Octobre 2003

CARACTERISATION PHYSIQUE DES SOLS 'GROSSIERS' AUX MOYENS DE METHODES NON-DESTRUCTRICES

Application au cône de déjection du torrent Manival

Projet financé par le Conseil Général de l'Isère

Programme 2002 du
Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels

Participants : E. Rey, P. Gotteland, D. Jongmans, S. Garambois, A. Curt

Collaborations : LCPC Nantes (P. Côte, R. Chammas)
CEMAGREF Grenoble (D. Richard, F. Nicot)
RTM (P. Diot)
IMSRN (P. Plotto, A. Daumesnil)

Lirigm
Géologie et Mécanique *Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche Impliquant la Géologie et la Mécanique*
Adresse Postale : BP 53 – 38041 Grenoble cedex 9 – France
Téléphone : (+33) 476 828080 - **Fax** : (+33) 476 828070

I. INTRODUCTION

La protection contre les risques naturels en zone de montagne nécessite souvent la réalisation d'ouvrages en remblai tels que merlons, barrages de correction torrentielle, digues…
Dans ce contexte particulier (éloignement des zones d'approvisionnement en granulats, accès difficile) il est souvent économiquement intéressant de réutiliser les terrains en place ayant pour origine l'aléa concerné : éboulis issus de chutes de blocs à répétition, matériaux de laves torrentielles stabilisés dans les plages de dépôt du torrent…

Ces sols, à granulométrie très étalée (éboulis, moraines, alluvions…), présentent souvent des hétérogénéités importantes à l'échelle du gisement et leur nature même (coexistence de blocs rocheux décimétriques à métriques avec des matériaux fins tels que matrice argileuse en quantité parfois importante) rend difficile voire inopérante l'utilisation les méthodes classiques de reconnaissance géotechnique in-situ.

Les méthodes de prospection géophysique peuvent donc constituer une approche alternative intéressante. Elles présentent plusieurs avantages : elles sont rapides, toujours possibles et affectent des volumes de terrain importants ce qui est particulièrement intéressant pour prendre en compte des volumes de sol qui soient représentatifs. Par ailleurs la géométrie linéaire (voire surfacique) de ces mesures permet de localiser les possibles variations latérales dans ce type de dépôts.

Ces sols hétérogènes, qualifiés de "hard-to-sample" par [Stockoe & al., 1988], ont déjà été étudiés grâce à l'analyse des sols de surface. [Chammas, 2002] a montré par des simulations numériques aux éléments finis, qu'il existait une relation entre la vitesse des ondes de cisaillement dans un sol et la proportion d'inclusions rigides qu'il contient. Par ailleurs l'analyse de la coda sismique lui permet d'avoir des informations sur la taille des blocs présents dans le milieu.

L'objectif de cette étude est d'obtenir des informations géotechniques sur ces sols grâce à la méthode électrique, sans effectuer de prélèvement. La caractérisation indirecte des sols « grossiers » se décompose en deux parties. La première consiste en une modélisation numérique directe dont le but est de corréler une propriété géophysique du sol (sa résistivité électrique) avec une caractéristique physique ou géotechnique (sa granulométrie), afin de pouvoir interpréter les mesures électriques récoltées sur le terrain. La deuxième partie porte sur la validité d'une telle approche sur un site réel. C'est sur cette partie que porte particulièrement le projet financé.

Deux campagnes de mesures ont été menées en 2002 et 2003 sur le cône de dépôts du torrent Manival qui se situe dans le Grésivaudan à la limite entre les communes de Saint-Ismier et Saint-Nazaire-les-Eymes. Elles ont été réalisées dans le cadre de la thèse d' E. Rey.

II. MODELISATION DIRECTE

Nous considérons ici un sol hétérogène comme un milieu diphasique où coexistent des inclusions résistives dans une matrice fine plus conductrice *(figure 1)*. Dans certaines conditions (dispositif de mesure suffisamment grand par rapport à la taille des hétérogénéités), le sol peut être considéré comme un milieu homogène caractérisé par une résistivité effective. Cette dernière pourra permettre de remonter à certaines caractéristiques intrinsèques du sol.

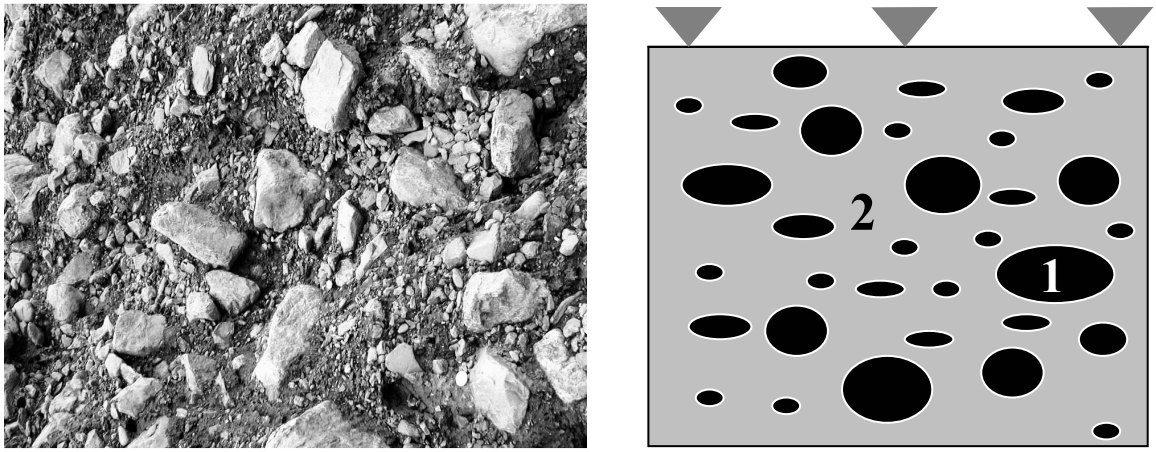


Figure 1: Un exemple de sol à granulométrie très étalée (dépôts du Torrent Manival, commune de Saint-Ismier, 38) et sa représentation comme un milieu diphasique composé de blocs rocheux emballés dans un matrice fine. (dimensions de la photographie : 1,2 x 1 m).

