

détermination des caractéristiques mécaniques au cisaillement des argiles litées cas du glissement de la combe d'Harmalière

determination of shear mechanical characteristics
of laminated clays at failure
landslide of "la combe d'Harmalière"

M. AL HAYARI, P. ANTOINE, G. BIGUENET, J. MONNET, H. MORA

Institut de Recherches Interdisciplinaires de Géologie et de Mécanique
Université Joseph Fourier*

Rev. Franç. Géotech. n° 50, pp. 71-77 (janvier 1990)

Résumé

L'étude concerne un vaste glissement de terrain (45 hectares), situé à 35 km au sud de Grenoble, dont la rupture s'est produite le 7 mars 1981 au sein d'une formation d'argiles lacustres litées. D'une part, nous avons mis en œuvre une analyse a posteriori permettant d'évaluer les caractéristiques mécaniques globales à la rupture (cohésion et angle de frottement) que nous avons ensuite pu vérifier à l'aide de la méthode des éléments finis basée sur la théorie de l'élasto-plasticité. D'autre part, nous avons mis en œuvre une série d'essais in situ par pressiométrie ainsi qu'un programme d'essais de laboratoire (essai triaxial). De ces deux séries d'essais, nous tirons un ensemble de caractéristiques mécaniques que nous comparons aux caractéristiques déduites de l'analyse a posteriori.

Abstract

We study a large landslide (45 ha) which is located 35 km south of Grenoble. The failure occurred on 1981 march 7th in a mass of laminated clays. On one hand we used a back-analysis to find the shearing properties at failure (cohesion and friction angle). Then we checked these parameters using the finite element method based on elasto-plasticity. On the other hand, we developed an experimental program by pressuremeter and triaxial tests. From these test sets, we deduce mechanical parameters which we compare with those issued from back-analysis.

* BP 53 X, 38041 Grenoble Cedex.

1. PRÉSENTATION GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE DU GLISSEMENT

1.1. Contexte géologique

Une reconstitution de la structure du versant a permis de révéler la présence d'anciennes vallées du Drac creusées dans le substratum de calcaires argileux du Lias. Elles sont comblées par un remplissage d'alluvions terminé par un niveau de transition d'argiles à galets. Ce dernier est recouvert par un épais dépôt d'argiles litées (environ 200-250 m) surmonté par un placage superficiel de moraines. Ces argiles litées proviennent du remplissage d'un ancien lac qui s'était créé suite à l'obturation de la vallée du Drac par le glacier de l'Isère au Würm II, ce qui peut expliquer leur structure particulière, caractérisée par une alternance de lits réguliers silteux clairs et d'argiles gris-noir, d'épaisseur variable (du mm au dm), leur faciès pouvant changer tant verticalement qu'horizontalement.

Au regard de l'épaisseur de ce dépôt, le glissement n'a pu se produire qu'au sein de celui-ci.

1.2. Description du glissement

La cartographie a permis de révéler clairement l'existence d'une niche d'arrachement, d'une hauteur d'environ 30 m et fortement pentée (entre 45 et 60°) qui culmine à la cote 710. Le glissement se limite, vers l'amont du versant, à la cote 730, par une succession de niches secondaires.

En contrebas de l'escarpement principal apparaît une large dépression marquée par des rétentions d'eau importantes. Cette dépression, qui se termine dans un bois de conifères complètement bouleversé, souligne le début du corps du glissement. Ce dernier est constitué par une série d'écaillés argileuses émergeant plus ou moins de la masse (jusqu'à 10 mètres) et de replats portant les restes du boisement primitif. A partir de la cote 560, après un talus frontal, le glissement se prolonge par une longue coulée boueuse, assez profondément ravinée, se terminant dans le lac de Monteynard. Le volume de ces matériaux ayant pénétré brutalement dans la retenue, lors de la rupture, a été estimé par l'EDF à 250 000 m³.

2. ANALYSE DES CONDITIONS DE STABILITÉ

La démarche suivie est de déterminer un angle de frottement interne résiduel à partir d'une analyse a posteriori de stabilité.

Cette analyse exige que l'on soit fixé sur la position précise de la surface de rupture, ainsi que sur les paramètres mécaniques et hydrauliques existant lors de la rupture.

2.1. Acquisitions des données

Ne pouvant, faute d'instrumentation, lever l'incertitude sur la localisation de la surface de glissement, nous avons dû examiner diverses hypothèses qui tenaient compte de traits morphologiques et de la structure litée des argiles. Il a été alors envisagé une surface unique dont la position n'a été repérée qu'à ses deux extrémités :

- une zone haute se situant dans la niche d'arrachement principale à la cote 710 ;
- une zone basse supposée être au voisinage du talus frontal.

