

# Déformations d'un sol pulvérulent lors de l'essai pressiométrique

**A. FAWAZ**

*Antérieurement :*  
Institut national  
polytechnique de Grenoble,  
Laboratoire Sols,  
Solides, Structures,  
Grenoble ;  
*actuellement :*  
Université libanaise,  
Institut universitaire  
de technologie, Saida, Liban

**G. BIGUENET**

*Institut national  
polytechnique de Grenoble,  
Laboratoire Sols, Solides,  
Structures, Grenoble*

**M. BOULON**

*Université Joseph-Fourier,  
Laboratoire Sols,  
Solides, Structures,  
Domaine universitaire,  
BP 53,  
38041 Grenoble Cedex 9*

## Résumé

Cet article présente une étude de l'expansion de cavité lors de l'essai pressiométrique. Le sable fin d'Hostun a été choisi comme matériau pour réaliser cette étude de laboratoire sur le pressiomètre. Un dispositif expérimental a été élaboré pour réaliser les essais pressiométriques dans une cuve de sable, ce qui a permis de mesurer les déformations circonférentielles et verticales dans le sol avoisinant. Une simulation numérique de ces essais a été effectuée avec le logiciel PLAXIS. Les résultats numériques ont été comparés à ceux de l'expérience. L'influence des paramètres mécaniques du sable sur les résultats du calcul a été étudiée.

## Deformations of a sandy soil during the pressuremeter test

## Abstract

In this paper, we present a study of pressuremeter test and the main results that can be deduced from this test. Hostun's fine sand has been chosen as a material to perform the experimental study of the pressuremeter. An experimental device has been elaborated to carry out the pressuremeter tests in a tank of sand, which allowed for the measurement of circumferential and vertical strains within the soil. A numerical simulation of the pressuremeter tests has been made with the PLAXIS software. The numerical results have been compared with experimental ones. The influence of the mechanical parameters on the calculated results has been studied.

NDLE : L'article proposé peut  
faire l'objet d'une discussion  
dans un délai de trois mois  
après sa parution.

## Introduction

Deux facteurs importants peuvent influencer l'essai pressiométrique. Ces facteurs, non pris en compte par la théorie classique élastoplastique, sont la variation de volume du sol durant l'essai, et l'élançement de la sonde.

La majorité des études théoriques considère l'hypothèse de déformation plane en supposant que la sonde a un élançement infini et que la déformation verticale est nulle, tandis que les études expérimentales et numériques montrent l'influence de l'élançement de la sonde pressiométrique sur la mesure de certains paramètres déduits de l'essai et cette influence n'est pas toujours négligeable (Baguelin *et al.* 1982 ; Borsetto *et al.* 1983 ; Faugeras *et al.* 1983 ; Gambin, 1990 ; Laier, 1973 ; Las-soudière et Zanier, 1986 ; Suyama *et al.* 1983 ; Yeung et Carter, 1990 ; Yu et Hously, 1991).

Donc, la nature de l'expansion de la cavité et les déformations dans le sol résultant du gonflement d'une sonde pressiométrique d'élançement fini sont des questions importantes dont l'influence n'est pas toujours claire. Nous avons tenté d'approfondir ce sujet grâce à une étude expérimentale permettant de mesurer les déplacements radiaux et verticaux dans le sol à une certaine distance de la sonde pressiométrique choisie par l'expérimentateur. Ce travail a été fait au laboratoire et le matériau choisi pour les essais pressiométriques est le sable fin d'Hostun. Une modélisation numérique en éléments finis non linéaires vient compléter cette approche expérimentale.

## Essais pressiométriques

### Le matériau utilisé

Le comportement du sol à tester a une grande influence sur les résultats de l'essai. Il s'agit d'un sable quartzéux provenant de la carrière d'Hostun (Drôme, France). C'est un sable fin à grains anguleux et de distribution granulométrique uniforme.

Les caractéristiques granulométriques de ce matériau sont les suivantes :

$$d_{50} = 0,32 \text{ mm}$$

$$d_{10} = 0,21 \text{ mm} \quad d_{60}/d_{10} = 2$$

Les poids volumiques secs maximal et minimal sont :

$$\gamma_{dmax} = 16,70 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{dmin} = 13,24 \text{ kN/m}^3$$

Ces valeurs correspondent, en supposant un poids spécifique des grains de  $25,97 \text{ kN/m}^3$  ( $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$ ), aux indices des vides suivants :  $e_{max} = 0,961$

$$e_{min} = 0,555$$

Ces caractéristiques granulométriques sont tirées de l'étude de Mokrani (1991).

Ce sable (sable fin d'Hostun) est largement employé au laboratoire 3S comme matériau modèle dans le domaine géotechnique, ce qui permet d'avoir une idée précise sur ses propriétés mécaniques, grâce aux études déjà faites sur son comportement. Il convient de rappeler parmi ces études, celles de Colliat (1986), Mokrani (1991), et Hadj Sadok (1990).

Quelques essais triaxiaux complémentaires ont été réalisés sur ce sable dense, dont les résultats ont été comparés à ceux des études déjà citées.

Dans les essais pressiométriques, la surcharge verticale à la surface du sable ne dépassait pas 40 kPa ; et la hauteur totale du sable était de l'ordre de 70 cm.

La contrainte verticale au niveau de la sonde dépend du degré de transmission de la surcharge verticale en cuve d'essai. Elle n'a jamais dépassé 45,6 kPa. Il était alors indispensable de connaître le comportement du sable dans cette gamme de pressions ; c'est pourquoi une série d'essais triaxiaux à très faibles pressions de confinement, avec mesure de variations de volume ( $\sigma_3 \leq 50 \text{ kPa}$ , Figs. 1 et 2), a été réalisée.

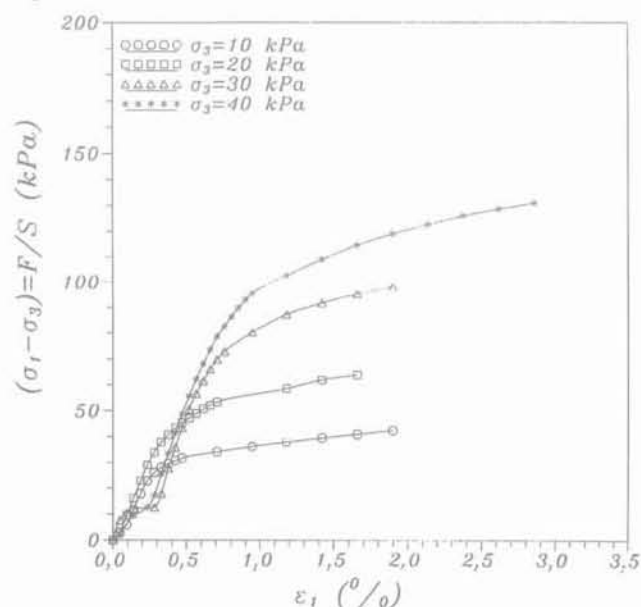


FIG.1 Variation de  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  en fonction de  $\epsilon_1$  pour de très faibles pressions de confinement. Variation of  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  versus  $\epsilon_1$  for low confining pressures.