II.1 Modèle numérique

Nous avons utilisé les logiciels de modélisation Res2dmod et d'inversion Res2dinv [Loke, 1996], dans lequel la structure est bidimensionnelle et la diffusion de la source est tridimensionnelle.
Le maillage se compose d'un assemblage d'éléments carrés auxquels on attribue soit la valeur de résistivité de la matrice, soit celle correspondant aux inclusions (figure 2). Les inclusions sont placées de façon aléatoire avec une concentration définie par l'utilisateur. Elles ont la possibilité d'être jointives. Quatre contrastes de résistivité entre matrice et inclusions ont été testés : 10, 20, 50 et 100. Les valeurs de résistivité apparente sont calculées par la méthode des différences finies par le modèle direct puis la pseudo-section est inversée pour obtenir les résistivités réelles.

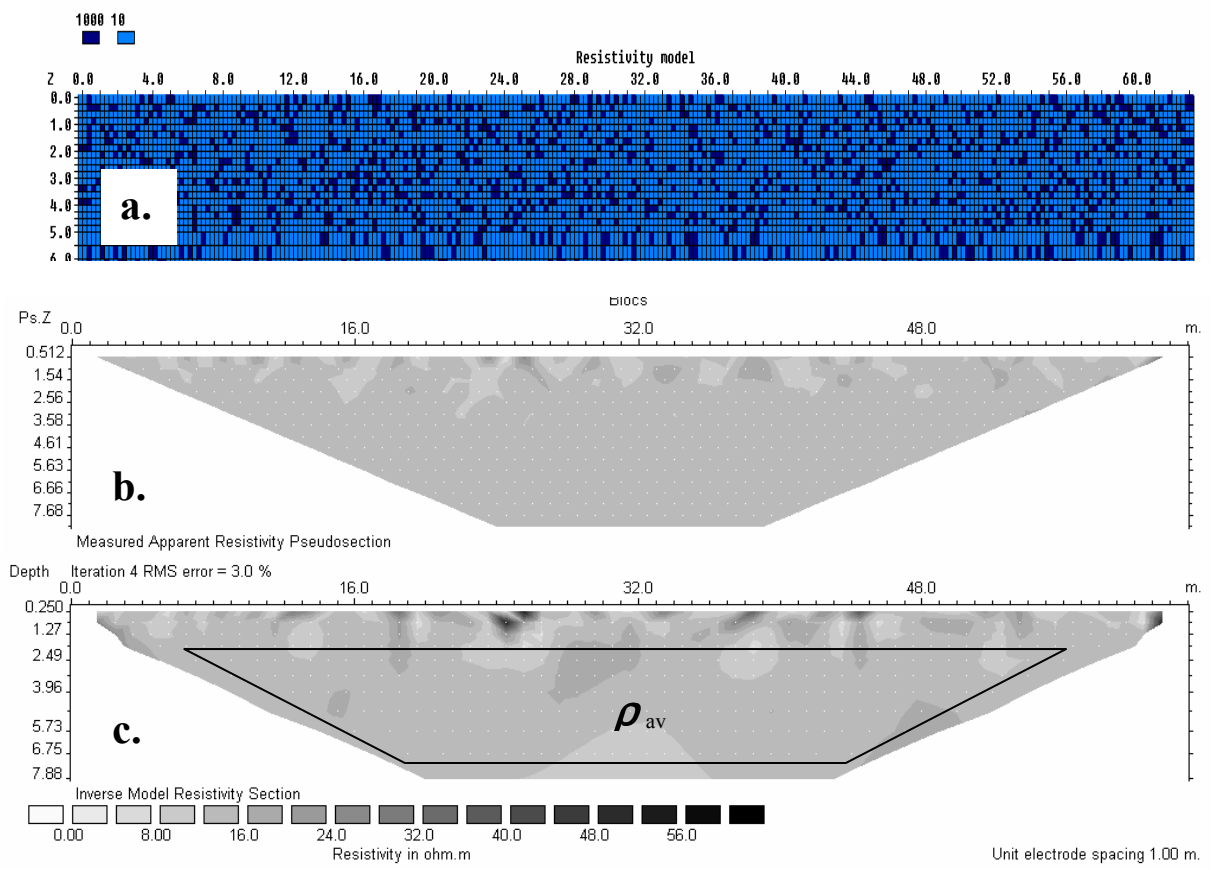


Figure 2 : Démarche de la modélisation directe : a. Création d'un sol synthétique. b. Calcul des résistivités apparentes (Res2Dmod) c. Inversion la pseudo-section (Res2DInv). Le calcul de ρ_{av} (résistivité moyenne, normalisée par la résistivité de la matrice) ne prend pas en compte la couche la plus superficielle où le sol n'est pas homogénéisé par la méthode.

Pour chaque modèle de sol, une seule valeur est retenue : la résistivité moyenne ρ_{av}, normalisée par celle de la matrice. Pour un contraste de résistivité donné et une valeur de concentration, on procède à plusieurs tirages aléatoires de la position des inclusions. Les résultats numériques s'ajustent de façon très satisfaisante avec la relation théorique de [Bussian, 1983] (figure 3). Celle-ci, dérivée des lois de mélange d'Hanaï-Bruggeman, exprime la conductivité effective d'un milieu hétérogène en fonction de la proportion et de la conductivité de ses différentes phases et d'un coefficient de cimentation m qui reflète la tortuosité du milieu.

On obtient ainsi un abaque qui permet, à partir de la résistivité moyenne normalisée facilement mesurable sur le terrain, d'estimer la concentration des inclusions résistives présentes dans un sol. Comme en témoigne la forme de la courbe, la précision de cette estimation est d'autant meilleure que la concentration (et le contraste) est élevée. Cette opération nécessite cependant de connaître la valeur de résistivité électrique de chacune des deux phases.