Nous avons également étendu la surface de glissement vers le haut, au-delà de la niche principale, jusqu'à des crevasses de régression visibles jusqu'à la cote 730 (fig. 1) afin de cerner avec davantage de précision la stabilité de l'ensemble de la Combe.

A partir des profils ainsi définis et calés sur le profil longitudinal avant glissement, deux méthodes classiques d'analyse de stabilité ont été mises en œuvre :

- méthode de Bishop (circulaire) ;
- méthode de Spencer (non circulaire). Cette dernière suppose l'existence de forces intertranches parallèles. Le poids volumique saturé est pris de 20 kN/m³. Nous choisissons l'hypothèse du toit de la nappe coïncidant avec la surface du versant.

2.2. Analyse a posteriori par les méthodes de Bishop et Spencer

La comparaison des résultats obtenus par la méthode a posteriori appliquée aux diverses surfaces de glissement (fig. 1) amène à des conclusions intéressantes.

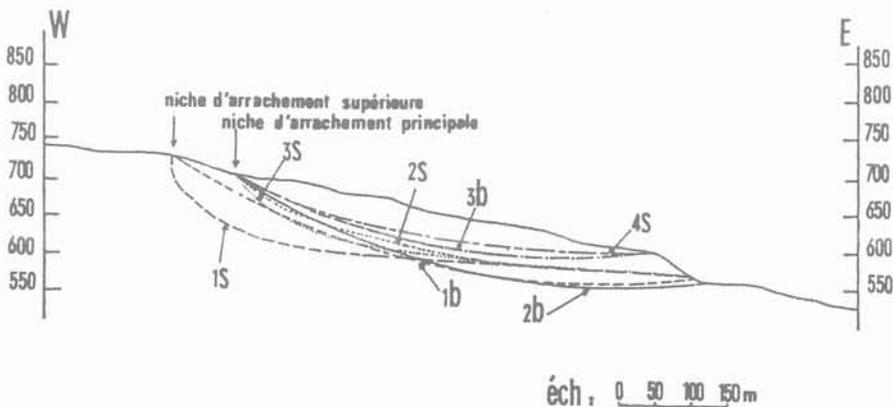


Fig. 1. — Profils d'analyse de stabilité par les méthodes de Bishop et de Spencer.
Fig. 1. — Cross section for stability analysis by Bishop and Spencer methods.

Géométrie probable de la surface de glissement

Dans le cas où la limite supérieure est la niche d'arrachement principale, cette surface peut adopter deux formes extrêmes, 3s et 4s, se terminant respectivement à la base et au sommet du talus inférieur. On constate que ces deux cas correspondent à des angles de frottement résiduels inférieurs à ceux qui sont déduits par calcul pour les surfaces 1s et 1b, dont l'origine se situerait à la cote 730 (fissures de régression), ce qui rend moins vraisemblable le jeu de ces dernières.

Angles de frottement résiduels

On peut ainsi proposer des valeurs d'angles de frottement résiduels dépendants des hypothèses sur la localisation et la géométrie de la surface de glissement et ceci en partant de la niche d'arrachement principale à la cote 710:

- surface de rupture passant au sommet du talus: $\varphi'r = 16 \pm 2^\circ$. Dans ce cas, la profondeur de la surface peut être estimée à $45 \text{ m} \pm 5 \text{ m}$;
- surface de rupture passant par la base du talus: $\varphi'r = 18 \pm 1^\circ$. La profondeur maximale de la surface est, alors, de $70 \pm 10 \text{ m}$.

2.3. Analyse en déformation par la méthode des éléments finis

L'analyse en déformation, par la méthode des éléments finis, nous permet:

- d'évaluer la distribution des efforts et déformations au sein de la masse instable;
- de localiser toutes les zones à l'état de rupture (zones de grandes déformations);
- d'estimer le coefficient de sécurité moyen le long d'une surface arbitraire.

Nous avons mis en œuvre le programme Z. Soil de Zace. Ce dernier dessine, à partir d'un profil découpé en plusieurs éléments, un maillage dense sur lequel sera effectuée l'analyse non linéaire basée sur le critère de Drucker-Prager.

Pour l'application au glissement d'Harmalière les données de calcul étaient les suivantes:

- poids spécifique humide du sol $\gamma_h = 20 \text{ kN/m}^3$;
- cohésion $c'r = 0$, angle de frottement $\varphi'r = 15-17^\circ$;
- module de déformation $E = 11\,500 \text{ kPa}$;
- coefficient de Poisson $\nu = 0,42$ (voir ci-après 3.1 et 3.2).

