

# Utilisation de l'essai pressiométrique pour la détermination des propriétés mécaniques des sables obéissant au critère de Mohr-Coulomb avec une règle d'écoulement non associée

I. SHAHROUR

Laboratoire de mécanique  
de Lille (URA 1441)  
École Centrale de Lille,  
BP 48,  
59651 Villeneuve d'Ascq  
Cedex

A. KASDI, N. ABRIAK

Département Génie Civil  
École des Mines de Douai  
BP 838,  
59508 Douai Cedex

## Résumé

Dans cet article, on étudie l'utilisation de l'essai pressiométrique pour la détermination des propriétés mécaniques des sables dont le comportement peut être décrit par un modèle élastique - parfaitement plastique utilisant le critère de Mohr-Coulomb et une règle d'écoulement non associée. Compte tenu du niveau de déformation atteint au cours de cet essai, l'étude est menée en grandes déformations. Le problème inverse posé par la détermination des paramètres du modèle est résolu à l'aide d'une technique d'optimisation basée sur la méthode de Newton. L'intégration de l'essai pressiométrique est effectuée d'après la solution analytique proposée par Yu et Housby. On montre que le couplage entre les paramètres du modèle de Mohr-Coulomb conduit à une indétermination qui peut être levée à l'aide des informations complémentaires : cycle de déchargement - rechargement pour la détermination du module de cisaillement et essais de laboratoire et (ou) corrélations pour la dilatançe.

## Use of the pressuremeter test for the identification of mechanical properties of a sand governed by the Mohr-Coulomb criterion and a non associated flow rule

## Abstract

In this paper, we present a methodology for the use of the pressuremeter test for the determination of mechanical properties of an elastic - plastic sand using the Mohr-Coulomb yield criterion and a non associated flow rule. Analysis of the pressuremeter test is performed in large deformations. The identification of constitutive parameters is carried out by means of the Newton optimisation procedure used for the resolution of inverse problems. Problem of the cavity expansion is solved using the analytical expression proposed by Yu and Housby. It is shown that the application of the optimisation procedure leads to an indeterminate problem which can be solved by the use of supplementary data: unloading - reloading cycle for the determination of the shear modulus and laboratory tests and (or) correlations for dilatancy.

## Introduction

Compte tenu de la complexité du comportement des sols, des difficultés rencontrées dans la détermination de leurs propriétés mécaniques et des impératifs professionnels (délais, coûts...), les ingénieurs utilisent souvent un modèle élastique – parfaitement plastique basé sur le critère de Mohr-Coulomb et une règle d'écoulement non associée pour l'analyse du comportement des ouvrages en géotechnique. La détermination des paramètres de ce modèle à partir des essais de laboratoire pose des difficultés majeures, notamment la représentativité des sols prélevés du site de construction et le fort remaniement induit par les opérations de forage et d'extraction. Afin de surmonter ces difficultés, il est recommandé d'utiliser les essais *in situ*, et en particulier l'essai pressiométrique pour la détermination des propriétés mécaniques des sols.

De nombreux travaux ont été consacrés à la détermination des propriétés mécaniques des sables à partir de l'essai pressiométrique (Ménard, 1957; Gibson et Andreson, 1961; Ladanyi, 1963; Salençon, 1966; Vesic, 1972; Hughes *et al.*, 1977; Worth, 1984; De Soussa, 1990; Monnet et Khelif, 1994). Dans ces travaux, l'intérêt a porté sur les paramètres de résistance en adoptant des hypothèses simplificatrices pour l'intégration analytique de l'essai pressiométrique, notamment l'hypothèse des petites déformations. Plus récemment, l'équipe de l'École Centrale de Lyon (Cambou *et al.*, 1990) a construit un programme (PRESS'IDENT) pour la détermination des paramètres des modèles des sols à partir de l'essai pressiométrique. Dans ce programme, l'intégration de l'essai pressiométrique est effectuée par la méthode des éléments finis. Ce qui permet d'utiliser l'essai pressiométrique pour la détermination des paramètres des modèles plus sophistiqués sans hypothèses simplificatrices sur le mode de déformation. Ce programme a été appliqué à la détermination des paramètres du modèle de Duncan (Duncan et Chang, 1970) et du modèle CJS (Cambou et Jafari, 1988).