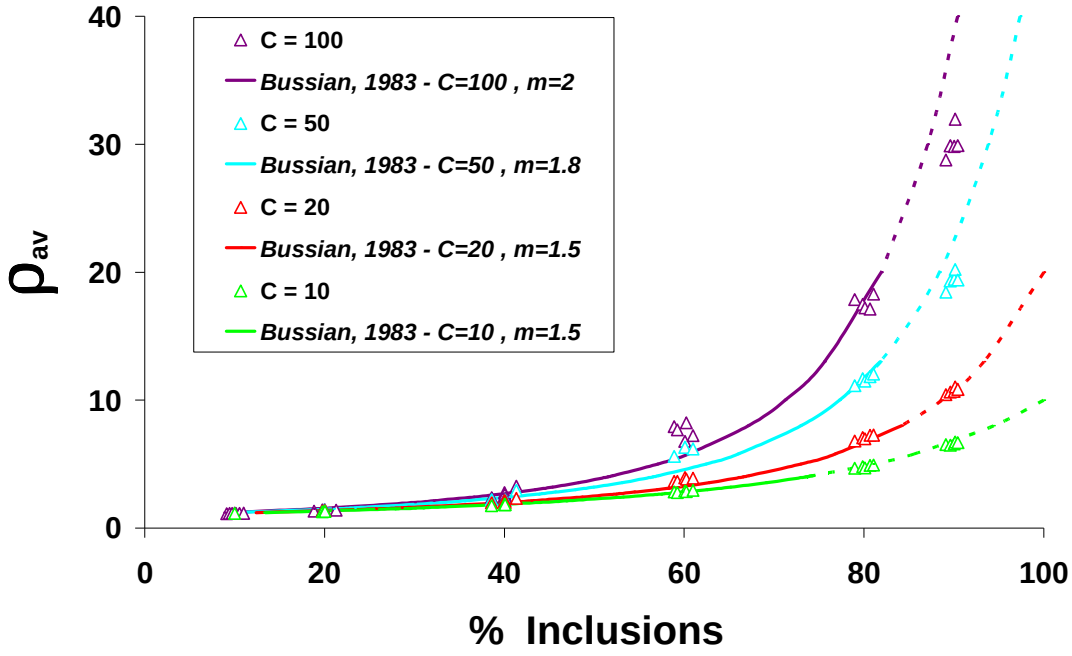


Figure 3 : Corrélation entre la résistivité électrique moyenne d'un sol et le pourcentage de blocs pour 4 contrastes de résistivité C entre matrice et inclusions ont été testés (10, 20, 50, et 100). A chaque valeur de contraste, le coefficient de cimentation m est adapté pour rendre compte de la tortuosité du milieu.

II.2 Modèles physiques

Afin de tester la validité de nos résultats numériques, nous avons appliqué notre méthodologie sur un modèle réduit existant réalisé par Chammas au LCPC Nantes lors de sa thèse et composé d'inclusions de briques disposées à intervalles réguliers dans une matrice de graviers.

Nous avons réalisé des mesures de tomographie électrique sur la planche d'essai à Nantes. Elle consiste en un remblai de gravier de dimensions 14 x 2 x 0,5 mètres, mis en place en 2001 sur le site du LCPC. Deux zones de 2,5 mètres de long contiennent des inclusions de briques, régulièrement espacées, dont la concentration est fixée à 19 et 35 %. Si ces matériaux sont bien adaptés à des mesures de vitesse d'ondes sismiques, la conductivité électrique de la matrice de graviers s'est avérée insuffisante pour permettre au courant de circuler entre les électrodes. Afin d'y remédier nous avons tenté de saturer le gravier, mais la trop forte perméabilité du gravier ainsi que celle du sol support (sable) a rendu cette saturation impossible.

Un modèle réduit a donc été réalisé au LIRIGM avec des matériaux plus adaptés. Nous avons construit une caisse de 2 x 1 x 0,5 mètres, où ont été placées 600 inclusions de bois de pin (tasseaux 27 x 27 mm x 1 mètre de long). La matrice est constituée d'un sable fin limoneux. Comme dans notre modèle numérique la structure est à 2 dimensions. Les résultats sont en cours d'acquisition.

III. SITE EXPERIMENTAL

III. 1 Présentation du site

Le cône de déjection du torrent Manival a pour origine l'érosion régressive du versant est de la Chartreuse au niveau du Bec Charvet *(figure 4a)*. Il est constitué par un empilement de dépôts de laves torrentielles. Les matériaux rencontrés présentent donc une granulométrie très étalée où de nombreux blocs de taille parfois métrique coexistent avec des argiles. Ces dépôts présentent fréquemment des variations latérales liées à leur mode de mise en place.

Le choix de ce site a été fait en raison de sa proximité, mais aussi parce qu'il avait déjà fait l'objet d'études antérieures et d'analyses granulométriques, notamment par le CEMAGREF de Grenoble (Stupnicki, 1994 ; Saury, 1997).

La géologie de la partie active du bassin versant *(figure 4b)* nous renseigne sur la nature pétrographique des matériaux. Les blocs sont constitués de calcaire marneux provenant des formations du Kimméridgien inférieur et du Séquanien, tandis que les argiles de la matrice sont issues de l'altération des marnes argoviennes.

Ce torrent au débit très irrégulier, autrefois dangereux, est aujourd'hui stabilisé par de nombreux ouvrages de correction torrentielle (plus d'une centaine sur quelques kilomètres). Une grande plage de dépôt artificielle a été aménagée afin de pouvoir stocker les matériaux déstabilisés en cas de lave torrentielle exceptionnelle. C'est à cet endroit, pour des raisons pratiques d'accès et d'absence de couvert végétal, que la majorité des mesures a été réalisée *(figures 4c, 4d)*.

III.2 Présentation succinte des techniques géophysiques utilisées

La **tomographie électrique** permet d'obtenir une image de la résistivité du terrain selon une coupe verticale. Dans la pratique des électrodes régulièrement espacées sont plantées dans le sol selon un profil. Chaque mesure de résistivité apparente est réalisée en utilisant simultanément 4 électrodes et consiste, comme dans le cas d'un sondage électrique, à injecter un courant entre deux électrodes et à mesurer la différence de potentielle induite entre les deux autres. Le nombre d'électrodes disponibles et la géométrie du dispositif de mesure choisi (Wenner alpha, dipôle-dipôle, Schlumberger…) vont déterminer le nombre de points de mesures de la section. Ces résistivités mesurées apparentes, sont ensuite inversées pour obtenir les valeurs de résistivité réelle de la coupe.