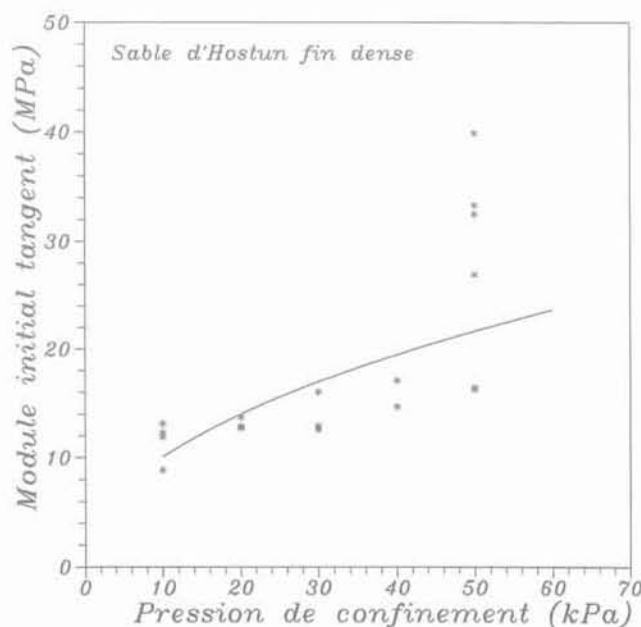


FIG.2 Évolution du module initial tangent avec la (faible) contrainte de confinement. Variation of the initial tangent modulus for low confining pressures.

## Dispositif expérimental

La cuve utilisée pour les essais pressiométriques, est une cuve en acier de forme cylindrique ayant 57,5 cm de diamètre et 89,5 cm de hauteur.

Pour simuler des essais réalisés à profondeur représentative, on a choisi un dispositif permettant l'application d'une surcharge uniforme à la surface du massif. Cela consiste à disposer entre la surface du sable et un plateau fixe, un tube de caoutchouc enroulé couvrant toute la surface et pouvant être gonflé à l'air comprimé sous pression réglable (Fig. 3).

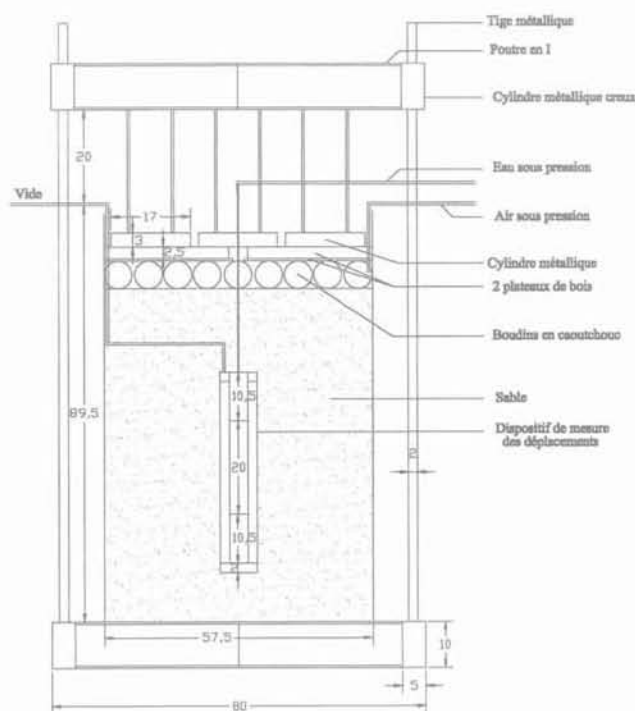


FIG.3 Vue générale de l'expérimentation et du dispositif expérimental de mesure des déplacements (dimensions en cm).  
General view of the experimental device (dimensions in cm).

La sonde pressiométrique utilisée est monocellulaire, de 20 cm de longueur et de 4 cm de diamètre. Son élancement égal à 5 peut être classé comme courant, de l'ordre de celui des sondes généralement utilisées dans la pratique.

La longueur de la partie dilatable de la sonde est de 20 cm, deux tubes rigides en plastique d'une longueur de 10,5 cm chacun sont de part et d'autre de cette partie, l'ensemble forme un cylindre de 41 cm de hauteur et de 4 cm de diamètre. Le dispositif expérimental utilisé permettant de mesurer les déplacements radiaux et verticaux du sol lors de l'essai pressiométrique, consiste en une membrane en caoutchouc de très faible rigidité placée au voisinage de la sonde, à une distance choisie par l'expérimentateur (Fig. 3). Le fonctionnement de ce dispositif sera décrit ci-dessous.

La sonde pressiométrique repose sur une couronne cylindrique en bois de 2 cm d'épaisseur, telle que l'axe de la sonde passe par le centre de la couronne à

laquelle est accrochée la membrane en caoutchouc destinée aux mesures de déplacements; ceci nous permet de remplir la partie entre la sonde et la membrane en caoutchouc par le même matériau que le sol à expérimenter.

Une autre couronne en bois, identique à la première est placée à la tête de l'ensemble, et est traversée par un tube permettant d'aspirer l'air qui se trouve entre les particules de sol à l'intérieur de ce dispositif. La membrane en caoutchouc, qui était protégée initialement par un cylindre creux en plastique rigide, désormais sous un certain vide, conserve alors sa forme sans plus avoir besoin de la protection du cylindre en plastique.

On a tracé sur la membrane en caoutchouc un quadrillage de dimensions convenablement choisies et on a mis ce dispositif dans la cuve à sable déjà remplie jusqu'au niveau voulu, puis on a complété le remplissage de la cuve. On arrête l'aspiration de l'air (suppression du vide), l'air circule alors librement parmi les particules du matériau entre la membrane en caoutchouc et la sonde; ce matériau se comporte alors comme celui de tout le massif à expérimenter.

À la fin de l'essai pressiométrique, on ferme le robinet qui amène l'eau à la sonde et on applique le vide de nouveau pour aspirer l'air entre la sonde et la membrane en caoutchouc; cette dernière conserve alors sa forme car elle est empêchée de se déformer par l'action de la pression atmosphérique d'un côté, et la sonde pleine d'eau pratiquement incompressible de l'autre côté.

Pour récupérer le dispositif expérimental de mesure des déplacements, on vidange la cuve à sable manuellement et avec soin. On mesure les nouvelles distances entre les lignes horizontales et verticales du quadrillage déjà tracé sur la membrane en caoutchouc, on peut ainsi mesurer les déplacements radiaux et verticaux du sol à une distance de l'axe de la sonde égale à la distance qui le sépare de la membrane en caoutchouc, en supposant que cette dernière s'est déformée de la même manière que le sol.

On peut aussi calculer les déformations circonférentielles  $\epsilon_\theta$  et verticales  $\epsilon_z$  moyennes et tracer leurs variations respectives en fonction de la profondeur  $z$ , de même que les déplacements radiaux et verticaux.