Dans cet article, on propose d'étudier l'utilisation de l'essai pressiométrique pour la détermination des propriétés mécaniques des sables dont le comportement est décrit par un modèle élastique – parfaitement plastique utilisant le critère de Mohr-Coulomb et une règle d'écoulement non associée. Compte tenu du niveau des déformations atteint au cours de cet essai, l'étude est menée en considérant les grandes déformations. Le problème inverse posé par la détermination des paramètres est résolu à l'aide d'une technique d'optimisation basée sur la méthode de Newton. L'intégration de l'essai pressiométrique est effectuée à l'aide de la solution analytique proposée par Yu et Houlsby (1991). Cette solution permet d'accélérer l'algorithme d'identification et d'éviter les problèmes numériques liés à l'intégration des modèles elastoplastiques en grandes déformations. A travers des applications numériques, on montre que la détermination d'un seul paramètre s'opère correctement et avec une bonne précision alors que l'identification de deux ou de plusieurs paramètres conduit à une indétermination qui peut être levée à partir des informations complémentaires obtenues à partir de l'essai pressiométrique et (ou) des essais de laboratoire.

## Présentation de la méthode

### 2.1

### Résolution du problème inverse

La détermination des paramètres d'un modèle de comportement des sols à partir de l'essai pressiométrique consiste en la résolution du problème inverse suivant: trouver un jeu de paramètre ( $J$ ) qui minimise l'écart entre des mesures expérimentales et les résultats obtenus par l'intégration du modèle de comportement (Fig. 1):

$$S = \sum_{i=1}^n (\delta_m(P_i) - \delta_s(P_i, J))^2$$

$\delta_m(P_i)$  et  $\delta_s(P_i, J)$  désignent respectivement la mesure expérimentale et le résultat d'intégration du modèle pour le niveau de pression  $P_i$ .

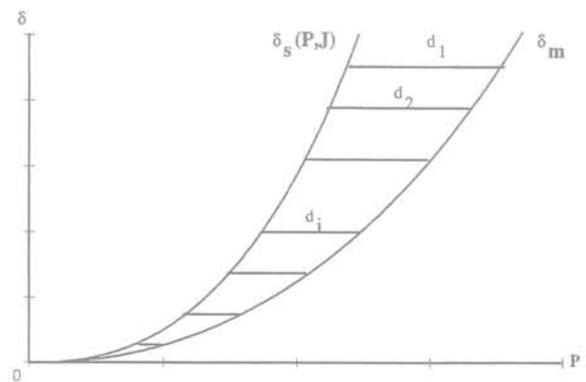


FIG. 1 Mesure de l'écart entre les données expérimentales et de simulation. Distance between experimental data and numerical predictions.

La recherche du minimum requiert l'utilisation d'une technique d'optimisation. Dans ce travail, on a utilisé la méthode de Newton qui est basée sur la procédure itérative suivante:

A partir d'un jeu de paramètre  $J^i$ , on détermine un nouveau jeu de paramètres ( $J^{i+1}$ ) par la résolution du système suivant:

$$J^{i+1} = J^i + \left[ \frac{\partial^2 S}{\partial J^2}(J^i) \right]^{-1} \left[ \frac{\partial S}{\partial J}(J^i) \right]$$

Le calcul du gradient  $\left[ \frac{\partial S}{\partial J} \right]$  et du hessien  $\left[ \frac{\partial^2 S}{\partial J^2} \right]$  est effectué par la méthode des différences finies:

$$\left[ \frac{\partial S}{\partial J} \right] = \frac{S(P, J^i + \Delta J) - S(P, J^i - \Delta J)}{2\Delta J}$$

$$\left[ \frac{\partial^2 S}{\partial J^2} \right] = \frac{S(P, J^i + \Delta J) - 2S(P, J^i) + S(P, J^i - \Delta J)}{\Delta J^2}$$

La mise en œuvre de cette méthode nécessite la résolution du problème d'expansion de cavité cylindrique dans un sol obéissant au critère de Mohr-Coulomb avec une règle d'écoulement non associée. Dans la procédure d'optimisation, nous avons utilisé la solution proposée par Yu et Houlsby (1991). Cette solution est rappelée brièvement ci-après.

## 2.2

### Solution analytique du problème d'expansion de cavité cylindrique

Yu et Houlsby (1991) ont proposé une solution analytique pour le problème d'expansion de cavité cylindrique dans un sol dont le comportement peut être décrit par le modèle de Mohr-Coulomb non associé. La partie élastique de ce modèle comporte deux paramètres : le module d'Young (E) et le coefficient de Poisson (ν) ou le module de cisaillement (G) et le coefficient de compressibilité (K) qui sont définis par :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

La partie plastique comporte trois paramètres : l'angle de frottement (n), la cohésion (C) et l'angle de dilatance (ψ).