La **tomographie sismique** consiste à analyser la propagation des rais sismiques émis par une source. A partir des temps de trajet des ondes de volume (P ou S) un modèle inverse permet de connaître la vitesse des ondes sismiques en chaque point du profil étudié. L'**inversion des ondes de surface** (ondes de Rayleigh) permet d'obtenir un profil vertical en profondeur de la vitesse des ondes de cisaillement.

Le **radar géologique** émet en surface une ondelette électromagnétique de fréquence comprise entre 50 MHz et 1 GHz. Ce signal, modifié par son trajet dans le sol, est enregistré par l'antenne réceptrice et analysé. Nous avons utilisé différentes fréquences : 100, 200 et 400 MHz avec des antennes non-blindées, et 250 et 500 et 800 MHz pour les antennes blindées. Le matériel n'étant pas disponible au laboratoire lors des premières mesures, nous avons utilisé le radar de l'IMSRN.

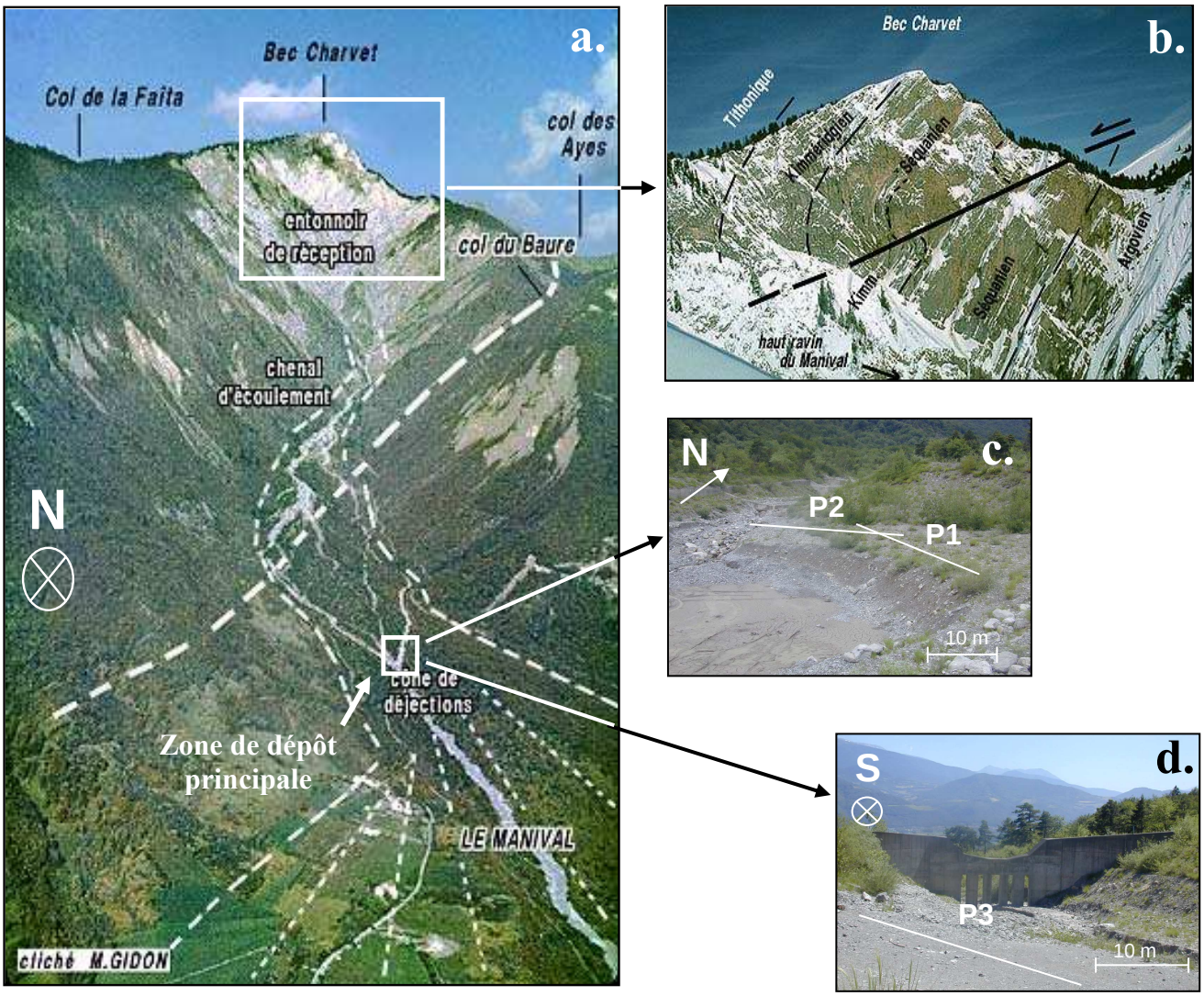


Figure 4 : *a*.Vue générale du bassin versant et de la partie amont du cône de déjection *b*. Géologie de la partie active du bassin versant. *c, d*. Vues de la zone de dépôt principale et localisation des profils de mesures de la campagne de l'été 2003.

III.3 Mesures préliminaires (Printemps 2002)

Les mesures préliminaires avaient pour objectif de définir l'épaisseur des dépôts et d'obtenir un ordre de grandeur des paramètres géophysiques mesurés.

III.2.1 Géométrie des dépôts

Deux profils d'une cinquantaine de mètres ont été réalisés au niveau de la zone de dépôts principale. L'un, orienté N-S, se situe sur le fond sub-horizontal de la plage de dépôt principale (où coule le torrent en cas de fortes précipitations). L'autre se situe sur une terrasse en rive gauche de la plage de dépôt, surélevée de 3 mètres par rapport au précédent afin de s'affranchir des fortes teneurs en eau possibles en fond de plage. Dans le but d'investiguer le sol sur une profondeur plus importante, un profil plus long (315 m) a été réalisé à environ

1500 mètres en aval de cette zone, le long du lit actuel du torrent, dans le but d'évaluer la profondeur du substratum.
Sur les deux premiers profils, des mesures de tomographie électrique et sismique, ainsi que des mesures radar ont été effectuées. Sur le long profil, seule une tomographie électrique a été réalisée. Cette dernière procure des informations jusqu'à une profondeur égale à environ 1/6 ème de la longueur du dispositif mis en place. Sur le profil de 315 mètres, l'absence d'un contraste net de résistivité visible en profondeur témoigne d'une épaisseur des dépôts supérieure à 50 mètres à cet endroit, soit 1500 m en aval de la zone de dépôts.