La figure 2 met en évidence l'association de deux types de mouvements: un tassement en tête de versant et une translation d'ensemble révélant un mécanisme de rupture rotationnel. On constate que l'enveloppe des vecteurs déplacement est très proche de ce que les observations de surface permettent d'envisager pour la forme de la surface de rupture.

Quant aux caractéristiques mécaniques obtenues pour $F = 1$, nous trouvons:

- une cohésion résiduelle nulle $c'r = 0$;
- un angle de frottement interne résiduel $\varphi'r = 16 \pm 1^\circ$.

3. DÉTERMINATION DIRECTE DES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU SOL

3.1. Essais de laboratoire

Un programme de laboratoire a été élaboré à partir de prélèvements effectués à la tarière faute de pouvoir disposer de carottes intactes. Le sol a d'abord été reconsolidé au laboratoire. Ensuite, des échantillons de diamètre 35 mm et de hauteur 70 mm ont été placés en consolidation pendant 24 h à la valeur de la pression d'essai triaxial.

Le sol a été cisailé dans les conditions drainées pour 4 valeurs différentes de la pression latérale. La variation de volume a été mesurée par l'extérieur de l'échantillon. Un logiciel de dépouillement automatique (MONNET, 1987) permet alors de déterminer les caractéristiques mécaniques du sol. Les résultats sont les suivants:

- cohésion: 0 kPa;
- angle de frottement interne: $26,2^\circ$;
- angle de frottement intergranulaire: $21,6^\circ \pm 2,2^\circ$;
- coefficient de Poisson: $0,384 \pm 0,057$;
- module de Young: 4 638 kPa.

On constate:

- que la valeur du module de Young du sol varie du simple au double, et dépend de la pression d'essai et de la valeur du cisaillement;
- la bonne précision obtenue sur le coefficient de Poisson;
- que le frottement intergranulaire a une valeur élevée qui correspond théoriquement à la valeur du frottement résiduel du sol.

Les courbes correspondant à ces 4 essais sont représentées sur les figures 3, 4 et 5.