L'hypothèse des grandes déformations est prise en compte selon la formulation de Chadwick (1963) :

$$\epsilon_r = \text{Ln} \left( \frac{dr}{dr_0} \right) \quad \epsilon_\theta = \text{Ln} \left( \frac{r}{r_0} \right)$$

$r_0$  et  $r$  désignent respectivement les positions initiale et après déformation d'un point matériel du massif du sol.

En élasticité, l'application d'une pression (P) dans une cavité de rayon initiale  $a_0$  induit à son bord un déplacement (u) donné par :

$$u = \frac{a_0(P - P_0)}{2G}$$

$P_0$  désigne la pression initiale dans la cavité.

La plasticité apparaît dans le sol quand la pression dans la cavité atteint la valeur  $P_e$  :

$$P_e = \frac{Y + (\alpha - 1)P_0}{1 + \alpha} + P_0$$

$$\alpha = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad Y = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

Dans ce cas, le déplacement au bord de la cavité est donné par l'expression suivante :

$$\frac{u}{a_0} = \left( \frac{R^{-\gamma}}{(1-\delta)^{\frac{\beta+1}{\beta}} - (\gamma/\eta)\Lambda_1(R,\xi)} \right)^{\frac{\beta}{1+\beta}} - 1$$

$$\Lambda_1(R,\xi) = \sum_{n \geq 0} A_n(R,\xi)$$

$$A_n(R,\xi) = \begin{cases} \frac{\xi^n}{n!} \text{Ln}(R) & \text{si } n = \gamma \\ \frac{\xi^n}{n!(n-\gamma)} [R^{n-\gamma} - 1] & \text{si } n \neq \gamma \end{cases}$$

Les coefficients intervenant dans ces expressions sont donnés par :

$$\xi = \frac{2\delta(1-\nu^2)}{(1+\nu)(\alpha-1)\beta} \left[ 1 + \alpha\beta - \frac{\nu(\alpha+\beta)}{1-\nu} \right]$$

$$\eta = \text{Exp} \left\{ \frac{(\beta+1)(1-2\nu)(1+\nu)[Y + (\alpha-1)P_0]}{E\beta(\alpha-1)} \right\}$$

$$R = \frac{(1+\alpha)[Y + (\alpha-1)P]}{2\alpha[Y + (\alpha-1)P_0]}$$

$$\gamma = \frac{\alpha(1+\beta)}{(\alpha-1)\beta} \quad \delta = \frac{Y + (\alpha-1)P_0}{2(1+\alpha)G} \quad \beta = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$$

## 3

### Étude de la méthode proposée

#### 3.1

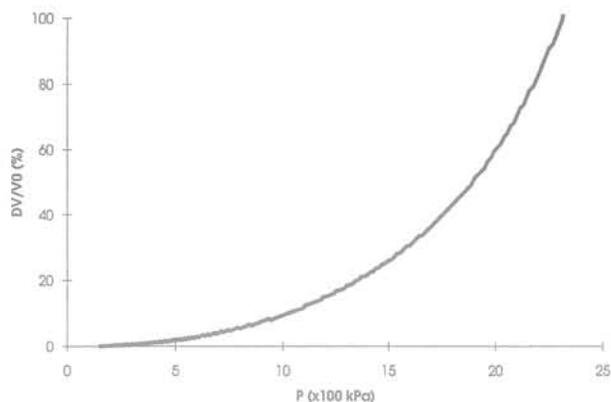
#### Démarche

Dans cette partie, on étudie la possibilité de déterminer les propriétés des sables à l'aide de la méthode présentée ci-dessus. Pour effectuer cette étude, un jeu de données pressiométriques a été construit à partir de la solution analytique de Yu et Houlsby (1991) avec le jeu de paramètres donné dans le tableau I. Les résultats obtenus avec  $P_0=0,15$  MPa et  $K_0=0,5$  sont donnés

TABLEAU I Jeu de paramètres utilisé pour la construction des données pressiométriques.