Au niveau de la zone de dépôt principale les mesures électriques indiquent que les matériaux remaniés ont une épaisseur supérieure à 10 mètres (figure 5). Un forage destructif réalisé par la DDA nous confirme ce résultat. Réalisé en bordure de la piste RTM, à la cote 550, donc situé à 150 m au SSE de la plage de dépôt (en aval) ce forage a atteint le substratum calcaire à 48,5 m de profondeur (source M. Biju-Duval, hydrogéologue DDA). Le piézomètre à la suite de ce forage indique un battement très important de la zone saturée suivant la saison : de -21,60 m en février à -48,6 en juillet pour l'année 2001. Nos mesures affectent donc uniquement la zone non saturée.

Cette première série de mesures a permis en outre d'écarter l'hypothèse de la présence d'un radier de béton qui aurait pu être mis en place au fond de la plage de dépôts lors de son aménagement.

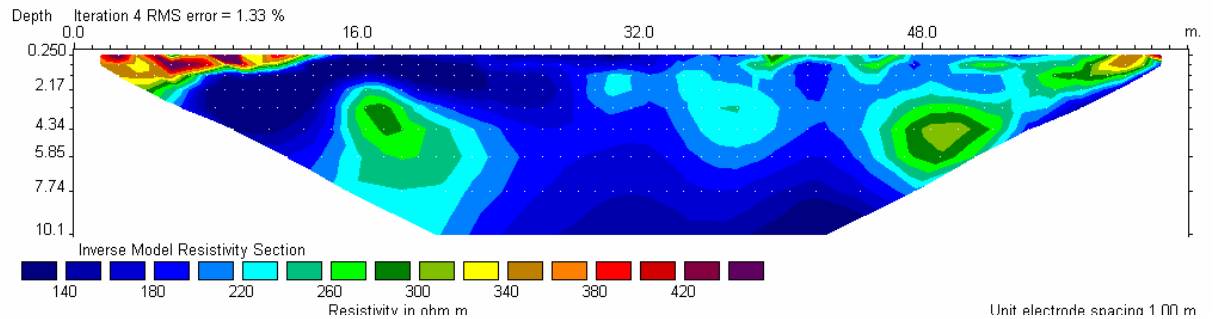


Figure 5 : Tomographie électrique sur le profil situé au fond de la plage de dépôts (printemps 2002). L'absence de limite nette de résistivité en profondeur exclut la présence d'un radier de béton ou du substratum dans les 10 premiers mètres.

III.2.2 Propriétés des différentes phases

Pour estimer la proportion des blocs présents dans un sol à partir d'un paramètre géophysique, il faut connaître les propriétés du milieu (mesures sur le site), mais aussi les propriétés de chacune des phases présentes (argile + calcaires).

La vitesse des ondes sismique est facilement mesurable en laboratoire sur des échantillons centimétriques. La résistivité électrique de chacune des phases du sol a été mesurée à 2 échelles différentes : centimétrique et métrique. La résistivité des calcaires des calcaires a été mesurée d'une part sur des éprouvettes cylindriques au Cerege (Aix-en-Provence) et d'autre part sur la formation calcaire du Séquanien qui affleure à proximité du Col du Coq, au sommet du bassin versant. Dans cette même zone, les marnes argoviennes ont aussi été investiguées puisqu'elles sont à l'origine des argiles (altération). Les résultats sont récapitulés dans le Tableau 1.

	Calcaire (blocs)	Argile (matrice)
Laboratoire (Éch. centimétrique)	Vp = 5745 m/s Vs = 3175 m/s r = 880 Ω.m	Vp = 1680 m/s Vs = 210 m/s
Affleurement (Éch. métrique)	r = 670 Ω.m *(Séquanien)*	r = 55 Ω.m *(Argovien)* r = 50 Ω.m *(argiles)*

Tableau 1 : Résultats des mesures de vitesse et de résistivité sur les différentes phases.

III.4 Campagne de mesures (Eté 2003)

Le but de cette deuxième campagne de mesures était de comparer la granulométrie réelle du sol avec les prédictions obtenues grâce aux propriétés géophysiques du terrain.

Trois profils ont été définis en rive gauche au niveau de la zone de dépôt (Figure 6). Les deux premiers (P1, P2) sont orientés E-W et se situent sur une terrasse surélevée d'environ 3 mètres par rapport au fond de la plage (figure 4c), dans le but de s'affranchir des fortes teneurs en eau possibles dans cette zone en cas d'épisode pluvieux. P3 est orienté NW-SE et se situe juste en dessous de la piste d'accès (figure 4d). Chacun d'eux mesure 24 mètres de long.

Sur chacun d'eux , nous avons effectué :

- une tomographie électrique
- une tomographie sismique
- une mesures au radar géologique avec des antennes de fréquences différentes (100, 200, 250, 500 et 800 MHz).