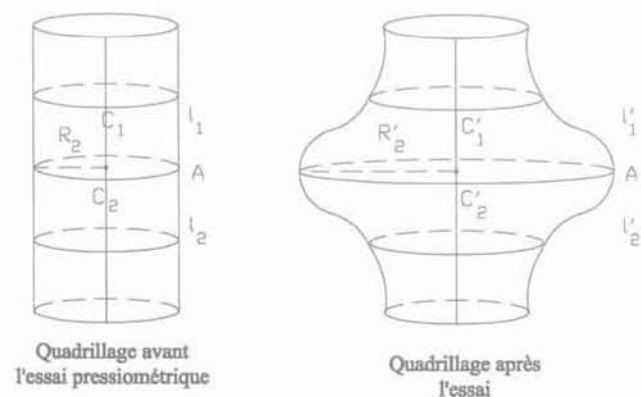


FIG.4 Quadrillage avant et après l'essai pressiométrique.  
Squaring before and after the pressuremeter test.

$$\varepsilon_z \text{ moyen au point A} = \left( \frac{l'_1 - l_1}{l_1} + \frac{l'_2 - l_2}{l_2} \right) / 2$$

$$\varepsilon_\theta \text{ au point A} = \frac{R'_2 - R_2}{R_2} = \frac{C'_2 - C_2}{C_2}$$

Ce calcul de déformations est valable pour les petites déformations ; pour tenir compte des grandes déformations il faut prendre les déformations logarithmiques.

$$\varepsilon_z = \ln \left( 1 + \frac{\Delta l}{l} \right) \quad \varepsilon_\theta = \ln \left( 1 + \frac{\Delta R}{R} \right)$$

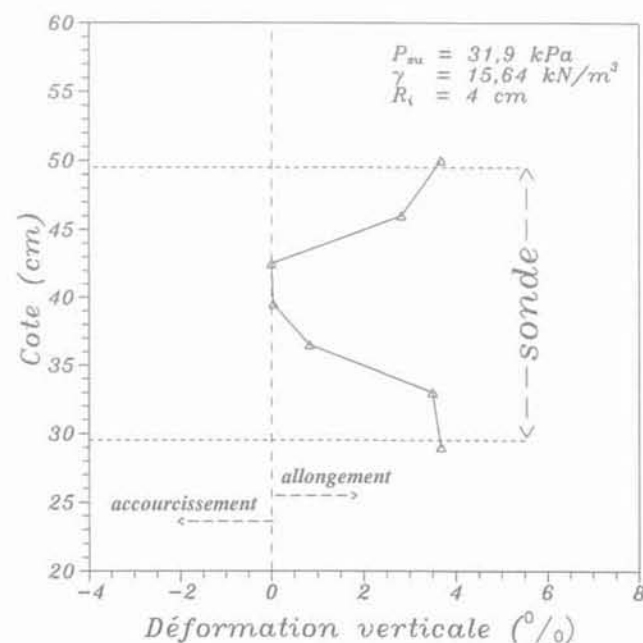
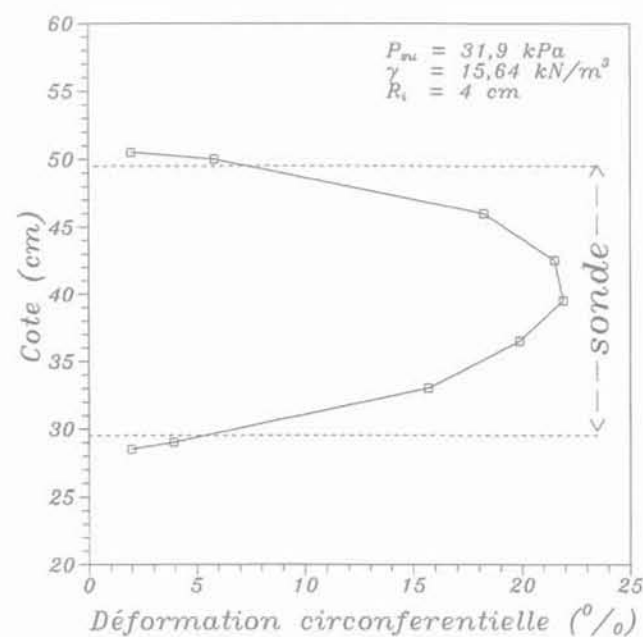


FIG.5a Courbes de déformations expérimentales types (essai n° 17).  
Typical experimental deformation curves (test n° 17).

## Résultats : déplacements horizontaux et verticaux dans le sol

Trente-six essais exploitables ont été réalisés ; ils ont permis de mesurer les déplacements dans le sol à une distance  $R_i$  de l'axe de la sonde. Dans certains essais  $R_i$  était égal à 4,8 cm et dans d'autres à 4 cm. On a tracé sur la figure 5 les déformations circonférentielles et verticales et les déplacements horizontaux et verticaux mesurés en fonction de la profondeur (courbes relatives aux essais n° 17 et 32). La cote est l'altitude par rapport au fond de la cuve.  $P_{su}$  est la surcharge en surface. Les déformations sont  $< 0$  en accourcissement.

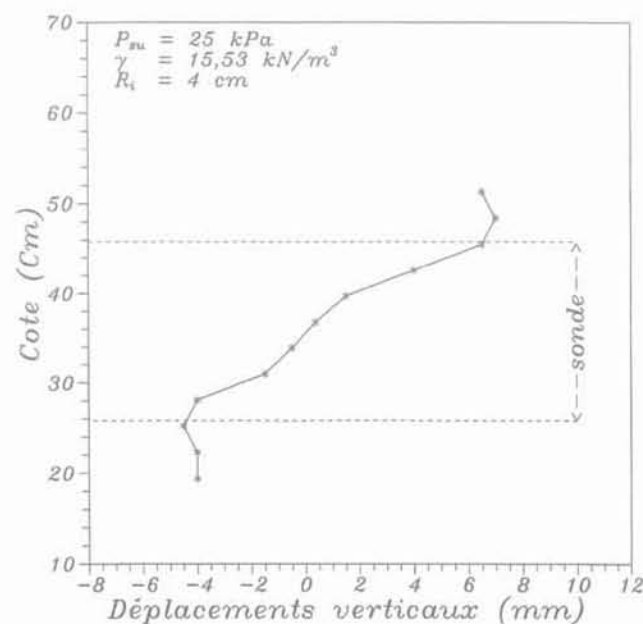
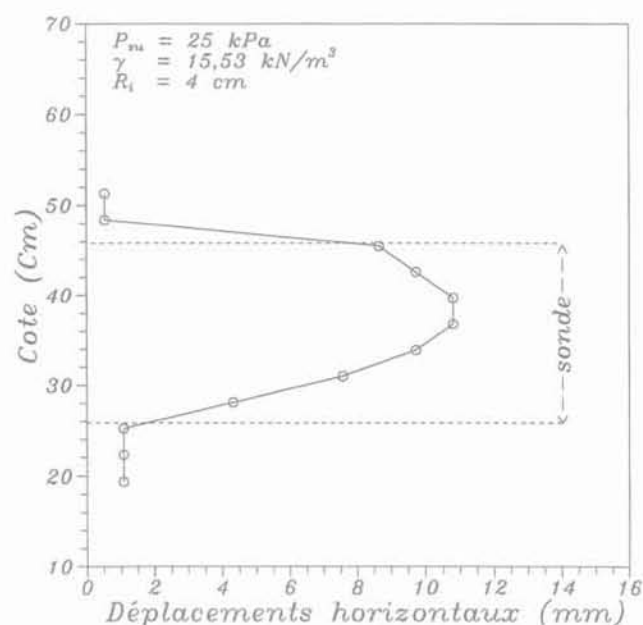


FIG.5b Courbes de déplacements expérimentaux types (essai n° 32).  
Typical experimental displacement curves (test n° 32).

