

Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable : application aux marnes noires de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France)

Olivier Maquaire^{a,*}, Arnaud Ritzenthaler^a, Denis Fabre^b, Bruno Ambroise^{a,2}, Yannick Thiery^c, Emmanuel Truchet^a, Jean-Philippe Malet^a, Jacques Monnet^b

^a Centre d'études et de recherches éco-géographiques, Cereg, FRE 2399 ULP-CNRS, 3, rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg cedex, France

^b Laboratoire interdisciplinaire de recherche impliquant la géologie et la mécanique, LIRIGM, UJF-ISTG, BP 53, 38041 Grenoble cedex, France

^c Groupe de recherche sur l'érosion de l'université Reims-Champagne-Ardenne, GREURCA, URCA, 57, rue Pierre-Taitinger, 51096 Reims cedex, France

Reçu le 31 janvier 2002 ; accepté le 23 avril 2002

Présenté par Jean Dercourt

Abstract – Characterisation of alteration profiles using dynamic penetrometry with variable energy. Application to weathered black marls, Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). A dynamic penetrometer with variable energy has been tested in a gullied catchment of Callovo-Oxfordian black marls (Draix, Alpes-de-Haute-Provence, France). After calibration and validation, simple convenient geotechnical criteria allow to interpret penetrograms in terms of type and thickness of layers in the weathered marl profile, with a centimetric precision: (1) the loose detrital cover, (2) the more or less compact regolith laying on (3) the marl bedrock. Once calibrated for a specific environment, this new prospecting method appears very useful, rapid and efficient to characterise shallow superficial formations and estimate their volume. *To cite this article: O. Maquaire et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 835–841.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

dynamic penetrometer / variable energy / weathered profile / black marls / badlands / research catchments of Draix / France

Résumé – La pénétrométrie dynamique à énergie variable a été testée dans les badlands sur marnes noires callovo-oxfordiennes des bassins versants de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). Après étalonnage et validation, des critères géotechniques simples adaptés à ce milieu permettent d'interpréter, avec une précision centimétrique, les pénétrogrammes en termes de type et épaisseur des couches du manteau d'altérites : (1) couverture détritique mobilisable, (2) régolite plus ou moins compact reposant sur (3) les marnes intactes. Moyennant un étalonnage spécifique à chaque milieu, cette nouvelle méthode de prospection apparaît très pratique, rapide et performante pour caractériser les formations superficielles peu épaisses et évaluer leur volume. *Pour citer cet article : O. Maquaire et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 835–841.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

pénétromètre dynamique / énergie variable / profil d'altérites / marnes noires / badlands / bassins versants de Draix / France

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : olivier.maquaire@eost.u-strasbg.fr (O. Maquaire).

¹ Adresse actuelle : Institut de physique du Globe de Strasbourg, UMR 7516 ULP-CNRS, 5, rue René-Descartes, 67084 Strasbourg cedex, France.

² Adresse actuelle : Institut de mécanique des fluides et des solides, IMFS, UMR 7507 ULP-CNRS, 2, rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France.

Abridged version

1. Introduction

A precise knowledge of volumes and vertical profiles in superficial formations is necessary for many applications in geomorphology and hydrology. Dynamic penetrometry, which measures vertical resistance profiles induced by density and compactness variations between layers, has long been used in geotechnical prospecting, but is not convenient for measuring thin, low resistance layers [4, 5, 9]. With the recent development of the portable system using variable impact energy [10], dynamic penetrometry has become more performing for such applications, especially in uneven areas.

This new method has been tested in the ‘Terres Noires’ (Southeastern Alps, France), within the badlands of the Draix research catchments, in order to estimate and map the large spatial variations in thickness of the weathered marl profile, which constitutes the main water and sediment reservoir in this area very sensitive to erosion [6].

2. Principle and method

Dynamic penetrometer with variable energy [1] records mechanical resistance [MPa] profile [8] when driving manually a rod into the soil using a standardised hammer (Fig. 1). It allows identifying thin, low resistance layers, by modulating the blows of the hammer. Easy and rapid to use, this portable automatic penetrometer is well adapted for detailed prospecting and mapping, even in rugged areas such as badlands [10].