G (MPa)	K (MPa)	ψ (°)	φ (°)	C (kPa)
30	78,5 MPa	16	40	0

dans la figure 2. En considérant ces données comme des données « expérimentales », on va tester la possibilité de retrouver le jeu de paramètres de référence à l'aide de la méthodologie exposée ci-dessus. Cette démarche permet de s'affranchir de l'utilisation



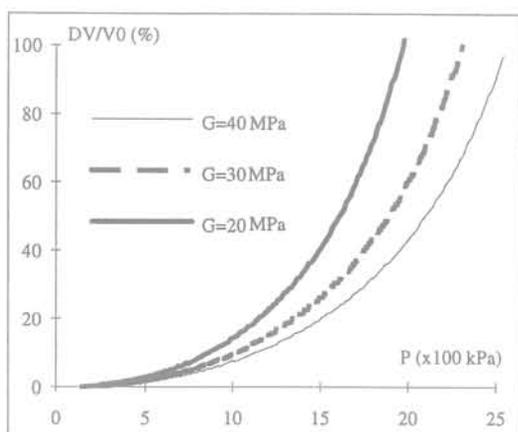
**FIG. 2** Courbe pressiométrique de référence utilisée pour la détermination des paramètres.  
Pressuremeter curve used for the determination of constitutive parameters.

d'essais réels qui pose des difficultés liées au remaniement du sol et à la capacité du modèle de Mohr-Coulomb à décrire correctement le comportement des sols.

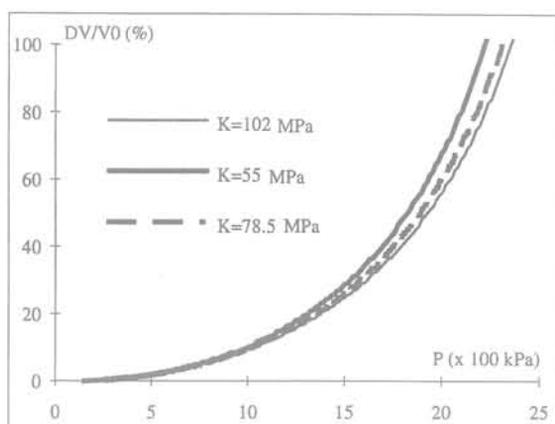
### 3.2

## Étude de sensibilité

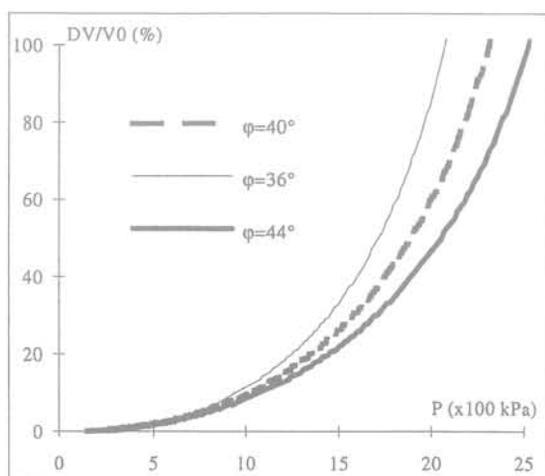
L'étude de sensibilité du modèle par rapport à ses paramètres permet de déterminer les paramètres à privilégier dans le processus d'optimisation et le domaine d'influence de chacun de ses paramètres. Les figures 3a à 3d illustrent la sensibilité de la simulation de l'essai pressiométrique par rapport aux paramètres du modèle de Mohr-Coulomb. On constate que la perturbation du module de cisaillement affecte sensiblement l'ensemble de la courbe pressiométrique, mais que celle-ci est peu sensible à la perturbation du coefficient de compressibilité. En ce qui concerne les angles de frottement et de dilatance, on note une forte sensibilité des simulations



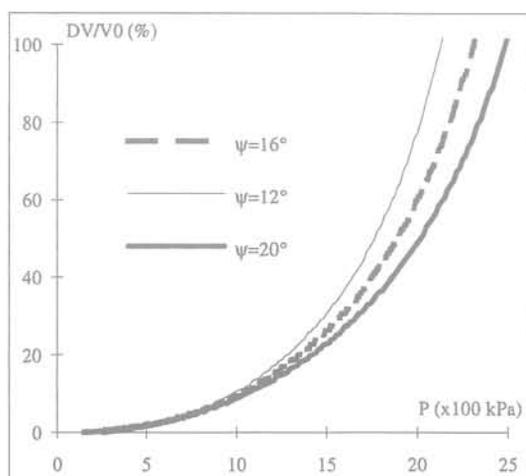
a)



b)



c)



d)

**FIG. 3** Sensibilité des simulations par rapport aux paramètres.  
Sensibility of numerical simulations to constitutive parameters.  
a) module de cisaillement, Shearing modulus,  
b) module de compressibilité, Bulk modulus,  
c) angle de frottement interne, Friction angle,  
d) angle de dilatance, Dilatancy angle.

par rapport à ces deux paramètres pour les hauts niveaux de déformations ( $\Delta V/V_0 > 10\%$ ).