Ces courbes montrent bien l'influence de l'élanement fini de la sonde sur la nature de l'expansion. En effet, les déplacements horizontaux généralement mesurés sont pratiquement nuls à quelques centimètres de part et d'autre des deux extrémités de la sonde ( $\leq 3$  cm). Le déplacement horizontal prend une certaine valeur au niveau de l'extrémité supérieure de la sonde et croît avec la profondeur jusqu'au milieu de celle-ci, puis décroît vers le bas. La courbure de cette déformée reflète la forme en tonneau que la membrane prend lors de sa dilatation.

Ce résultat est confirmé par la courbe de déplacement vertical; on trouve que ce déplacement prend une valeur maximale dirigée vers le haut au niveau de l'extrémité supérieure de la sonde. Il décroît avec la profondeur jusqu'à s'annuler au niveau du milieu de la sonde, puis on observe un déplacement vertical vers le bas qui croît avec la profondeur jusqu'au niveau de l'extrémité inférieure de la sonde.

En ce qui concerne les déformations, il existe un allongement vertical maximum, en général aux niveaux des extrémités de la sonde et qui diminue jusqu'à devenir pratiquement nul dans un plan horizontal passant par le milieu de la sonde. De part et d'autre des extrémités de la sonde, l'allongement diminue avec l'éloignement à la sonde.

Ces résultats paraissent logiques, du fait d'une certaine symétrie par rapport à un plan horizontal passant par le milieu de la sonde, et des extrémités attachées de la membrane. Cette dernière prend aussi la forme d'un tonneau et non une forme parfaitement cylindrique. L'eau exerçant sur ses parois une pression, cette pression exercée sur le sol a deux composantes: l'une horizontale et l'autre verticale.

La composante verticale est dirigée vers le haut dans la partie supérieure au plan horizontal « de symétrie » passant par le milieu de la sonde, et vers le bas dans la partie inférieure.

L'importance de la composante verticale de la pression par rapport à la composante horizontale augmente quand on se rapproche de l'une des extrémités de la sonde. Vers son milieu et pour des raisons « de symétrie », la pression est complètement horizontale. Ce qui explique les allures trouvées pour les courbes de déplacements horizontaux et verticaux.

Le résultat le plus important que l'on puisse tirer de ces courbes, est d'ordre quantitatif. En effet si on examine l'importance de la variation du déplacement horizontal avec la profondeur, on trouve que le rapport de ce déplacement au niveau des extrémités de la sonde par rapport au déplacement au niveau de son milieu, varie entre 0,2 et 0,6. On peut aussi calculer les déformations circonférentielles  $\epsilon_{\theta}$  à partir des déplacements horizontaux et on trouve pratiquement les mêmes rapports c'est-à-dire:  $\epsilon_{\theta}$  aux extrémités/ $\epsilon_{\theta}$  au milieu varie entre 0,2 et 0,6.

Ce résultat est confirmé par l'importance des déplacements verticaux qui ne sont nullement négligeables. Si nous examinons l'ordre de grandeur de la déformation verticale par rapport à la déformation circonférentielle dans un essai quelconque, nous trouvons que le rapport des deux maxima de déformations  $\epsilon_z$  et  $\epsilon_{\theta}$  ( $\epsilon_{z, \max}/\epsilon_{\theta, \max}$ ) est compris généralement entre 1/4 et 1/3.

$$1/4 \leq \epsilon_{z, \max}/\epsilon_{\theta, \max} \leq 1/3$$

Mais on a aussi parfois enregistré des déplacements horizontaux plus grands qu'ailleurs au niveau de l'une

des extrémités de la sonde, ceci étant dû à la faible surcharge en surface qui entraîne une dissymétrie du problème, ou parfois à des variations de la densité locale.

Le rôle de l'hétérogénéité de distribution de la densité locale apparaît comme très important. A partir des courbes de déplacements on peut remarquer clairement son influence sur la nature de l'expansion. On trouve parfois, par exemple, des déplacements au niveau de l'extrémité inférieure de la sonde nettement supérieurs aux déplacements au niveau de son milieu et de son extrémité supérieure. Quand il y a une variation de la densité locale, la membrane se gonfle plus là où la densité est plus faible.

Ce rôle de l'hétérogénéité du sol et de sa densité locale qui apparaissent dans nos essais ont été déjà signalés par Suyama *et al.* (1983), et ont été en partie trouvés numériquement par Yeung et Carter (1990) dans un sol argileux. Les auteurs ont trouvé que la membrane à faible profondeur (2 m) s'est déformée d'une manière irrégulière au début de l'expansion ( $\epsilon = 0,23\%$ ) et à la fin aussi ( $\epsilon = 14\%$ ). Le déplacement radial maximum n'est pas observé au milieu de la sonde mais à 0,21 L à partir de son extrémité supérieure (L étant sa longueur). Ils attribuent ce phénomène à la combinaison entre l'effet de la faible profondeur de l'essai et l'effet de non-homogénéité de la résistance du sol qui croît avec la profondeur.

Les résultats expérimentaux peuvent être comparés aux résultats numériques de Zanier (1985) pour un sol de Cran; il s'agit d'un limon très plastique et particulièrement imperméable. Zanier a trouvé pour une sonde d'élanement 6, par exemple, à une profondeur de 6 m et à 17,1 % de déformation volumique, que la sonde présente une déformation cylindrique sur 60 % environ de sa longueur (la déformation circonférentielle étant constante dans cette zone). Ce résultat est plus proche que le nôtre de l'hypothèse de déformation plane, mais il n'est pas tout à fait favorable non plus à cette hypothèse.

L'allure donnée par Zanier est celle de la déformée de la sonde elle-même et non celle de la courbe de déplacements à une certaine distance de la sonde telle que nous l'avons mesurée; de plus, les propriétés du sol qu'il a étudié sont très différentes du sable d'Hos-tun, ce qui empêche la comparaison quantitative.