Each penetrometry sounding products a vertical resistance profile called penetrogram (Fig. 2), whose interpretation permits to identify different layers and estimate their thickness using two main criteria: well-defined resistance thresholds and the shape of the penetrogram. As for most geophysical methods, this method requires a specific calibration for each kind of environment.

The procedure for both calibrating and validating the method in any study area consists in:

- making penetrometry soundings and observation pits along the same vertical profiles at several sites representative of the main geomorphological units and topographic conditions;
- calibrating the method at some of these sites, to deduce interpretation criteria by comparing measured penetrograms with observed profiles;
- validating the calibrated method at the other sites, by comparing observed profiles with profiles deduced from penetrograms using these criteria.

3. Study area

This study was made in the small (86 ha) Laval catchment (Draix, Alpes-de-Haute-Provence, France) [6], which is incised into Callovo-Oxfordian black marls, between 847 m and 1260 m a.s.l.. Weathering of black marls with

clayed shale facies leads to superficial formations of variable nature and thickness, depending on local structural and topographic conditions. They consist of several superposed layers, whose density and compactness increase with depth [2, 3]:

- (1) the *loose detrital cover*, made of locally produced clasts or colluvial material sensitive to erosion;
- (2) the *regolith of marl*, more or less fragmented by decompression, which can be subdivided into (2a) the *loosened upper regolith*, where the marl plates and structure are deteriorated, and (2b) the *compact lower regolith*, conserving the marl structure but not its cohesion (schistosity opening);
- (3) the *bedrock* at the bottom, which is very compact, structured and cohesive.

Penetrometry was tested along longitudinal and transversal transects crossing gully systems at seven sites representative of the main morphological and topographical conditions [7], as shown on Fig. 2 for site 7. Altogether, 150 penetrometry soundings and 27 control pits were made.

4. Results

Systematic, careful comparison of measured penetrograms and observed pit profiles at two calibration sites has led to the following criteria (Fig. 2a):

- below 5 MPa, the *loose detrital cover* (layer 1), accumulated material transiting on slopes or sedimentary load in talwegs;
- between 5 and 35 MPa, the *marl regolith* (layer 2), with some possible distinction between (2a) the *loosened upper regolith* (regular increase in resistance with depth) and (2b) the *compact lower regolith* (high but largely variable resistance due to marl plates breaking);
- above 35 MPa, the resistant compact *marl bedrock* (layer 3).

These geotechnical criteria have been used to interpret soundings at five validation sites (Figs. 2b and 3b): the nature and thickness of most observed layers have been correctly determined by penetrometry also, with a centimetric precision. The distinction between layers 2a and 2b appears also much easier by penetrometry than by direct observation. Nevertheless, the overall consistency of all interpretations must be systematically verified, since some soundings can be strongly affected by local conditions: an unrealistic large thickness has been obtained for sounding No. 61 (Fig. 3b and 3c), just because the rod followed a subvertical open joint within the marl.

As shown for the vertical section deduced from 32 soundings on the transect of site 7 (Fig. 3c), the application of these validated criteria has led to realistic, consistent variations for the weathered marl profile thickness, i.e.:

- maximum on crests, because of a more efficient lateral decompression;
- homogeneous on gully sides, as a result of both vertical weathering and lateral transit;
- minimum in talwegs, which are more frequently scoured.

These results still need to be interpreted geomorphologically and applied to the whole catchment.

5. Conclusion

Dynamic penetrometry with variable energy provides a rapid, performing and not destructive method useful for identifying thin layers in weathered profiles (centimetric precision and resolution), and mapping their thickness and

volume. Coupled with topographic surveys and hydrodynamical and mechanical characterisations of the identified layers, this geotechnical method can help understanding and modelling the hydrological and morphodynamical behaviour of these marly catchments prone to erosion. After a specific calibration using the procedure tested for black marls, it could be applied to other types of superficial formations.