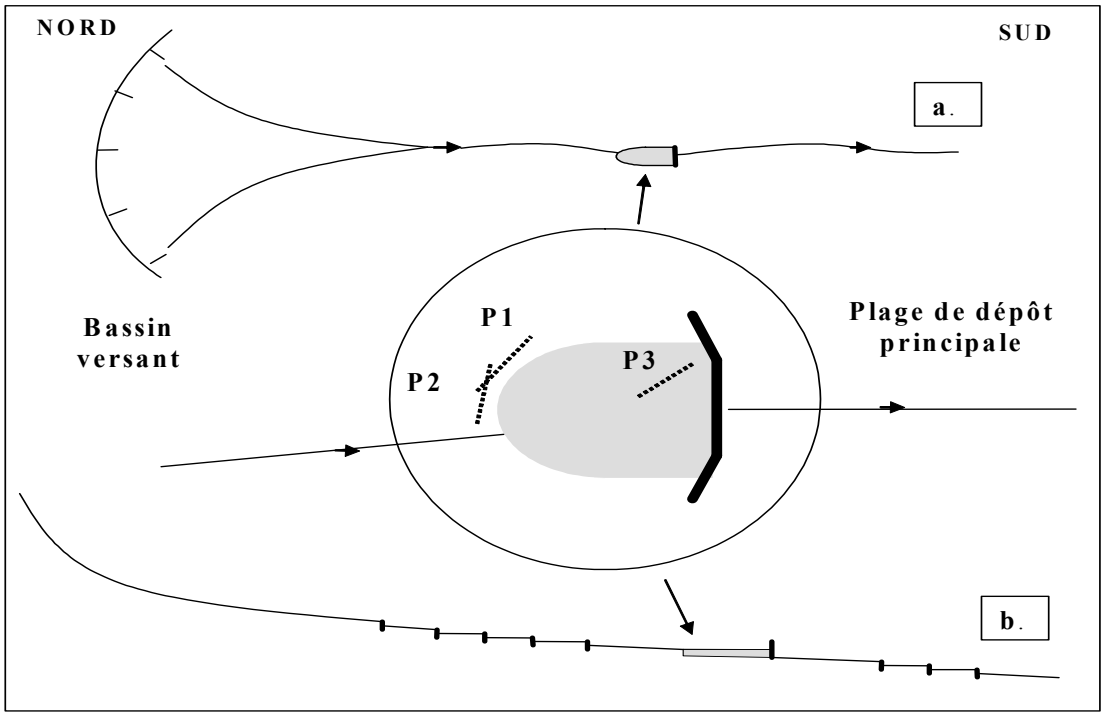


Figure 6 : Localisation des profils de mesures de la campagne de mesures de l'été 2003 par rapport au cours du torrent Manival. a. Vue de dessus. b. Vue transversale. Le fond de la plage de dépôt principale est en gris.

Toutes ces mesures géophysiques ont été effectuées sur un laps de temps relativement court (une dizaine de jours) et sous une météo stable et anticyclonique (Juin 2003). L'accueil d'un stagiaire au LIRIGM (A. Curt) pour participer à ces mesures au coté d'E. Rey a constitué une aide importante.

Dans un second temps, une coupe verticale a été réalisée à l'endroit exact de chacun des profils de mesure à l'aide d'une pelle mécanique de 22 tonnes (cf. photos Annexe). Ces tranchées ont permis d'une part de visualiser directement la granulométrie du sol à l'aplomb des mesures (réalisation de photographies numériques sur toute la surface découverte) et d'autre part de prélever plusieurs échantillons de sol en différents endroits des profils.

III.4.1. Granulométrie réelle

Afin d'avoir un volume représentatif de sol, la norme française NFP 94-056 préconise de prélever plus de 250 tonnes de matériau lorsque la taille maximale des grains est de 80 cm (telle qu'observée en surface sur le terrain). Ceci étant évidement impossible, nous avons donc procédé de la façon suivante :

- Pour chaque prélèvement de sol, un volume de 2 à 3 mètres cubes a été mis de coté
- On procède ensuite par quartages successifs jusqu'à obtenir une masse de sol d'environ 150 kg après écrêtage à 100 mm (masse conforme à la recommandation de la norme) à l'aide d'une grille d'acier à maille carrée réalisée par les techniciens du Cemagref. (cf. photo Annexe).
- Un second tamisage est ensuite effectué à 50 mm afin de n'avoir plus que 20 kg à emporter au laboratoire pour réaliser les mesures de teneur en eau et une granulométrie classique par tamisage (voie humide).

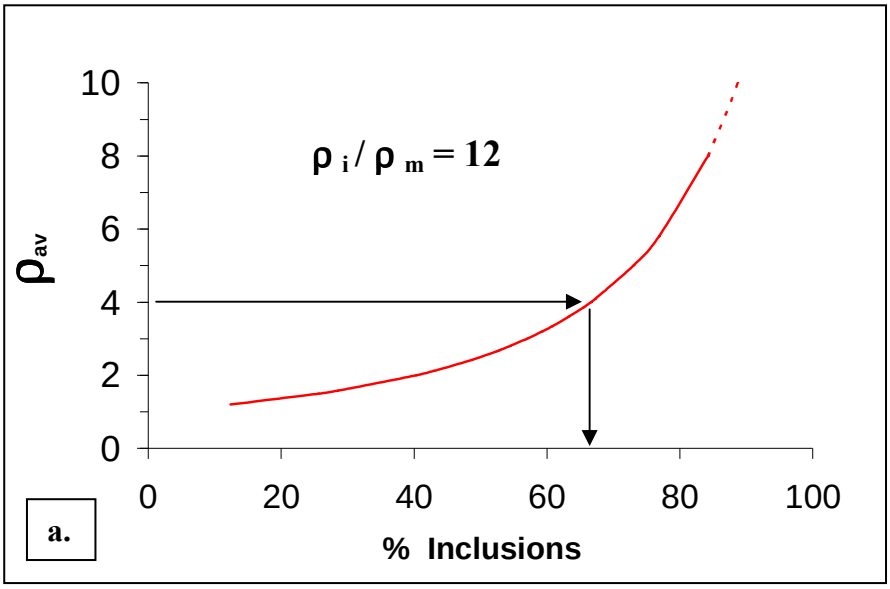
III.4.2. Analyse d'images

Les prises de vue ont été réalisées juste quelques heures après l'excavation. La présence de particules fines de la matrice sur le calcaire rend le contraste insuffisant entre matrice et blocs. De plus, l'éclairage solaire vertical et les ombres projetées par les reliefs sur la coupe rend difficile voire inopérant le traitement des images effectuées (photo Annexe). Cette approche ne sera pas explicitée dans ce rapport.

III.4.3. Interprétation des mesures géophysiques

Tomographie Electrique

A l'échelle du site, la résistivité moyenne calculée sur les 3 profils réalisés est de 180 Ω.m (177 Ω.m avec le dispositif Wenner alpha, 183 Ω.m en dipôle-dipôle). Le contraste de résistivité obtenu lors de la première campagne de mesures (de l'ordre de 12) nous permet de permet d'évaluer le pourcentage de blocs sur le site à 67 +/- 3 % (figure 7a). Le report de cette estimation sur chacune des courbes granulométriques disponibles (figure 7b) matérialise en abscisse la limite de taille entre les blocs et la matrice. La limite moyenne (en pointillé noir, figure 7b) correspond à une rupture de pente sur les courbes granulométriques, ce qui vérifie indirectement nos résultats.



