* : vitesse des ondes P au sein des inclusions, de la matrice, effective [$m.s^{-1}$],

V_{Si}, V_{SM}, V_S^* : vitesse des ondes S au sein des inclusions, de la matrice, effective [$m.s^{-1}$],

ν_i, ν_M, ν^* : coefficient de Poisson relatif aux inclusions rigides, à la matrice et effectif,

C : concentration volumique en inclusions/blocs dans le milieu/sol hétérogène,

a : espacement inter-électrode,

m : facteur de cimentation,

D_{max}, R_{max} : diamètre et rayon des plus gros éléments contenus dans un sol.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **PHILIPPONNAT G.**, Le phicomètre : essai de cisaillement *in situ*, *Revue Française de Géotechnique*, **1986**, n° **35**, pp. 3-28.
- 2 **Norme Française NF P 94-120**, *Sols : Reconnaissance et essais – Essai au phicomètre*, Ed. AFNOR, T3, **1996**, 15 pages.
- 3 **LESLIE**, Large scale triaxial tests on gravely soils, *2^e conférence PANAM*, SMFE, Brésil, **1963**, Vol. 1, pp. 181-202.
- 4 **MARSAL R.J.**, Large scale testing of rockfill materials, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, **1967**, vol. **93**, SM, pp. 27-43.
- 5 **FAGNOUL A., BONNECHERE F.**, Shear strength of porphyry materials, *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, August **1969**, **13**, E1, pp. 61-65.
- 6 **RATHEE R.K.**, Shear strength of granular soils and its prediction by modelling techniques, *J. Inst. Eng. India CH*, ISSN 0020-3351, **1981**, vol. **62**, pp. 64-70.
- 7 **ABOURA A.**, *Étude expérimentale du comportement mécanique de matériaux granulaires non-conventionnels*, Thèse de doctorat, université de Grenoble I, **1999**, 286 pages.
- 8 **GOTTELAND P., TACNET J.-M., ABOURA A.**, Caractérisation des sols grossiers. Application aux sols de torrents, *Revue Française de Génie Civil*, **2000**, vol. 4 – n° 2-3/200, pp. 325-338.
- 9 **NILTON VALLÉ**, *Comportement mécanique d'un sol grossier d'une terrasse alluvionnaire de la Seine*, Thèse de doctorat de l'université de Caen, **2001**, 292 pages.
- 10 **Norme Française NF P 94-056**, *Sols : Reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage*, Ed. AFNOR, T1, **1996**, 15 pages.
- 11 **MAYNE P.W., RIX G.J.**, Correlations between shear wave velocity and cone tip resistance in natural clays, *Soil and Foundations*, **1995**, **35**, n° **2**, pp. 107-110.
- 12 **GHOSE R.**, Model-based integration of seismic and CPT data to derive soil parameters, *10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Utrecht, The Netherlands, **2004**.
- 13 **CHAMMAS R., ABRAHAM O., COTE PH., PERDERSEN H.A., SEMBLAT J.-F.**, Characterization of Heterogeneous Soils Using Surface Waves: Homogenization and Numerical Modelling, *ASCE Int. J. Geomechanics*, **2003**, **3** (1), pp. 55-63.
- 14 **CHAMMAS R.**, *Caractérisation mécanique de sols hétérogène par ondes de surface*, Thèse de doctorat, université de Nantes, École doctorale Mécanique, **2002**.
- 15 **REY E., JONGMANS D., GOTTELAND P., GARAMBOIS S.**, Characterisation of soils with stony inclusions using geoelectrical measurements, *Journal of Applied Geophysics*, **2006**, **58**, pp. 188-201.
- 16 **REYNOLDS J.**, *An introduction to applied and environmental geophysics*, Ed. Wiley, John & Sons, Inc., **1997**, 749 pages.
- 17 **SEN P.N., SCALA C., COHEN M.H.**, A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads, *Geophysics*, **1981**, **46**, pp. 781-795.
- 18 **BERRYMAN J.**, Mixture theories for rock properties, in *AGU Handbook of Physical Constants*, edited by T. J. Ahrens (AGU, New York), **1995**, pp. 205-228.
- 19 **TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIF R.E., KEYS D.A.**, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, **1990**.
- 20 **DAHLIN T., ZHOU B.**, A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays, *Geophysical Prospecting*, **2004**, **52**, pp. 379-398.
- 21 **HUMBERT P.**, CESAR-LCPC : un code général de calcul par éléments finis, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, **1989**, **160**, pp. 112-115.
- 22 **MARESCOT L., RIGOBERT S., PALMA LOPES S., PIAU J.-M., LAGABRIELLE R., CHAPPELLIER D.**, Développements et utilisation de CESAR-LCPC pour la modélisation directe et inverse de tomographies électriques sur des structures 3D, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **2005**, **256-257**, pp. 53-65.
- 23 **REY E.**, *Caractérisation de sols hétérogènes par des méthodes géophysiques*, Thèse de doctorat de l'université Grenoble I, **2005**, 251 pages.
- 24 **BUSSIAN A.E.**, Electrical conductance in a porous medium, *Geophysics*, **1983**, vol. **48**, pp. 1258-1268.
- 25 **MENDELSON K.S., COHEN M.H.**, The effect of grain anisotropy on the electrical properties of sedimentary rocks to the dielectric constant of fused glass beads, *Geophysics*, **1982**, **47**, pp. 257-263.
- 26 **JONGMANS D., DEMANET D.**, The importance of surface waves in vibration study and the use of Rayleigh waves for estimating the dynamics characteristics of soils, *Engineering geology*, **1993**, **34**, pp. 105-113.
- 27 **STOKOE K.H., NAZARIAN S., RIX G.J., SANCHEZ-SALINERO I., SHEU J.-C., MOK Y.J.**, *In situ* seismic testing of hard-to-sample soils by surface wave method, *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II – Recent Advances in Ground Motion evaluation*, Geotechnical special publication, **1988**, **20**, Von Thun J.-L., Ed. ASCE, New York, pp. 64-278.
- 28 **WATHELET M., JONGMANS D., OHNRBERGER M.**, Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements, *Near Surface Geophysics*, **2004**, vol. **2**, n° **4**, pp. 211-222.
- 29 **VIROLOUVET B.**, *Étude géologique et modélisation sismique d'une coupe de la bordure méridionale de la plateforme urgonienne du Vercors (France) ; contribution à la caractérisation sismique du réservoir carbonaté*, Thèse de doctorat, université de Grenoble I, **1997**.
- 30 **BOURBIÉ T., COUSSY O., ZINSZNER B.**, *Acoustique des milieux poreux*, Éditions Technip, **1986**, 339 pages.
- 31 **CHRISTENSEN R.M.**, *Mechanics of Composite Materials*, Reprinted by Krieger Publishing Company, Malabar Florida, Original edition by John Wiley & Sons, New York, **1991**.