1. Introduction

Une connaissance précise et détaillée des volumes et profils verticaux des formations superficielles, qui constituent les principaux réservoirs d'eau et de matériau mobilisable, est nécessaire pour de nombreuses applications, tant en géomorphologie qu'en hydrologie. Les méthodes géophysiques et géotechniques disponibles pour de telles prospections et cartographies sont lourdes à mettre en œuvre, et donc peu utilisables en terrain difficile d'accès, et ont en général une résolution verticale insuffisante pour identifier des successions de couches minces.

Ainsi, la pénétrométrie dynamique, qui exploite les variations de résistance à l'enfoncement induites par les différences de compacité entre les couches, est utilisée depuis longtemps en prospection géotechnique [9], mais avec une énergie de battage constante qui la rend inadaptée pour identifier des couches peu épaisses et peu compactes. Cependant, des essais précurseurs avec du matériel léger ont eu lieu dès les années 1980 sur des matériaux tendres et altérables, comme les marnes du Sud-Est de la France [4, 5]. Avec le développement récent d'un système portable [10], la pénétrométrie dynamique à énergie variable apparaît maintenant beaucoup mieux adaptée à ce type d'application, notamment en zone accidentée.

Cette méthode a été testée et validée dans un secteur de *badlands*, dans les Terres noires du Sud de la France : les bassins versants de Draix, où le manteau d'altérites sur marne, qui constitue le principal réservoir hydrique et sédimentaire, présente de fortes variations d'épaisseur, essentielles à connaître pour comprendre et modéliser le comportement de ces bassins affectés de crues violentes très érosives [6].

2. Principe et méthode

La pénétrométrie dynamique à énergie variable [1] consiste à enfoncer dans le sol, par battage manuel à l'aide d'un marteau standardisé, une pointe fixée à un train de tiges (Fig. 1). Pour chaque coup de marteau, une procédure automatisée permet de mesurer la profondeur d'enfoncement e [m] et la vitesse d'im-

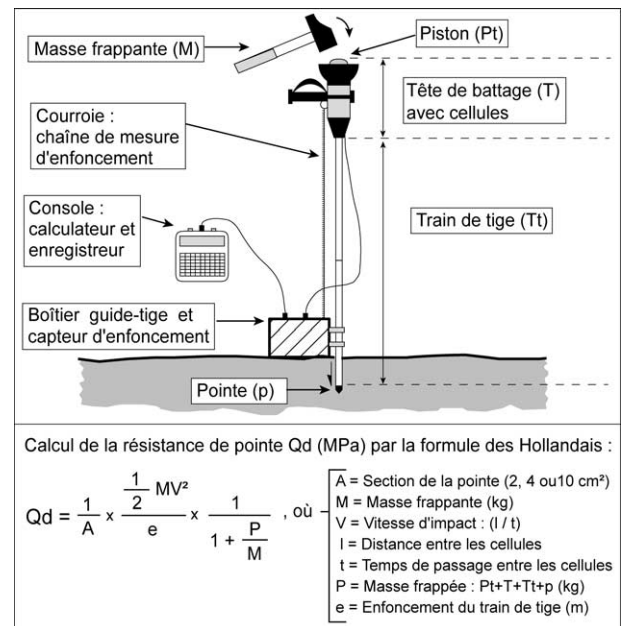


Figure 1. Principe de fonctionnement de la pénétrométrie dynamique à énergie variable.

Figure 1. Description of the portable dynamic penetrometer with variable energy.

pect V [m s⁻¹] du marteau, de calculer la résistance de pointe Q_d [MPa] par la « formule des Hollandais » [8] (cf. Fig. 1) et d'enregistrer ce couple profondeur–résistance. Le sondage se poursuit jusqu'au « refus » signalé par l'appareil, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'on rencontre une résistance trop élevée, se traduisant par un enfoncement nul ou inférieur à un seuil fixé (de l'ordre du millimètre) – avec la distinction importante à faire in situ entre les « vrais refus » se manifestant généralement par une augmentation progressive de la résistance et les « faux refus » marqués par une augmentation brutale de la résistance au contact d'un obstacle local (bloc compact, plaque), obligeant à recommencer le sondage à faible distance.