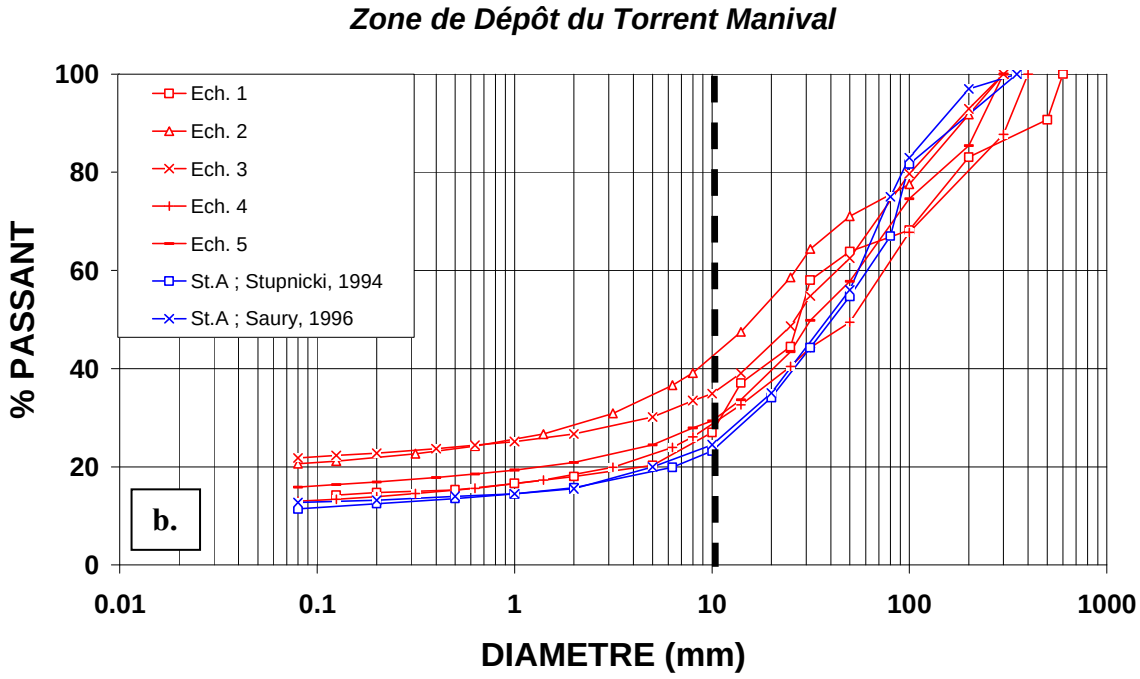


Figure 7 : a. Obtention d'un pourcentage de particules à partir de la résistivité mesurée sur le terrain
b. Le report de ce pourcentage sur le récapitulatif des analyses granulométriques réalisées au niveau de la zone de dépôt du torrent Manival (campagne de mesure 2003 + bibliographie) fait apparaître la limite moyenne de taille entre les blocs et la matrice.

Comparons maintenant les valeurs de résistivité de chaque échantillon avec leur granulométrie propre. Chaque prélèvement de sol représente une surface donnée sur la coupe de résistivité. La valeur moyenne de résistivité est calculée pour chacune de ces surfaces (figure 8a) puis, pour chaque échantillon, cette résistivité est associée à son pourcentage de passant à une taille donnée (figure 8b). L'opération est répétée pour trois tailles de passant différentes. On met ainsi en évidence une corrélation entre résistivité électrique et granulométrie mais dans le sens opposé à celui attendu (figure 8c). En effet une forte résistivité semble correspondre à un pourcentage important de fines (et notamment d'argiles). Or celles-ci sont beaucoup plus conductrices que le calcaire, même marneux.