Suryama *et al.* (1983) ont utilisé des rayons X dans des essais sur modèles afin d'étudier la dilatation de la sonde et les déplacements dans le sable. L'expansion trouvée par ces auteurs est plus proche de l'expansion cylindrique que celle que nous avons trouvée. Mais leurs essais ont été réalisés dans une chambre de petites dimensions (40 cm x 16 cm x 40 cm) avec une sonde de 20 cm de longueur et de 2 cm de diamètre; on peut poser alors la question sur l'influence des parois de la cuve sur la nature de l'expansion. Pour nos essais dans lesquels le rayon de la cuve est égal à 14 fois le rayon de la sonde, nous avons démontré dans une étude complémentaire que les effets des bords sont infimes vu la faiblesse des contraintes au voisinage des parois, et ce, en nous basant sur la théorie élastoplastique, et les études de Mokrani (1991) et Renoud-Lias (1978).

On note enfin que dans cette étude, on a supposé que le sable situé entre la membrane en caoutchouc de faible rigidité et la sonde, subissait les mêmes déformations que celles du sol qui l'entoure, ceci en négligeant les frottements verticaux entre les grains de sable

et la membrane et en supposant que le sable dans la cuve se comporte de la même manière que le sable entre la membrane et la sonde. Cette dernière réalité reste relative à cause de la présence de la membrane, mais ceci arrive aussi dans un essai *in situ*, et on peut donc accepter ce mécanisme.

## 2.4

### Conclusion de l'étude expérimentale

Quand on atteint le domaine des grandes déformations, le champ de déplacements créé par l'expansion de la sonde pressiométrique monocellulaire n'est pas tout à fait cylindrique. Dans un sol homogène, à une certaine distance de la cavité, la courbe de déplacements radiaux en fonction de la profondeur a la forme d'un tonneau. Dans le plan horizontal passant par le milieu de la sonde, le déplacement radial est maximal et le déplacement vertical est nul. De part et d'autre de ce plan le déplacement horizontal (radial) diminue et le déplacement vertical augmente en valeur absolue (dirigé vers le haut dans la partie supérieure et vers le bas dans la partie inférieure). Au niveau des extrémités de la sonde la déformation verticale n'est pas négligeable et atteint des valeurs comparables à la déformation circonférentielle.

Si la répartition de la densité dans le sol n'est pas homogène, l'expansion ne suit pas le schéma qu'on vient de décrire, le gonflement est influencé par la densité locale. On a trouvé dans certains essais un gonflement maximal au niveau de l'une des extrémités de la sonde. L'expansion est maximale là où la densité locale est faible.

## 3

### Étude numérique

Les essais pressiométriques ont montré l'influence de l'élanement de la sonde sur la nature de l'expansion, à partir des mesures de déplacements à une certaine distance de la sonde. Mais l'influence de la variation de volume du sol n'a pas pu être clarifiée. Le calcul théorique qui tient compte à la fois de l'élanement de la sonde et de la variation de volume du sol paraissait difficile jusqu'à présent, par contre, ce calcul peut être fait numériquement. Pour cela, le logiciel PLAXIS a été utilisé pour simuler numériquement les essais pressiométriques et comparer le calcul numérique aux résultats expérimentaux.

Le programme PLAXIS traite des problèmes aux limites bidimensionnels hydromécaniques couplés d'un milieu continu soumis aux chargements de type : déplacements imposés, forces surfaciques imposées, forces de volume imposées, etc. Il fonctionne en déformation plane ou en axisymétrie, et ici en petites déformations.

Le comportement du sol est décrit à l'aide d'un modèle élastoplastique de type Mohr - Coulomb non associé.

PLAXIS utilise des éléments triangulaires à 15 nœuds qui prédisent avec une bonne précision les charges limites classiques typiques en mécanique des sols. La méthode d'intégration spatiale est celle de Gauss utilisant 15 points d'intégration par élément en axisymétrie.

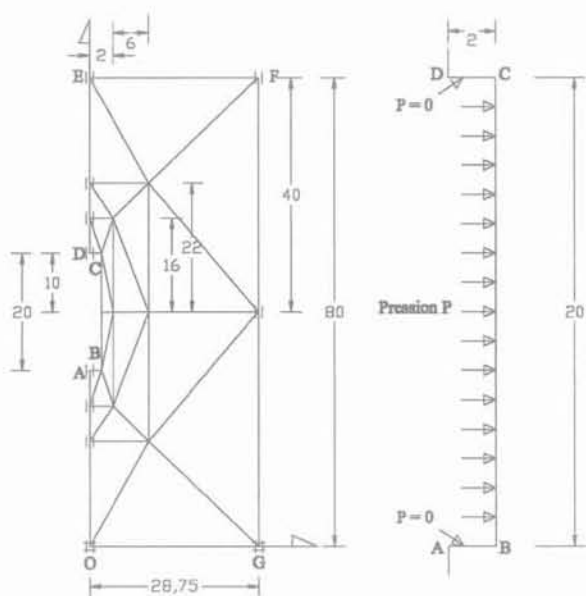
## 3.1

### Simulation numérique

On a tenté de simuler numériquement l'essai pressiométrique réalisé dans la cuve à sable dans les mêmes conditions que l'expérience. La position de la sonde dans la cuve est indiquée à la figure 3.

L'axe de la sonde étant axe de révolution, une étude de la section radiale de la cuve est donc suffisante par raison de symétrie.

La demi-cuve a été discrétisée suivant le maillage de la figure 6. Sur ce maillage de 24 éléments, Oy est l'axe de la sonde et le segment BC représente la membrane pressiométrique. Le maillage a été choisi de façon à avoir une ligne droite verticale parallèle à l'axe de la sonde et distante de 4 cm de celui-ci, ce qui permet de trouver les déplacements des points de cette ligne afin de les comparer à ce qui a été mesuré expérimentalement.



|| Déplacement libre verticalement et nul horizontalement

≡ Déplacement nul horizontalement et verticalement

FIG.6 Maillage utilisé dans les calculs et conditions aux limites en pression au niveau de la sonde (dimensions en cm).

Mesh used in the calculations and boundary conditions in pressure and displacement applied to the model (dimensions in cm).

## 3.2

### Choix d'un calcul pris comme référence et résultats

Plusieurs calculs numériques ont été réalisés avec différents choix de valeurs des paramètres mécaniques du sable. Ces valeurs ont été identifiées d'après les essais triaxiaux et les études déjà citées. On a choisi pour le module initial tangent E des valeurs comprises entre 8 500 kPa et 11 000 kPa et pour l'angle de frottement interne  $\phi$  des valeurs entre 35° et 37°.

Quant à l'angle de dilatance  $\Psi$  et au coefficient de Poisson  $\nu$ , ils ont été calculés à partir des essais triaxiaux et on a trouvé pour  $\Psi$  des valeurs situées entre  $11^\circ$  et  $14,5^\circ$  pour un poids volumique variant entre  $16,05$  et  $16,29 \text{ kN/m}^3$  (sable dense).