L'intérêt du pénétromètre est de permettre une prospection fine (pas d'enfoncement infra-centimétrique) des couches de faible résistance, par la maîtrise de l'énergie de battage, en modulant l'intensité des coups de marteau, et par le contrôle du couple

profondeur-résistance (lecture sur la console entre chaque coup de marteau). De plus, outre sa compacité et sa légèreté (moins de 10 kg), sa simplicité et sa rapidité d'emploi du fait de son automatisation le rendent bien adapté à des campagnes de prospection et de cartographie, même dans des zones difficiles d'accès [10].

Chaque sondage pénétrométrique produit un profil vertical de résistance à l'enfoncement, appelé pénétrogramme (Fig. 2). L'interprétation, pour identifier les différentes couches présentes et estimer leurs épaisseurs à l'aplomb des sondages réalisés, se fait en comparant les valeurs de résistance mesurées à des seuils préfixés, mais aussi en analysant l'allure même des courbes mesurées : présence de cassures ou de points d'inflexion, de segments à variation plus ou moins régulière... Elle revient à définir, pour chaque type de formation superficielle, des seuils de résistance et des formes de courbe caractéristiques. Comme pour toutes les méthodes géotechniques et géophysiques indirectes, un étalonnage spécifique est donc à réaliser et à valider dans chaque contexte géologique.

La procédure classique d'étalonnage et de validation, pour une zone d'étude donnée, consiste à :

- réaliser, en plusieurs sites représentatifs des principales unités géomorphologiques et positions topographiques, des sondages pénétrométriques, puis des fosses à l'aplomb de chaque sondage ;
- étalonner la méthode sur une première série de sites, en identifiant les critères d'interprétation à prendre en compte par comparaison des pénétrogrammes mesurés aux profils observés ;
- valider cet étalonnage sur une deuxième série de sites, en comparant les profils observés aux profils déduits de l'interprétation des pénétrogrammes selon ces critères – ce qui peut conduire à reprendre de façon itérative cette procédure.

Une fois l'étalonnage réalisé et validé dans un milieu donné, l'interprétation de chaque nouveau sondage peut être faite en tenant compte du contexte structural, topographique et morphologique.

3. Site d'étude et application

L'étude a été réalisée dans le petit bassin versant du Laval (86 ha) à Draix (Alpes-de-Haute-Provence), équipé et suivi par le Cemagref pour l'étude des processus hydrologiques et érosifs en montagne [6]. Ce bassin est encaissé principalement dans les marnes des Terres Noires du Callovo-Oxfordien, entre les altitudes 847 et 1260 m. L'érosion a incisé des ravines coalescentes particulièrement développées et ramifiées, séparées par d'étroits interfluves (échines). La structure, notamment les pendages, confère à

cette morphologie de *badlands* des profils transverses variables et plus ou moins dissymétriques, les pentes des flancs variant entre 30° et 70°.

La dégradation superficielle de ces marnes à faciès de schistes argileux, qui se fragmentent en clastes de tailles diverses, engendre des altérites de nature et d'épaisseur très variables selon les conditions topographiques et structurales, constituées de plusieurs couches superposées, de densité apparente et de compacité croissantes en fonction de la profondeur [2, 3], dont notamment :

- (1) la *couverture détritique* mobilisable, en place ou colluvionnée (lit de paillettes friables à matrice fine peu abondante, formant une couche homogène peu cohésive très sensible à l'érosion) ;
- (2) le *régolite*, où la marne est débitée en plaquettes tabulaires ou nodules ovoïdes, avec une subdivision possible entre (2a) le *régolite supérieur ameubli*, où la marne est très fragmentée et sa structure estompée, et (2b) le *régolite inférieur compact*, qui conserve la structure de la marne, mais pas sa cohésion, du fait de l'ouverture des plans de schistosité ;
- (3) à la base, la *marne intacte*, très compacte, structurée et cohésive.