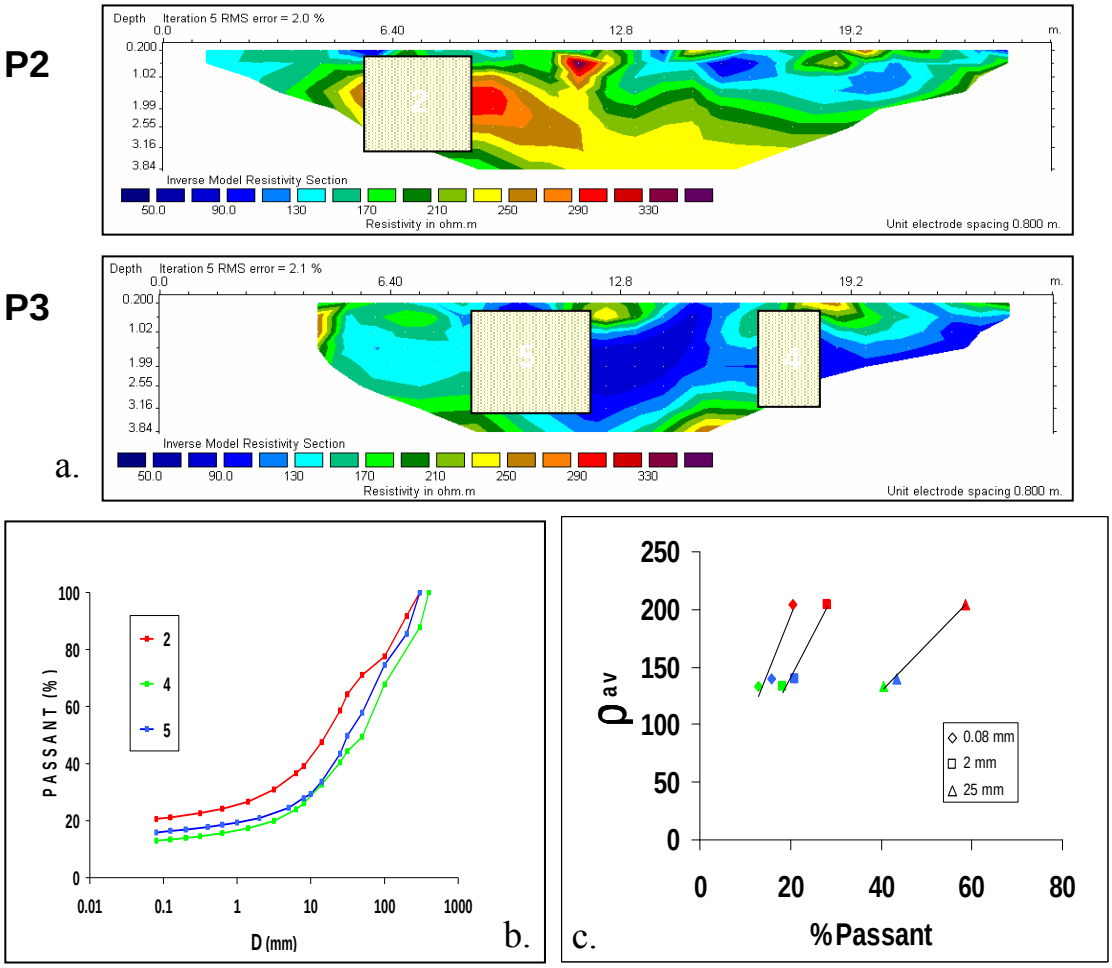


Figure 8 : *a*. Localisation des échantillons 2, 4 et 5 sur les coupes de résistivité électrique. *b*. Courbes granulométriques correspondantes. *c*. Relation entre résistivité électrique et granulométrie pour 3 tailles de passant.

Les analyses granulométriques ne semblent donc pas pouvoir expliquer ces différences de résistivité. Les teneurs en eau ont été mesurées sur le site afin d'examiner leur influence sur la résistivité. Elles sont assez homogènes puisque toutes comprises entre 4.5 et 5.2 %. Une augmentation de la teneur en eau devrait entraîner une diminution de la résistivité [Archie, 1942]. Or, dans notre cas, l'échantillon le plus humide est le plus résistif. Les variations de teneur en eau ne semblent donc pas responsables des différences de résistivité observées.

Il semble donc que les volumes échantillonnés soient insuffisants pour être représentatifs (§ III.4.1) et nous ne pouvons pas exclure que la granulométrie soit responsable des écarts de résistivité observée, mais simplement conclure que nos mesures ne sont pas suffisamment précises pour expliquer ces écarts.

Sismique

Selon la même démarche, les mesures de vitesse des ondes sismiques V_P et V_S dans le sol nous permettent d'estimer le pourcentage de blocs présents dans le sol. Nous utiliserons ici la loi d'homogénéisation théorique [Christensen & Lo, 1979]. Les données sont en cours de traitement.

Radar géologique

Une onde est diffractée par les éléments de taille inférieure à la longueur d'onde émise. A une fréquence donnée on pourrait donc estimer la proportion de blocs présents dans le sol dont la taille est inférieure à la longueur d'onde de l'antenne utilisée. Dans ce but, des tests à différentes fréquences ont été réalisés, permettant d'approcher la composition granulométrique du sol.
Nos résultats seront interprétés début 2004.

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce projet visait à caractériser les sols à granulométrie étalée in-situ au moyen de méthodes indirectes, afin de pouvoir éviter à l'avenir les opérations d'échantillonnage particulièrement lourdes sur ce type de matériaux.

Dans un premier temps, notre étude s'est focalisée sur l'apport de la méthode électrique. Les modélisations numériques ont montré qu'il est possible d'estimer la proportion de blocs dans un sol hétérogène à partir de la résistivité mesurée sur le terrain et du contraste de résistivité entre les 2 phases.

Cette méthodologie a été testée sur un site réel (le cône de déjection du torrent Manival) et a permis d'estimer la proportion de blocs avec une précision satisfaisante. En effet la limite de taille entre blocs et matrice est tout à fait cohérente avec la forme du faisceau granulométrique. La tomographie sismique devrait permettre de confirmer ce résultat.

Toutefois, la taille des plus gros blocs n'a pas permis d'échantillonner des volumes qui soient représentatifs et de fait nous n'avons pas pu corréler les variations de résistivité à des changements granulométriques au sein des dépôts.

Le traitement puis l'analyse des données radar devrait permettre d'obtenir des informations sur la taille des particules (en comptabilisant le nombre de particules par classe de taille), et donc ainsi de reconstituer la granulométrie du matériau étudié.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Archie G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIME*, 146, 54-62

Bussian A.E., 1983. Electrical conductance in a porous medium. *Geophysics*, v.48, pp 1258-1268.

Chammas R., 2002. Caracterisation mecanique de sols heterogènes par ondes de surface. *Ph. Thesis, Ecole Centrale de Nantes, France*.

Christensen R.M., LO K.H., 1979. Solution for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 27, pp. 315-330.

Loke M.H. & Barker R.D., 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, *Geophysical Prospecting*, 44, pp. 131-152.

Sen P.N., Scala C., Cohen M.H., 1981. A self-similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads. *Geophysics*, v. 46, pp 781-795.

Saury G., 1997. Caractérisation géomécanique d'un sol de torrent. *Mémoire de DEA 'MMGE'*. Université Joseph Fourier, 71 p.

Stokoe K.H., II, Nazarian S., Rix G.J., Sanchez-Salinero. I., Sheu J.C. and Mok Y.J., 1988. 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, ASCE Geotechnical special publication* No. 20, J.L. Von Thun, Ed., pp 264-278

Stupnicki P., 1994. Etude géotechnique des sols de torrent. *Mémoire de fin d'études,* ISTG, Université Joseph Fourier, 167 p.

PUBLICATIONS

Rey E., Garambois S., Jongmans D., Gotteland P., 2003. Characterization of alluvial fan deposits using electrical methods. *Proceedings of the 9th European Meetings of Environmental and Engineering Geophysics*, Prague, 4p.

ANNEXE













a). Excavation du terrain sur le profil P3.
b). Prélèvement par quartage de l'échantillon n°5 (le dispositif d'écrêtage se trouve en bas à gauche de la photo).
c). Pesée du sol écrêté à 100 mm.
d). Restauration du terrain après excavation des profils P1 et P2.
e) , **f).** Photographie du sol à l'aplomb de P2 (talus subvertical)