### 3.3

## Détermination des paramètres

Dans un premier temps, nous avons appliqué l'algorithme d'optimisation pour la détermination d'un seul paramètre. Les simulations effectuées ont montré que la méthode proposée s'applique bien quel que soit le paramètre. A titre d'exemple, on donne dans la figure 4 les résultats de la détermination de l'angle de frottement et du module de cisaillement. En partant d'un angle de frottement  $n_1 = 30^\circ$ , le programme d'optimisation nous donne un angle de frottement  $n = 40^\circ$  qui est égal à la valeur recherchée (tableau I). L'application de cette démarche au module de cisaillement avec une valeur initiale  $G_1 = 18$  MPa, donne un module  $G = 30,5$  MPa qui est très proche de la valeur recherchée ( $G = 30$  MPa). Afin d'illustrer la conséquence de l'interprétation de l'essai pressiométrique en petites déformations, l'angle de frottement a été déterminé en négligeant les grandes déformations. En partant d'une valeur initiale  $n_1 = 30^\circ$ , le programme d'optimisation a donné un angle de frottement  $n = 33^\circ$  (Fig. 5). Cet angle

est nettement inférieur à celui déterminé en grandes déformations qui est de l'ordre de  $40^\circ$ . Ceci montre que l'hypothèse des petites déformations induit une sous-estimation sensible de l'angle de frottement interne.

Cette méthodologie a été ensuite appliquée à la détermination simultanée des deux paramètres. Dans ce cas, des difficultés ont surgi. Avec un bon accord entre les résultats de simulation et les données expérimentales, les jeux de paramètres déterminés dépendaient sensiblement des valeurs initiales. A titre d'exemples, on donne dans la figure 6a les résultats obtenus pour la détermination du module de cisaillement et de l'angle de frottement interne. En partant des valeurs initiales  $G_1 = 37,5$  MPa et  $n_1 = 44^\circ$ , on a obtenu  $G = 35,7$  MPa et  $n = 37^\circ$  et en partant des valeurs initiales  $G_1 = 22,5$  MPa et  $n_1 = 45^\circ$ , on a obtenu  $G = 23,7$  MPa et  $n = 46^\circ$ . Ces valeurs sont très éloignées des valeurs recherchées ( $G = 30$  MPa et  $n = 40^\circ$ ). La figure 6b illustre les résultats obtenus pour la détermination des angles de frottement et de dilatance. En partant des valeurs  $n_1 = 35^\circ$ ,  $\psi_1 = 12^\circ$ , on a obtenu  $n = 40,2^\circ$  et  $\psi = 15,9^\circ$  et en partant des valeurs initiales  $n_1 = 38^\circ$ ,  $\psi_1 = 12^\circ$ , on a obtenu  $n = 44,4^\circ$  et  $\psi = 11,4^\circ$ . Ces résultats montrent que la méthode d'optimisation opère correctement pour déterminer un seul paramètre, mais elle présente des insuffisances quand il s'agit de déterminer deux ou plu-

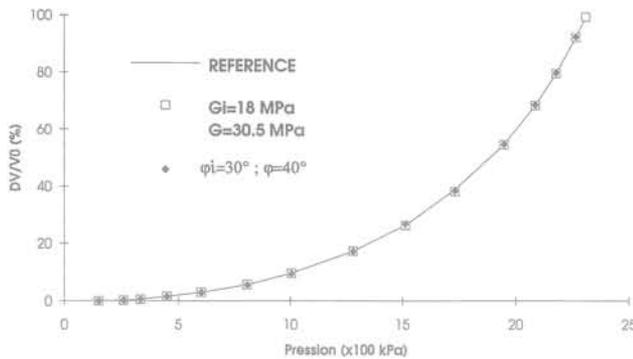


FIG. 4 Détermination d'un seul paramètre (G ou n).  
Determination of one constitutive parameter (G or n).