D'après les résultats de Lefebvre (1988) sur le même sable, mais à l'état très dense ( $\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$ ) on a trouvé des valeurs de  $\Psi$  situées entre  $13^\circ$  et  $14,4^\circ$ , et pour le même type de sable (très dense) nous avons trouvé d'après les essais présentés par Hadj-Sadok (1990) des valeurs de  $\Psi$  variant entre  $10,9^\circ$  et  $14,2^\circ$ .

Dans les essais pressiométriques, le poids volumique moyen du sable variait entre  $15$  et  $16 \text{ kN/m}^3$ . Dans l'essai n° 34 pris comme essai de référence  $\gamma = 15,7 \text{ kN/m}^3$ , il est donc normal de choisir un angle de dilatance plus faible que les valeurs citées : des valeurs de l'ordre de  $7^\circ$  à  $8^\circ$  paraissent raisonnables.

On remarque que la formule empirique  $\Psi = \phi - 30^\circ$  donne des valeurs proches de celles qui ont été trouvées, mais inférieures d'environ  $2^\circ$ ; et la formule de Bolton (1986)  $\Psi = 1,25(\phi - \phi_c)$  donne une valeur de  $\Psi$  de l'ordre de  $4^\circ$ .

La combinaison des valeurs des paramètres mécaniques du sable qui a donné les résultats les plus proches de l'expérience en ce qui concerne des déplacements à  $4 \text{ cm}$  de l'axe de la sonde et le déplacement vertical à la surface du sable est :  $E = 8500 \text{ kPa}$ ;  $\nu = 0,35$ ;  $\phi = 35,7^\circ$ ;  $\Psi = 5^\circ$  avec un coefficient de pression des terres au repos  $K_0 = 0,41$ . La valeur de  $\phi$  a été jugée convenable pour ce calcul, mais il est difficile de prouver sa validité expérimentalement avec précision, sachant notamment que  $\phi$  est pris constant quel que soit le niveau local de contrainte dans le calcul.

### 3.3

## Les déplacements

La courbe calculée de déplacements horizontaux est parfaitement comparable à la courbe expérimentale qualitativement et quantitativement: les deux courbes ont la même allure, le déplacement horizontal maximal calculé de  $7,44 \text{ mm}$ , ne diffère que de  $7\%$  du déplacement horizontal maximal expérimental ( $8 \text{ mm}$ ). Cette différence est très faible.

Une différence entre les conditions expérimentales et celles du calcul réside dans la transmission de la surcharge appliquée en surface. Le calcul transmet la totalité de cette surcharge en tout point du massif, mais d'après une étude expérimentale complémentaire et les études de Renoud - Lias (1978) et Eissautier (1986), on a constaté que cette transmission n'est réalisée qu'à  $50\%$  au voisinage du milieu de la sonde, ce qui donne un état de contrainte initial dans le calcul plus fort que dans la réalité, donc des déplacements calculés plus faibles que dans l'expérience pour une même pression appliquée dans la sonde. Ce dernier facteur (la transmission de la surcharge verticale) influe partiellement sur les déplacements horizontaux à travers les contraintes horizontales  $K_0\sigma_z$  ( $K_0$  pris de l'ordre de  $0,4$ ) mais il influe complètement sur les déplacements verticaux, et c'est l'une des raisons pour lesquelles les déplacements verticaux calculés sont toujours plus faibles que ceux de l'expérience.

L'allure de la courbe des déplacements verticaux calculés est la même que celle de l'expérience, mais les valeurs calculées sont toujours plus faibles que les

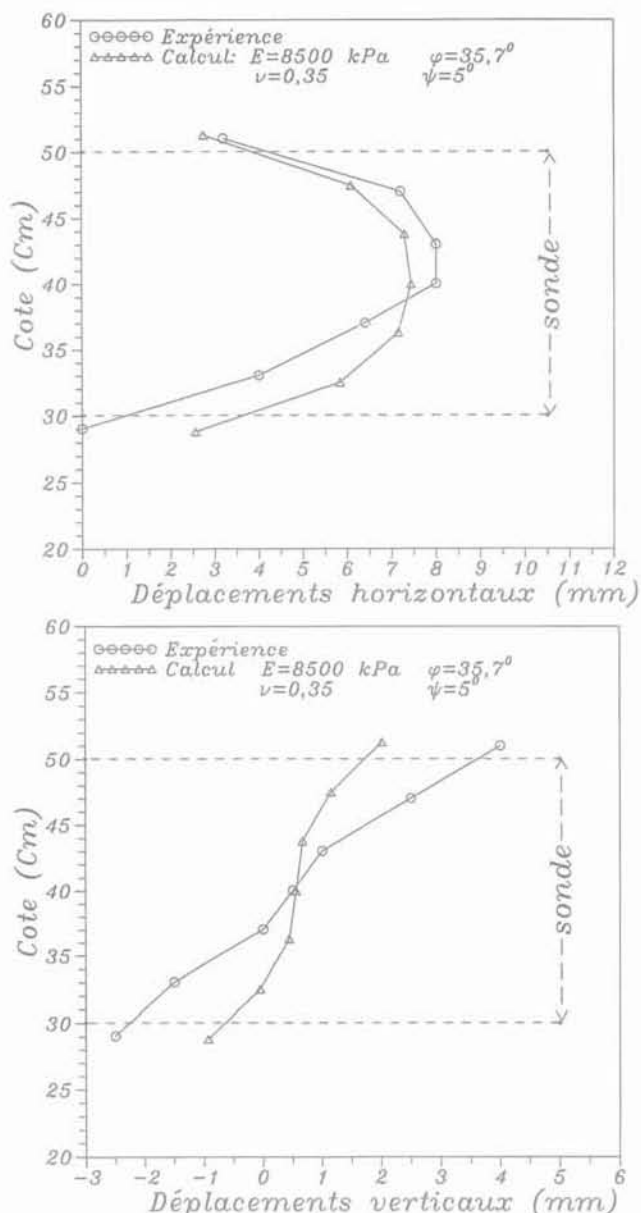


FIG. 7 Déplacements horizontaux et verticaux calculés et mesurés à  $4 \text{ cm}$  de l'axe de la sonde.

Measured and calculated displacements at a distance of  $4 \text{ cm}$  from the axis of the probe cell.

valeurs mesurées. Le décalage quantitatif de la courbe des déplacements verticaux calculés par rapport à la courbe expérimentale est dû tout d'abord au mode de transmission de la surcharge verticale qu'on vient de décrire. De plus, dans le calcul, la pression introduite par étape sur le segment BC (maillage Fig. 6) qui représente la membrane de la sonde est toujours horizontale. Cette supposition est valable dans le domaine des petites déformations. En revanche, quand on dépasse ce domaine, ce qui se produit dans l'expérience, la membrane prend la forme d'un tonneau, et cette forme peut être constatée d'après l'allure de la courbe des déplacements horizontaux, ou d'après le maillage déformé (Fig. 9) où apparaît la déformée de la membrane en fin d'essai, et à l'étape du doublement du volume de la sonde ( $\Delta V/V_0 = 1$ ).