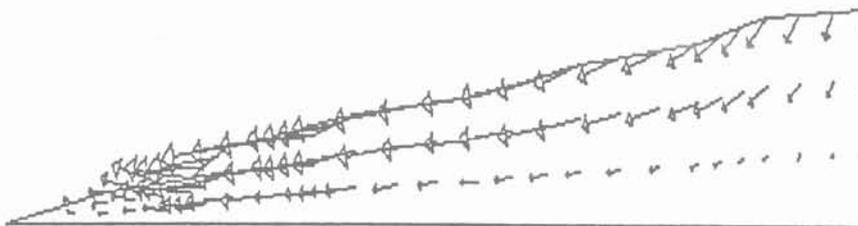
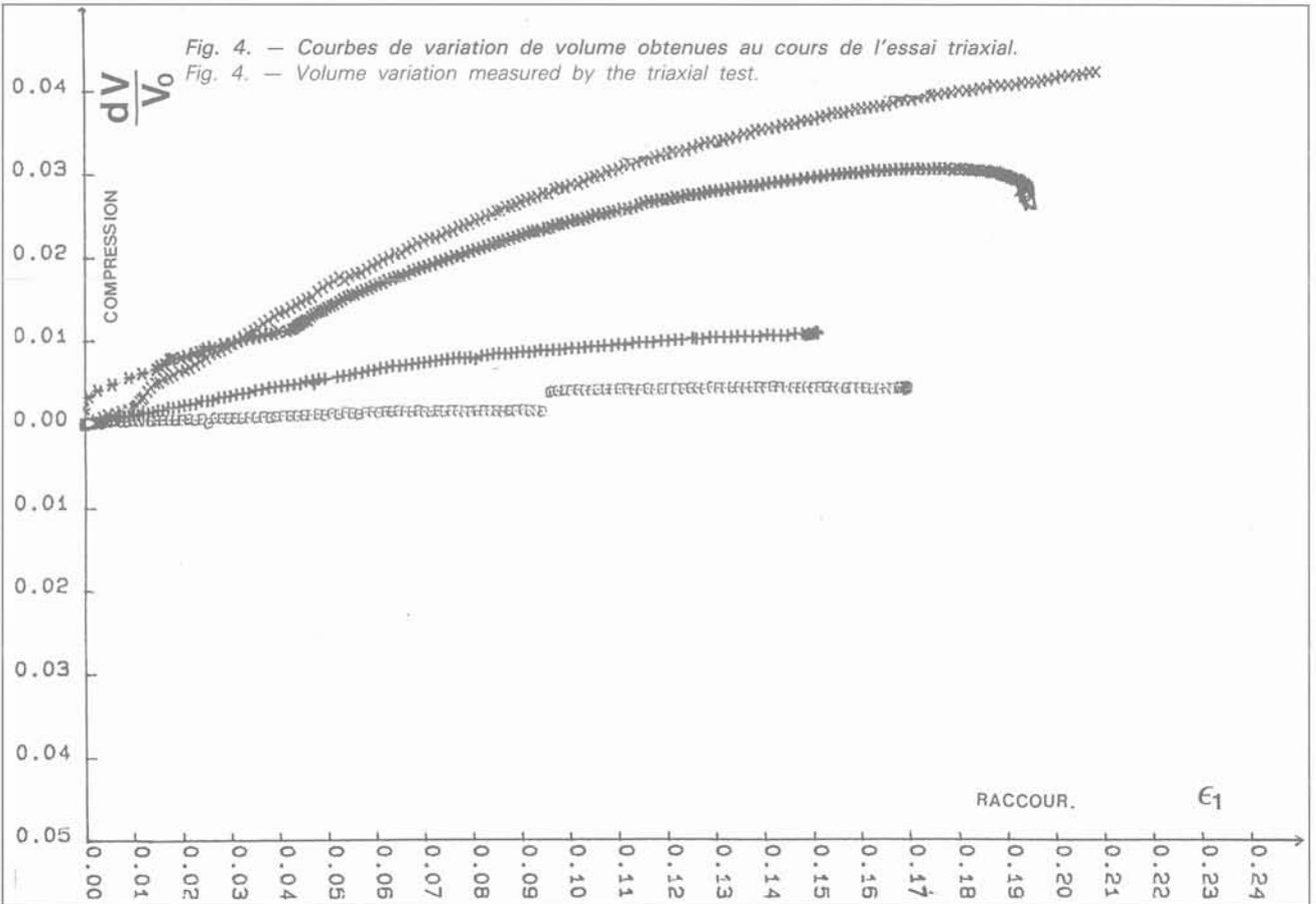