Afin de tester la pénétrométrie dans ce type de milieu, une étude a été menée en novembre 1999 et avril 2000 sur des transects longitudinaux ou transverses aux ravines et échines [7] : sept sites accessibles, représentatifs des principales situations morphologiques du bassin, très contrastées en termes de pente, exposition et altitude, ont été sélectionnés (Fig. 3). Au total, 150 sondages pénétrométriques ont été effectués avec des pointes et tiges de 2 cm² de section, ainsi que 27 fosses d'étalonnage ou de validation : la distinction visuelle ou au toucher entre les couches de marnes dégradées s'est avérée plus ou moins aisée et précise selon les conditions d'observation (éclairage, humidité, orientation de la schistosité).

4. Résultats

La comparaison systématique des pénétrogrammes et des profils observés dans les fosses, aux deux sites d'étalonnage, a permis de retenir les critères géotechniques suivants pour caractériser les trois niveaux de dégradation dans ce type de milieu (Fig. 2a) :

- en deçà de 5 MPa, la couverture détritique (couche 1), très peu résistante (clastes produites et/ou en transit sur les versants, ou charge sédimentaire des fonds de talweg) ;
- de 5 à 35 MPa, le régolite (couche 2), avec une distinction possible entre le régolite ameubli (couche 2a), marqué généralement par une augmentation assez régulière de la résistance en profondeur, et le régolite