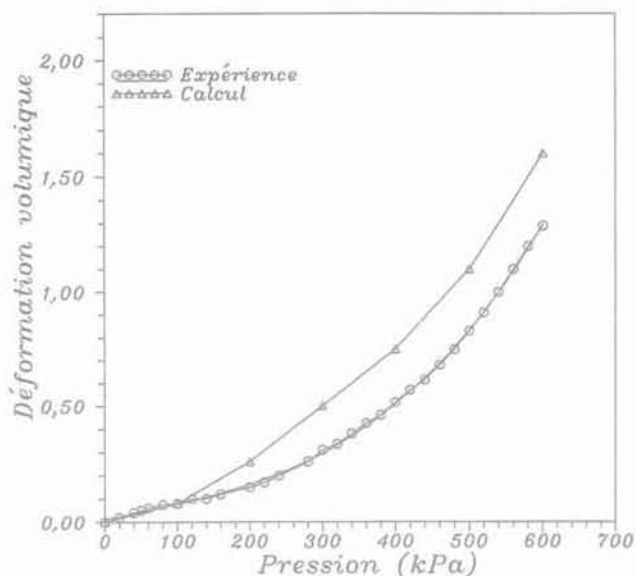


FIG. 8 Courbes pressiométriques expérimentale et calculée.  
Experimental and calculated pressuremeter curves.

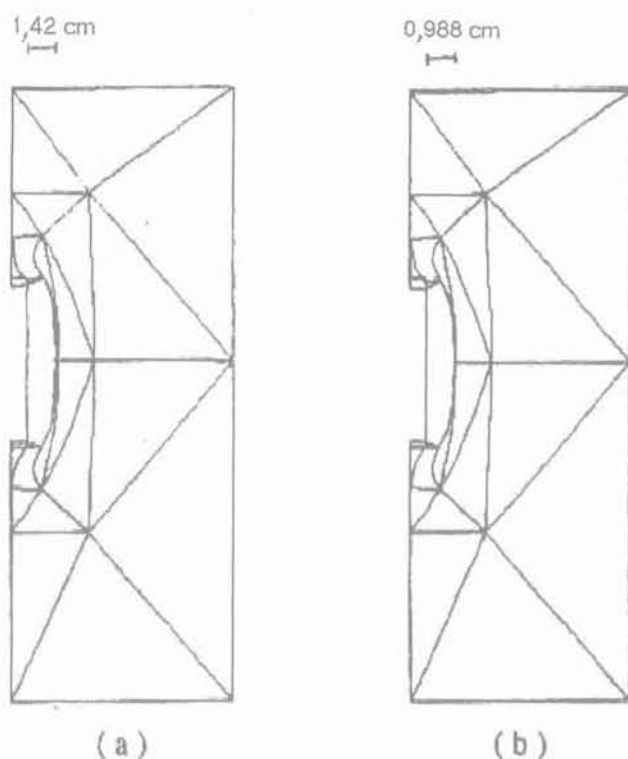


FIG. 9 Maillage déformé : (a) en fin d'essai ; (b) à l'étape du doublement du volume de la sonde.  
Deformed mesh a) : End of test. b) Stage corresponding to  $\Delta V/V_0 = 1$ .

Une autre différence existe entre les conditions de l'expérience et celles du calcul : la membrane est attachée à ses extrémités aux deux tubes rigides, alors que dans le calcul, les points B et C qui représentent ces deux extrémités sont complètement libres. Ne pas tenir compte de cet effet est une raison supplémentaire de trouver des valeurs calculées des déplacements verticaux plus faibles que dans l'expérience. Ceci se

confirme avec la comparaison entre la courbe pressiométrique calculée et la courbe expérimentale (Fig. 8), la courbe calculée est proche de la courbe expérimentale, mais aux grandes déformations, la déformation volumique calculée est plus grande que celle mesurée pour une même pression appliquée dans la sonde.

Pour les raisons qu'on vient de citer, on trouve que le calcul numérique donne des résultats satisfaisants pour les déplacements horizontaux au voisinage de la sonde et le déplacement vertical en surface, mais il donne des déplacements verticaux à 4 cm de l'axe de la sonde inférieurs, de l'ordre de 50 %, aux valeurs mesurées expérimentalement.

Sur la figure 10, les isovalues des déplacements en fin d'essai et à l'étape de  $(\Delta V/V_0 = 1)$  sont données. Dans la zone d'influence de l'essai, on trouve des schémas semblables pour ces deux étapes.

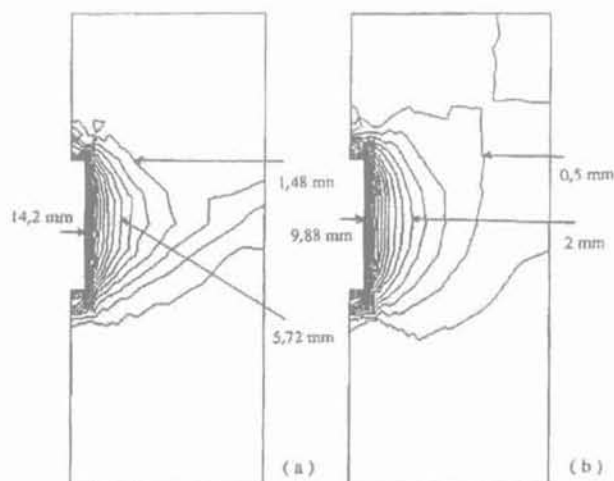


FIG. 10 Isovalues des déplacements horizontaux : (a) en fin d'essai ; (b) à l'étape du doublement du volume de la sonde.  
Contours of displacement increments a) : End of test. b) : Stage corresponding to  $\Delta V/V_0 = 1$ .

La figure 14 montre les déplacements horizontaux de la membrane au moment du doublement du volume de la sonde, le déplacement horizontal près des extrémités de la membrane est de 4,96 mm, il est de l'ordre de la moitié du déplacement en son centre (9,91 mm).

Si l'on suppose, durant l'essai pressiométrique, que le champ de déplacement créé par l'expansion de la sonde est cylindrique, et si on calcule le rayon de la cavité à l'état déformé au moment du doublement du volume de la sonde à partir du volume d'eau ajouté à une sonde de 20 cm de longueur et 2 cm de rayon, le déplacement radial au bord de la cavité est de 8,28 mm.

Le raisonnement avec l'hypothèse de déformation plane, introduit donc une sous-estimation du gonflement de la sonde en son milieu de l'ordre de 20 %. Pour simuler le cas d'une sonde tricellulaire, nous avons examiné le comportement du tiers central de la sonde. Nous avons trouvé que le déplacement radial calculé devient 9,53 mm ; ainsi en raisonnant avec l'hypothèse de déformation plane pour le tiers central, la sous-estimation du gonflement de la sonde en son milieu n'est plus que de 4 %.