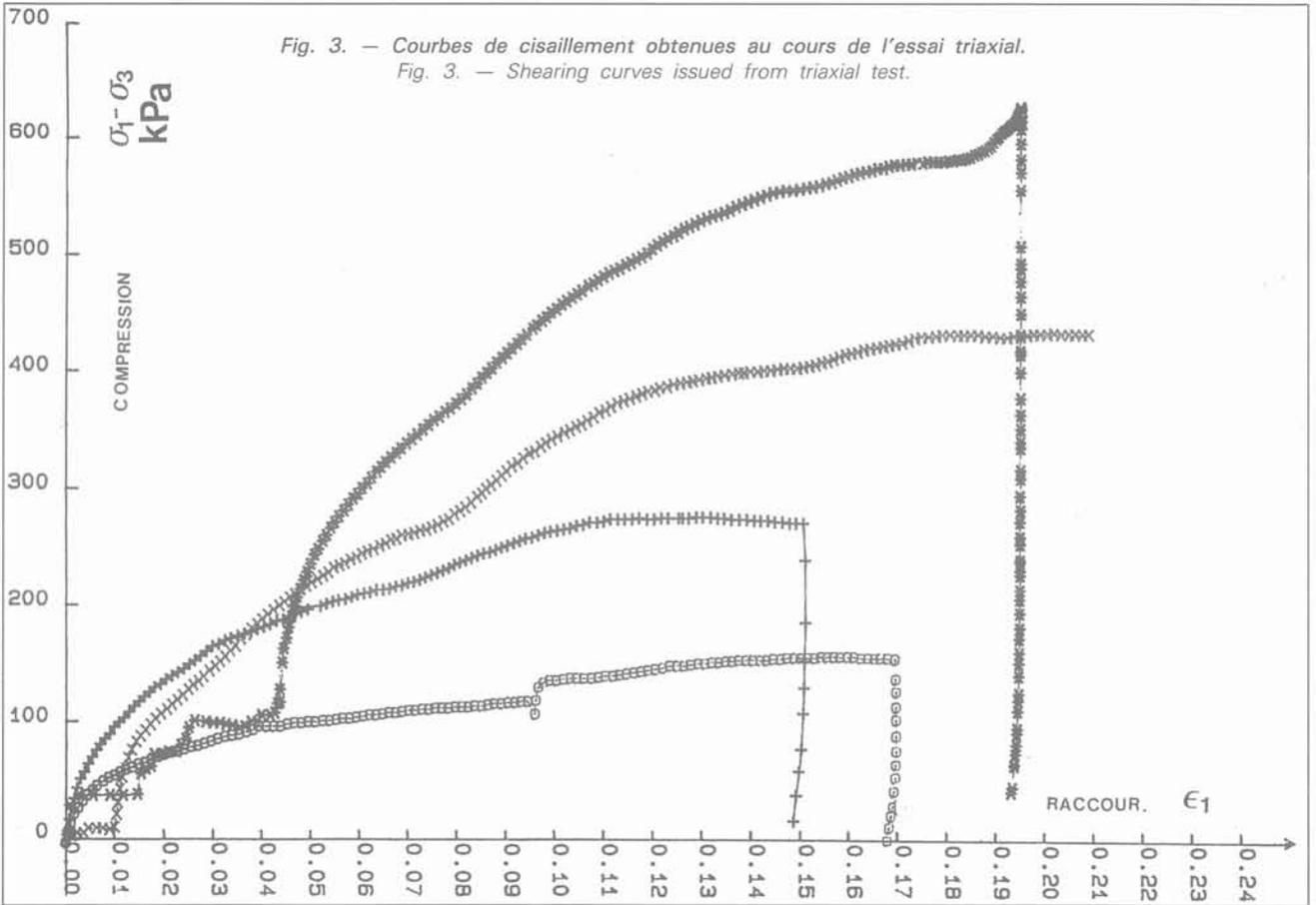