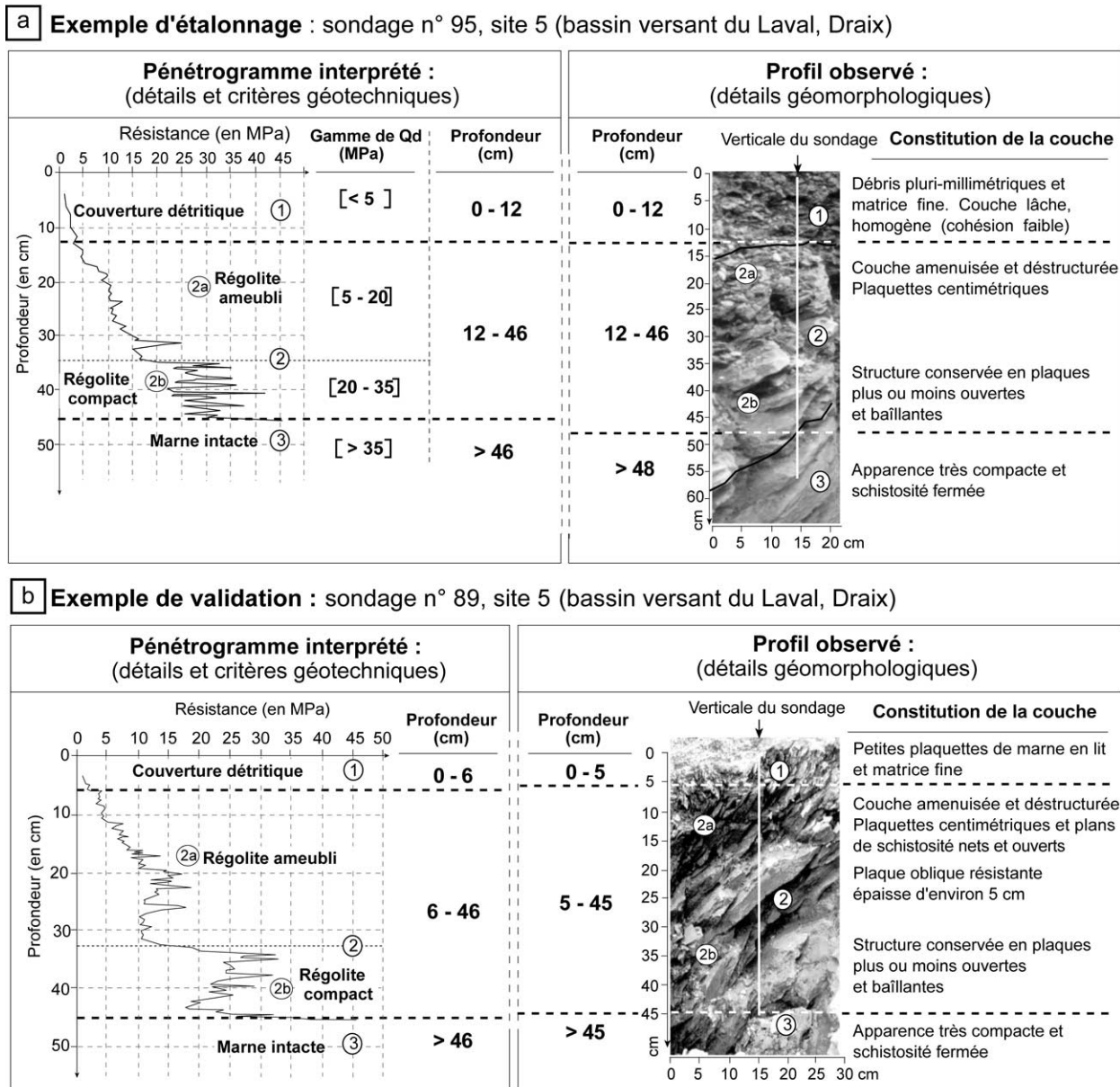


Figure 2. Principe d'interprétation des pénétrogrammes : organisation du manteau d'altérites et profil de résistance associé. **a** : Étalonnage; **b** : validation.

Figure 2. Interpretation of the penetrometers: organisation of the weathered profile and associated strength profile. **a**: Calibration; **b**: validation.

compact (couche 2b), où la résistance est plus forte, mais varie largement au passage de chaque plaque de marne ;

– au-delà de 35 MPa (valeur prise comme seuil de refus), la marne (couche 3) très résistante.

Ces critères géotechniques ont été utilisés pour interpréter les sondages obtenus aux cinq sites de validation. Ainsi que l'illustrent la Fig. 2b et le tableau de la Fig. 3b, la pénétrométrie permet de bien identifier les structures en place et d'estimer leurs épaisseurs et profondeurs avec une précision de quelques centimètres, du même ordre de gran-

deur que l'incertitude sur les observations. Elle peut avantageusement remplacer l'observation directe du régo-lite. Notons que la plaque résistante localisée dans le régo-lite ameubli (profondeur 20–27 cm) est très bien mise en évidence sur le pénétrogramme (Fig. 2b).

La cohérence d'ensemble de ces interprétations doit cependant toujours être vérifiée, au besoin par des fosses de contrôle, certains résultats pouvant être trop influencés par des conditions locales. C'est par exemple le cas pour le sondage n° 61 (Fig. 3b et 3c), donnant une épaisseur de régo-lite bien trop forte, car