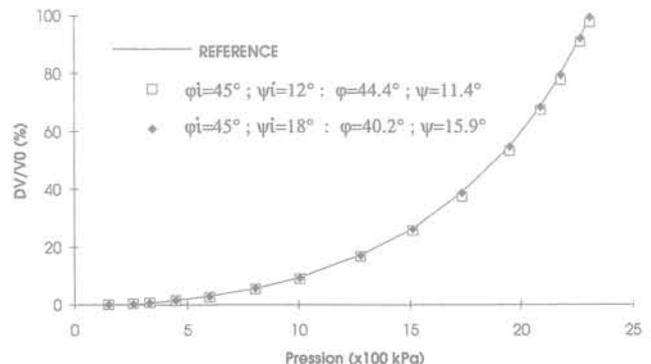
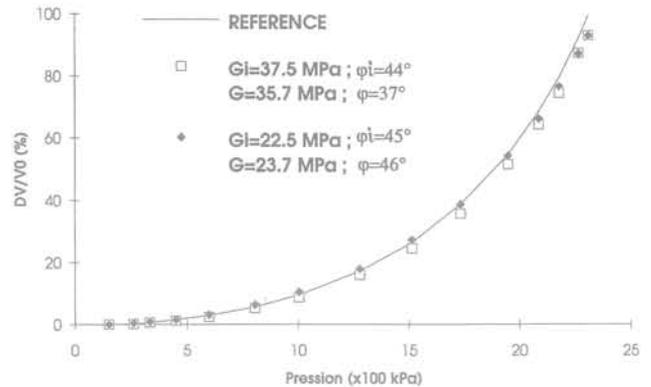


FIG. 6 Détermination simultanée de deux paramètres.  
a) Module de cisaillement et angle de frottement.  
b) Angles de frottement et de dilatance.  
Determination of two parameters.  
a) Shearing modulus and friction angle.  
b) Friction and dilatancy angles.

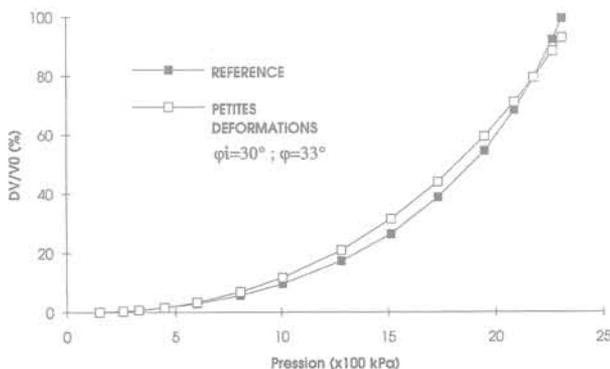


FIG. 5 Influence des grandes déformations sur la détermination de l'angle de frottement interne.  
Influence of large strains on the determination of the friction angle.

seurs paramètres. Ceci est dû à l'existence d'un fort couplage entre le module de cisaillement, l'angle de frottement interne et l'angle de dilataance (Shahrour *et al.*, 1993). Pour surmonter cette difficulté, il est nécessaire d'utiliser des informations supplémentaires à partir de l'essai pressiométrique, des essais de laboratoire et (ou) des corrélations entre les propriétés mécaniques des sables. Nous allons, ci-après, présenter des propositions allant dans ce sens.

4

## Recours aux données supplémentaires

4.1

### Module de cisaillement

Les résultats de simulation de l'essai pressiométrique montre que la plastification se produit rapidement, il est donc très difficile de bien distinguer la phase élastique pour la détermination du module de cisaillement à partir de la pente initiale. A cette difficulté, s'ajoute le remaniement induit par le forage et la mise en place de la sonde qui peut perturber sensiblement la partie initiale de la courbe de chargement pressiométrique. Afin de surmonter cette difficulté, ce module peut être déterminé à partir d'un cycle de déchargement – rechargement réalisé à un niveau de pression où le domaine d'élasticité est bien marqué. Pour éviter la plastification du sol lors du déchargement, Worth (1982) propose de limiter l'amplitude du cycle à la valeur maximale :

$$Ap = \frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi} P_{inv}$$

$P_{inv}$  désigne la valeur de pression dans la cavité à l'inversion du chargement. A titre d'illustration, on montre dans la figure 7 une simulation de l'essai pressiométrique avec un cycle de déchargement – rechargement. Sur ce cycle, le domaine d'élasticité est bien