Fig. 2. — Vecteurs déplacement des nœuds.
Fig. 2. — Vector representation of node displacements.



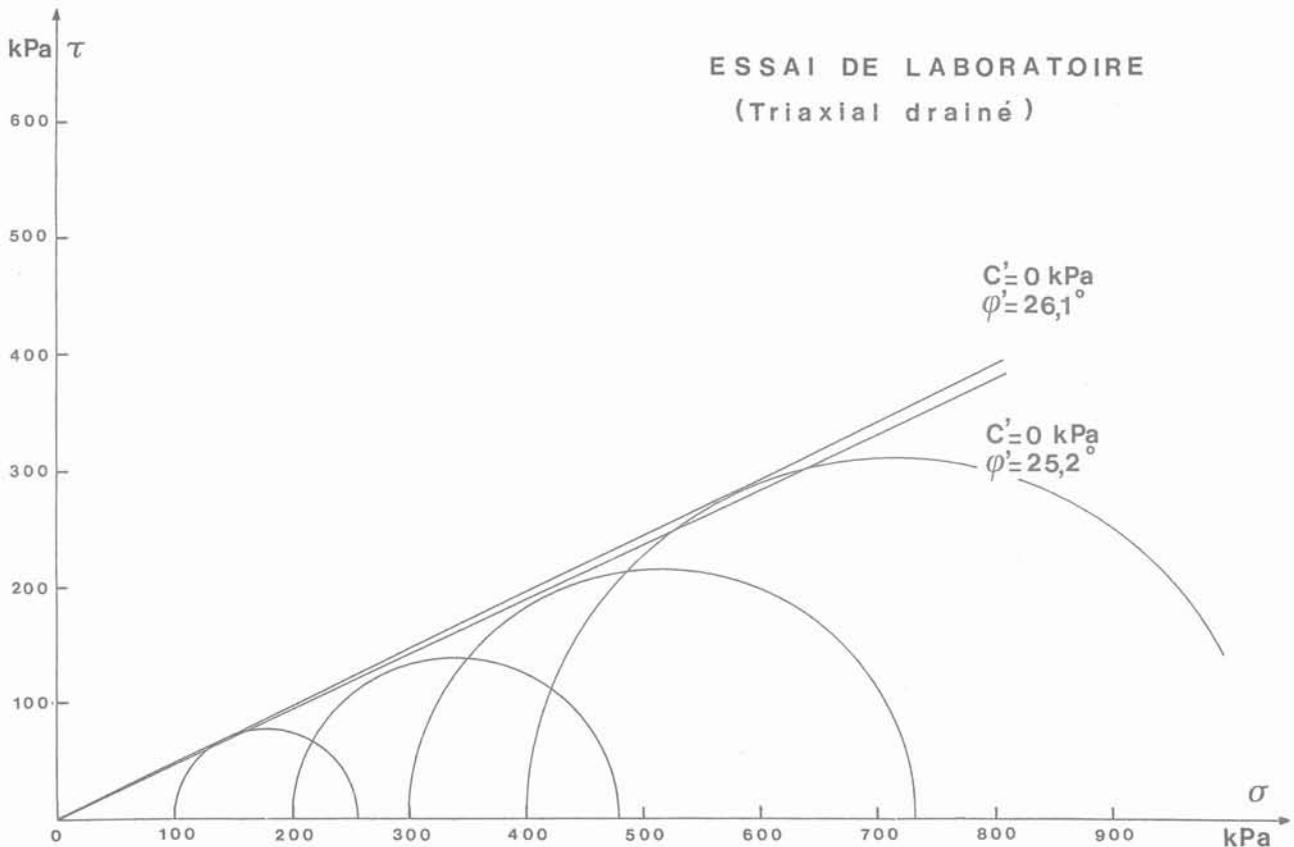


Fig. 5. — Droites de Coulomb déduites de l'essai triaxial.
 Fig. 5. — Determination of the cohesion and internal angle of friction by the triaxial test.

3.2. Essais «In Situ»

Un ensemble d'essais pressiométriques a été fait sur le site, avec une sonde équipée d'une gaine métallique et descendue dans un forage à la tarière. Ces essais ont été effectués tous les mètres de 1 à 10 m. Un cycle de déchargement/rechargement a été inséré dans la procédure expérimentale. Une courbe expérimentale type est indiquée sur la figure 6.

Le programme informatique de dépouillement (MONNET, 1988) tient compte des dimensions géométriques de la sonde et du comportement élasto-plastique du sol. Connaissant le coefficient de Poisson déterminé à l'essai triaxial, il permet de trouver le module d'élasticité du sol en place.

On constate (fig. 7) une augmentation régulière du module d'élasticité en fonction de la profondeur. Ceci s'explique par l'influence de la pression moyenne du poids des terres qui augmente linéairement avec la profondeur. On a une valeur moyenne de 7 133 kPa.

De même la pression limite théorique (pour une expansion infinie de la sonde) et la pression limite conventionnelle (pour une variation de volume égale au volume initial) montrent une variation régulière avec la profondeur (fig. 8).

Enfin la variation de la cohésion pour un angle de frottement interne d'environ 21° montre une tendance