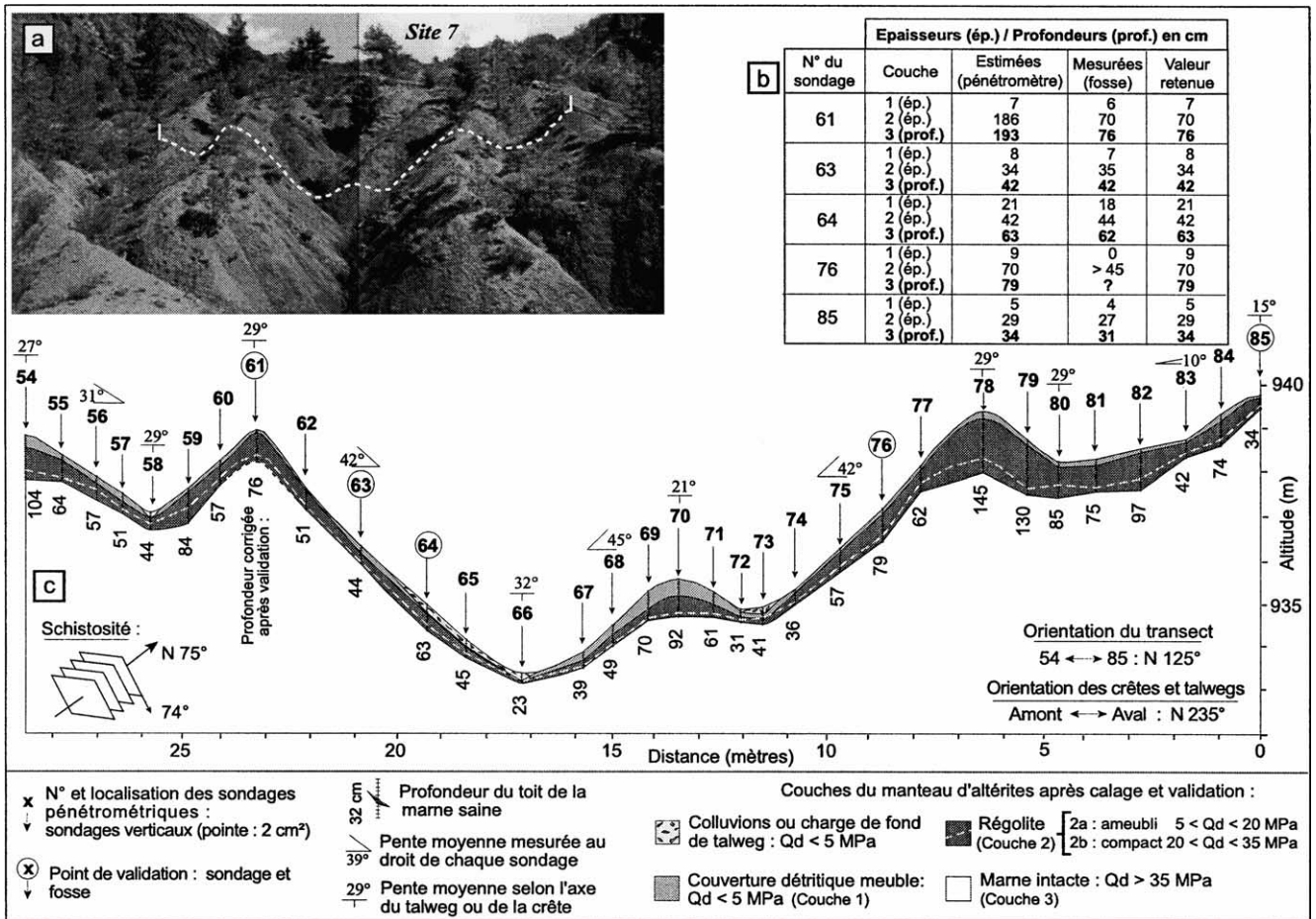


Figure 3. Transect longitudinal du site 7 (bassin versant du Laval, Draix), 29 avril 2000. **a** : Photographie du site ; **b** : tableau comparatif des épaisseurs des couches déduites des pénétrogrammes et observées dans les fosses de validation ; **c** : coupe verticale estimée par pénétrométrie.

Figure 3. Longitudinal transect at site 7 (Laval catchment at Draix), 29 April 2000. **a** : Photograph of the site ; **b** : comparison of thicknesses deduced from penetrometers and observed in validation pits ; **c** : vertical section assessed by penetrometry.

irréaliste en position d'échine : une fosse de contrôle a permis de montrer que le train de tige avait en fait emprunté une fracture subverticale ouverte dans la marne.

Ainsi validés pour ce milieu, ces critères permettent d'interpréter tous les autres sondages disponibles. À titre d'illustration de l'application de cette méthode et de son apport en prospection, la Fig. 3c montre la coupe verticale déduite de la pénétrométrie à partir de 32 sondages réalisés en une journée par deux personnes sur le même transect du site 7 (Fig. 3a) – rapidité que ne permettrait aucune autre méthode. Les résultats apparaissent cohérents, avec une épaisseur des altérites :

- maximale sur les crêtes, du fait notamment d'une décompression latérale plus importante ;
- homogène sur les flancs, affectés d'une double dynamique d'altération verticale et de transit latéral ;
- minimale dans les talwegs, plus fréquemment récurés.