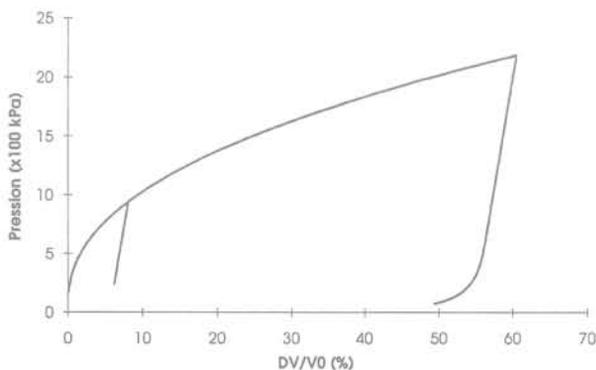


FIG. 7 **Domaine d'élasticité sur un cycle de déchargement-rechargement.**  
Elastic domain on a pressuremeter curve with an loading-reloading cycle.

marqué ce qui permet de déterminer le module de cisaillement par l'expression :

$$G = \frac{\Delta P}{\Delta V/V}$$

4.2

### Angle de dilataance

Pour un sol donné, l'angle de dilataance dépend du niveau de la pression moyenne et de la densité. A partir d'une analyse des essais de laboratoire réalisés sur de nombreux sables, Bolton (1986) a montré que les angles de frottement ( $\phi$ ) et de la dilataance ( $\psi$ ) sont liés par la relation :

$$\psi = 1,25 (\phi - \phi_{crit})$$

Le paramètre  $\phi_{crit}$  désigne l'angle de frottement critique. Il correspond à l'angle mesuré lors d'un essai drainé sur un échantillon dont le taux de dilataance dans la phase plastique est nul. Il peut être déterminé à partir des essais drainés réalisés à différentes densités. En reportant les résultats dans le plan (taux de dilataance, angle de frottement), l'angle critique est égal à l'angle de frottement obtenu pour une dilataance nulle. L'intérêt de cette expression réside dans le fait que l'angle de frottement critique est généralement peu sensible au remaniement. Il peut donc être déterminé en laboratoire. Cet angle dépend principalement de la composition minéralogique. Sa valeur augmente avec la présence du feldspath et diminue avec le quartz. Pour un sable quartzueux, l'angle critique est de l'ordre de 33° et il atteint 40° pour un sable feldspathique (Bolton, 1986).

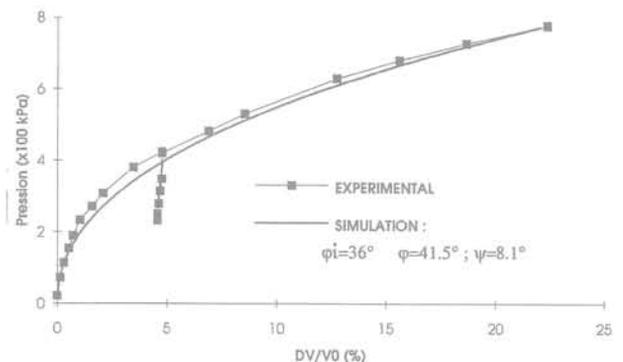


FIG. 8 **Détermination des paramètres sur l'essai pressiométrique donné par Hughes *et al.* (1977).**  
Determination of constitutive parameters from a pressuremeter test given by Hughes *et al.* (1977).

4.3

### Application

La méthodologie exposée ci-dessus a été utilisée pour déterminer les paramètres du sable de Wash à partir d'un essai pressiométrique comportant un cycle de déchargement – rechargement réalisé à 7 m de profondeur. Cet essai a servi à la validation de la méthode proposée par Hughes *et al.* (1977). L'angle de frotte-

ment critique pour ce sable a été estimé par les auteurs à  $35^\circ$ . La pression initiale des terres au repos était évaluée à 14 kPa.

Le cycle de déchargement – rechargement a permis de déterminer le module de cisaillement, la valeur trouvée était de 35 MPa. Avec un coefficient de Poisson de  $\nu = 1/3$ , le module de compressibilité était pris égal à 93 MPa. En utilisant la relation proposée par Bolton pour la dilatance, l'optimisation a porté sur l'angle de frottement. En partant d'une valeur initiale  $\varphi_1 = 30^\circ$ , nous avons obtenu  $\varphi = 40,5^\circ$ . L'utilisation des corrélations de Bolton a donné un angle de dilatance  $\psi = 8,1^\circ$ . Ces valeurs sont proches de celles trouvées par Hughes *et al.* ( $\varphi = 41^\circ$  et  $\psi = 9^\circ$ ).