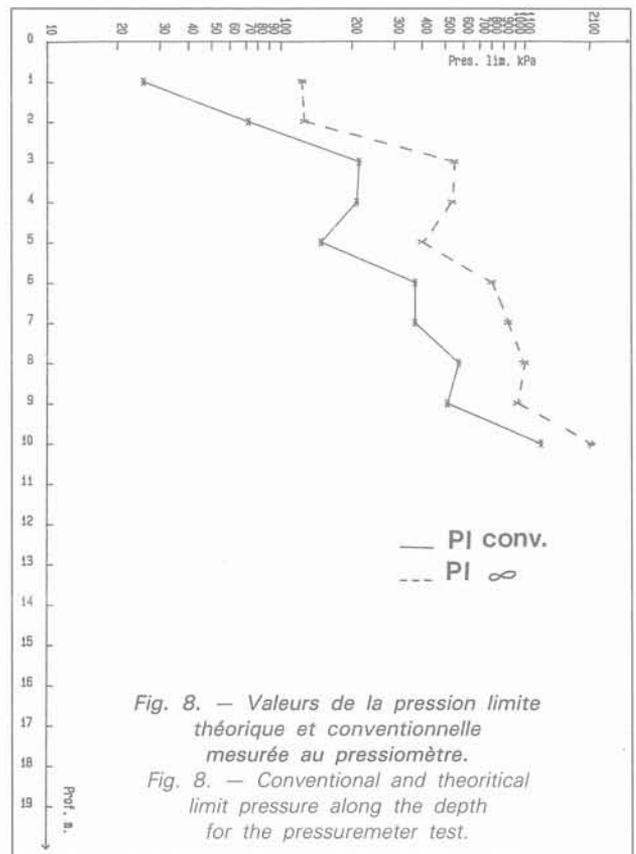
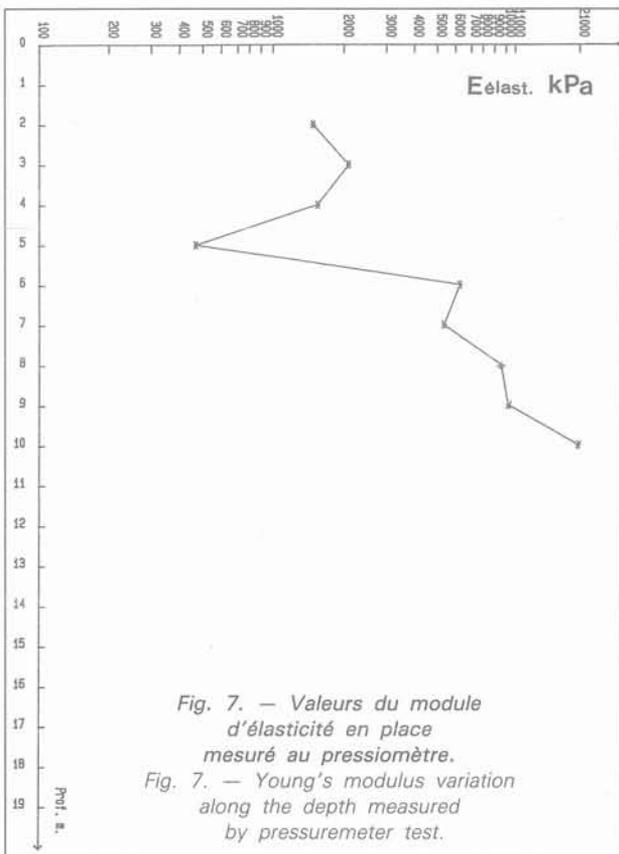
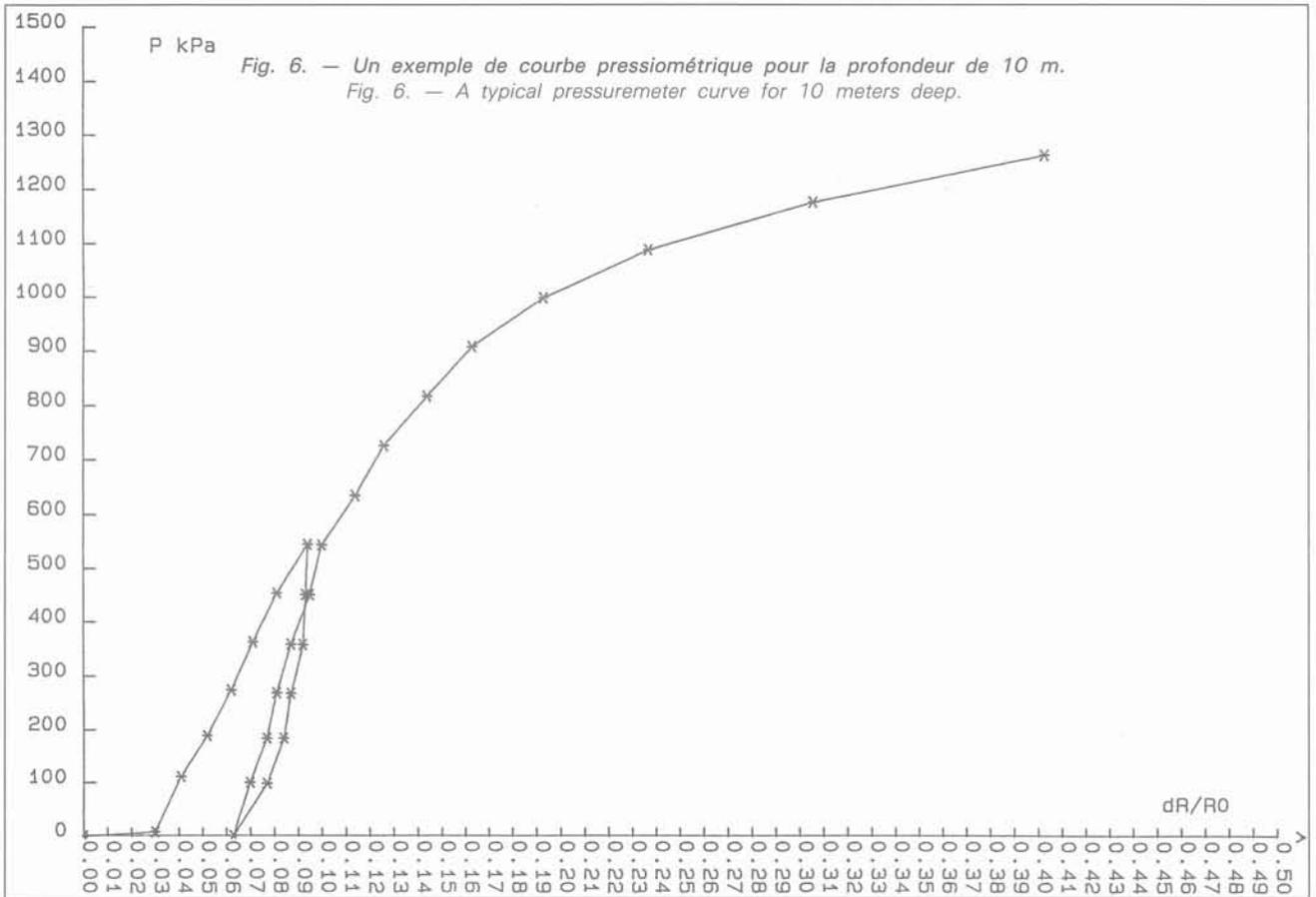
à la diminution vers 10 mètres de profondeur jusqu'à 29 kPa. Dans ce cas la méthode de HUGHES et al. (1977) est plus applicable que celle de BAGUELIN et al. (1972) et donne des résultats plus réalistes pour les cohésions.