Ces résultats sont bien sûr à interpréter du point de vue géomorphologique et à étendre à l'ensemble du bassin versant, en vue d'une cartographie des épaisseurs et d'une évaluation des volumes.

5. Conclusion

La pénétrométrie dynamique à énergie variable s'avère, y compris en zone accidentée, une méthode de prospection pratique, rapide, performante et très peu destructive pour estimer et cartographier la nature, l'épaisseur et le volume des couches du manteau d'altérites sur marnes noires. À travers la résistance mécanique mesurée, elle renseigne aussi sur leurs caractéristiques physiques. Moyennant certaines précautions d'emploi et d'étalonnage, elle fournit ainsi des informations utiles, mais difficiles à obtenir autrement, sur ces formations superficielles peu épaisses, grâce aux précision et résolution centimétriques obtenues.

À condition de préciser encore l'influence des te-neurs en eau sur les résistances mesurées, cette méthode rend aussi possible le suivi de l'évolution des épaisseurs et volumes par des campagnes de sondages répétées. Couplée à une caractérisation hydrodynamique et mécanique des couches identifiées et à des leviers topographiques détaillés, cette approche géotechnique devrait permettre d'améliorer la compréhension et la modélisation du fonctionnement hydro-

logique et morphodynamique de ce milieu marneux soumis à une érosion intense.

Moyennant un étalonnage spécifique, selon la procédure simple et efficace testée dans les marnes noires de Draix, cette méthode peut s'appliquer à d'autres types de formations superficielles, sous réserve des limites d'application, en particulier lorsque le milieu est hétérogène, avec fragments de roche, ou lorsqu'il présente une fissuration.

Remerciements. Cette recherche a été financée par le Programme national de recherches en hydrologie : « Étude et modélisation des mécanismes impliqués dans la formation des crues sur bassins versants torrentiels marneux » (projet 01 PNRH 43). Contribution Insu n° 310. Contribution Eost n° 2002.02-UMR 7516.

Références

- [1] Afnor, Norme française NF XP P 94-105, Essai de pénétration dynamique à énergie variable, Association française de normalisation, 2000.
- [2] M. Bufalo, L'érosion des terres noires dans la région du Buëch (Hautes-Alpes, France), thèse, université Aix-Marseille-3, 1989, 230 p.
- [3] J. Chodzko, M. Lecompte, Suivi expérimental du ravinement dans les Baronnies, Trav. Lab. Géog. Phys. Paris-7, 20, 1992, 111 p.
- [4] B. Dumolard, Mise au point d'une technique d'étude et de mesure de l'altération des marnes dans les Terres Noires du Bathonien-Oxfordien, précédée d'une étude géologique des bassins versants expérimentaux de Draix (région de Digne, basses Alpes, France, rapport de stage USMG, LIRIGM-Cemagref, Grenoble, 1984, 125 p.
- [5] T.S.H. Phan, Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des Terres Noires du Sud-Est de la France, thèse, université Joseph-Fourier, Grenoble-1, 1993, 246 p.
- [6] D. Richard, N. Mathys, Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi, in : Actes du séminaire « Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne », Draix-Le Brusquet-Digne, 22–24 octobre 1997, Cemagref Éditions, Antony, 1999, pp. 11–28.
- [7] A. Ritzenthaler, Apports de la caractérisation des formations superficielles de marnes à la détermination des zones de production de sédiments par mouvements de masse dans les bassins-versants. Application aux bassins-versants marneux de Draix et de Barcelonnette (Alpes du Sud, France), Mémoire DEA « Systèmes Spatiaux et Environnement », ULP, Strasbourg, 2001, 125 p.
- [8] G. Sanglerat, The penetrometer and soil exploration, Elsevier, 1975.
- [9] E. Waschkowski, Le pénétromètre dynamique, Bull. Lab. Ponts et Chaussées 125 (1983) 95–103.
- [10] S. Zhou, Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable type Panda, thèse, université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand-2, 1997, 179 p.