5

## Conclusion

Dans cet article, nous avons étudié la possibilité de déterminer les propriétés mécaniques d'un sable dont

le comportement peut être décrit par un modèle élastique – parfaitement plastique utilisant le critère de Mohr-Coulomb et une règle d'écoulement non associée. Le problème inverse posé par cette détermination a été résolu à l'aide d'une technique d'optimisation utilisant la méthode de Newton. La solution analytique proposée par Yu et Houlsby pour le problème d'expansion de cavité cylindrique en grandes déformations a été utilisée dans la procédure d'identification. Notre étude a montré que la méthode d'optimisation opère correctement pour déterminer un seul paramètre, mais elle présente des insuffisances quand il s'agit de déterminer deux ou plusieurs paramètres. Ceci est dû à l'existence d'un fort couplage entre le module de cisaillement, l'angle de frottement interne et l'angle de dilatance. On peut surmonter cette difficulté par l'utilisation des informations supplémentaires : essai pressiométrique avec un cycle de déchargement – rechargement pour déterminer le module de cisaillement et essais de laboratoire pour la mesure de l'angle de frottement critique intervenant dans les corrélations de Bolton entre les angles de frottement et de dilatance.

## Bibliographie

- Bolton M.D. – The strength and dilatancy of sands, *Geotechnique* 36, n° 1, p. 65-78, 1986.
- Cambou B., Jafari K. – Modèle de comportement des sols non cohérents, *Revue Française de Géotechnique*, n° 44, p. 43-45, 1988.
- Cambou B., Boubangua A., Bozetto P., Haghgou M. – Détermination of constitutive parameters from pressuremeter tests, Third Inter. Symp. on Pressuremeter, Oxford, Thomas Telford, p. 234-252, 1990.
- De Sousa Coutinho A.G.F. – Radial expansion of cylindrical cavities in sandy soil: Application to pressuremeter tests, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, p. 737-748, 1990.
- Duncan J.M. and Chang C.V. – Non linear analysis of stress strain in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Eng. Div.*, Vol. 96, n° SM5, P. 1629-1653, 1970.
- Gibson R.E., Anderson W.F. – *In situ* measurement of soil properties with the pressuremeter, *Civ. Enging Publ. Wks Rev.*, 56, n° 658, p. 615-618, 1961.
- Hughes J.M.O., Wroth C.P., Windle D. – Pressuremeter test in sands, *Geotechnique*, 27, n° 4, p. 455-477, 1977.
- Ladanyi B. Evaluation of pressuremeter test in granular soils, Proc. 2nd Pan-Am. Conf. Soil Mech., p. 3-20, 1963.
- Ménard L. – *Mesure in situ* des propriétés physiques des sols, *Annales des Ponts et Chaussées*, p. 357-376, 1957.
- Monnet J., Khelif J. – Étude théorique de l'équilibre élasto-plastique d'un sol pulvérulent autour d'un pressiomètre, *Revue Française de Géotechnique*, n° 67, p. 3-12, 1994.
- Salençon J. – Expansion quasi statique d'une cavité sphérique ou cylindrique dans un milieu élastoplastique, *Annales des Ponts et Chaussées*, Vol. 3, p. 175-187, 1966.
- Shahrouh I., Kasdi A., Abriak N.-E. – Étude numérique de l'essai pressiométrique et détermination des paramètres de Mohr-Coulomb, 6<sup>e</sup> Colloque franco-polonais. Douai, p. 74-80, 1993.
- Vesic A.S. – Expansion of cavities in infinite soil mass, *J. Soil. Mech. Fdn Eng. Div. ASCE*, Vol. 98, n° 3, p. 265-290, 1972.
- Worth C.P. – The interpretation of *in situ* tests, *Géotechnique*, 34, n° 4, p. 449-489, 1984.
- Worth C.P. – British experience with the self boring pressuremeter, Proc. Symp. Pressuremeter and its Marine Applications, Paris, p. 143-164, 1982.
- Yu H.S., Houlsby G.T. Finite cavity expansion in dilatant soils: loading analysis, *Geotechnique*, 41, n° 2, p. 173-183, 1991.