On constate un écart d'un facteur 2 entre les modules de Young du sol trouvés à l'essai pressiométrique et ceux trouvés à l'essai triaxial. Cette différence s'explique par le remaniement du sol au cours de l'essai de laboratoire, ce qui change sa structure et diminue son module. L'écart aurait été bien moindre si l'on avait pu travailler sur des carottes non remaniées.

On peut également remarquer des caractéristiques de cisaillement mesurées in situ (au minimum $c = 29$ kPa et $\varphi = 21^\circ$) plus fortes que celles déduites de l'analyse a posteriori. Cet écart peut s'expliquer par le fait que le sol mobilisé par le glissement de terrain a atteint son état résiduel, alors que le sol testé par pressiométrie est encore dans un état relativement structuré.

4. CONCLUSION

La présente recherche a pris place dans un travail plus vaste qui visait à proposer une méthodologie pour la détermination des caractéristiques mécaniques des ver-



sants naturels dont la constitution géologique, à l'échelle des essais de laboratoire ou in situ, a toutes chances d'être hétérogène.

Le choix des argiles litées cherchait à limiter les effets de l'hétérogénéité, la formation dans son ensemble, quoique anisotrope, étant l'une de celle se rapprochant le mieux des «sols» classiques.

Ces argiles étant très raides dans leur gisement normal, nous avons constaté que le remaniement, qui est responsable d'une variation de facteur 2 sur les paramètres élastiques, est à éviter. Il convient de travailler sur des carottes saines.

On remarquera que l'analyse a posteriori donne des valeurs qui paraissent plus conformes à la réalité (valeurs minimales, compatibles avec le fait que le glissement a eu lieu) alors que la pressiométrie donne des valeurs plus élevées (lesquelles correspondraient en fait à la stabilité du versant).

La différence provient peut-être de la différence de localisation, les essais pressiométriques ayant été réalisés en massif sain, en dehors de la zone de glissement dans un secteur où ne s'observent que des désordres réduits.

Par ailleurs il convient également de noter que, malgré l'hypothèse de l'homogénéité de la formation, celle-ci est formée de lamines de nature différente et les caractéristiques mécaniques au niveau du lit ou des séquences de quelques lits, peuvent être assez dispersées.

En tout état de cause une analyse a posteriori bien menée constitue, pour les versants naturels, une méthode prometteuse.

BIBLIOGRAPHIE

- AL HAYARI M. (1988), *Détermination des caractéristiques mécaniques de certaines formations géologiques à l'aide des méthodes d'équilibre limite et des éléments finis*. Thèse, Grenoble — France.
- AL HAYARI M., BLANCHET F. (1988), *Modélisation géomécanique d'un glissement de terrain à l'aide des méthodes d'équilibre limite et des éléments finis*. 6^e rencontres AUGC, Lille — France.
- BAGUELIN F., JEZEQUEL J., LE MEE E., LE MEHAUTE A. (1972), *Expansion des sondes cylindriques dans les sols cohérents*. Bulletin de liaison, Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 61, pp. 189-202.
- BLANCHET F. (1988), *Etude géomécanique de glissements de terrains dans les argiles glacio-lacustres de la vallée du Drac*. Thèse, Grenoble — France.
- CHOWDHURY R.N. (1978), *Slope analysis*. Elsevier, Amsterdam, 424 p.
- HUGUES, WROTH, WINDLE (1977), *Pressuremeter tests in sands*. Géotechnique, n° 4, pp. 455-477.
- MONNET J. (1987), *Détermination des paramètres mécaniques d'élasticité et de cisaillement à l'essai biaxial de révolution*. Rapport interne IRIGM.