## Influence des paramètres mécaniques et de la variation de volume du sol sur les résultats de l'expansion

Les figures 11 et 12 montrent l'influence du module initial tangent  $E$  et de l'angle de frottement interne  $\varphi$  sur les résultats du calcul. On peut constater la grande sensibilité de l'expansion à la valeur de l'angle de frottement interne du sol, une augmentation de  $\varphi$  de  $1^\circ$  peut entraîner une diminution des déplacements au voisinage de la sonde de l'ordre de 25 %.

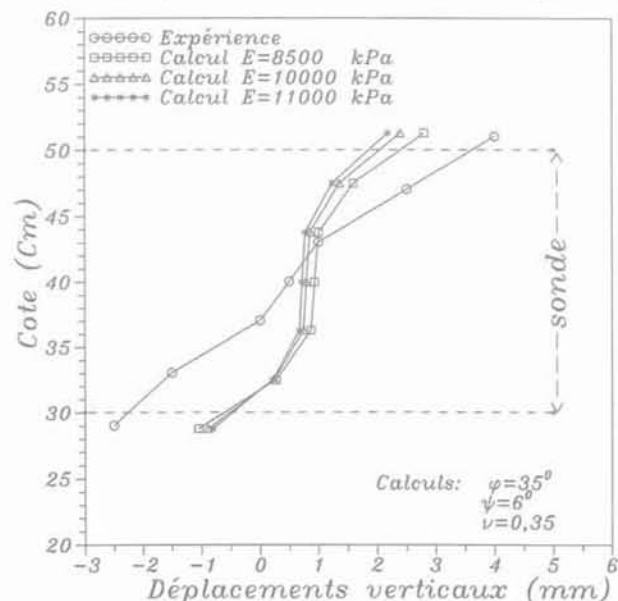
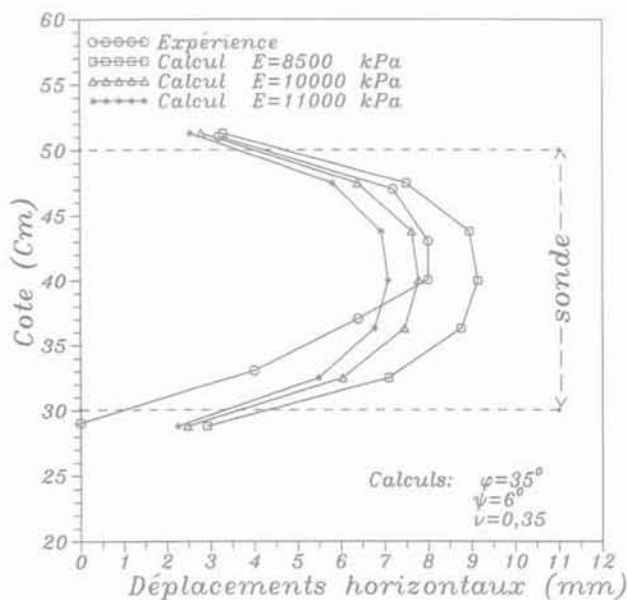


FIG.11

**Influence du module initial tangent : déplacements horizontaux et verticaux à 4 cm de l'axe de la sonde.**

Influence of the value of the initial tangent modulus : horizontal and vertical displacements at a distance of 4 cm from the axis of the probe cell.

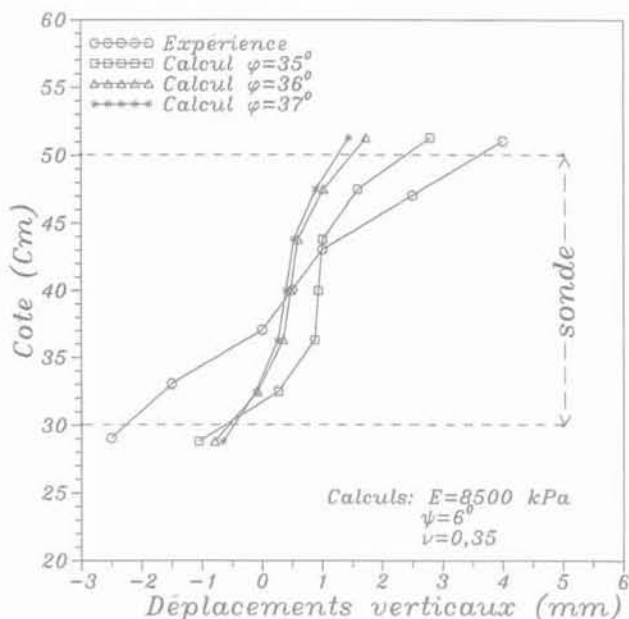
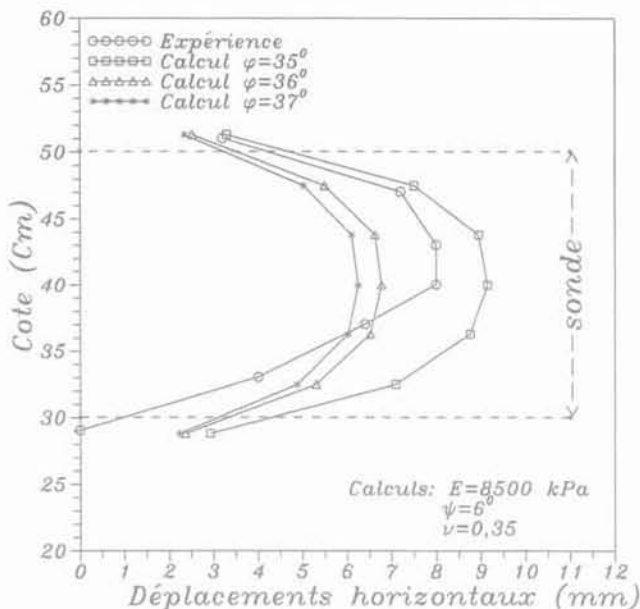


FIG.12

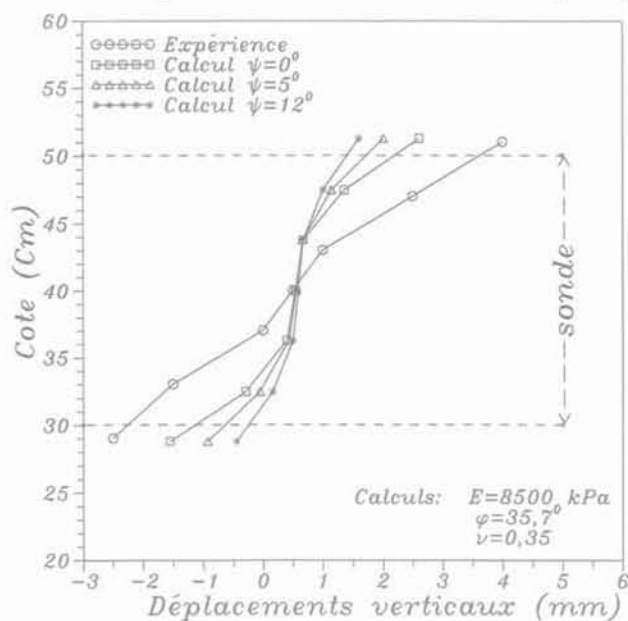
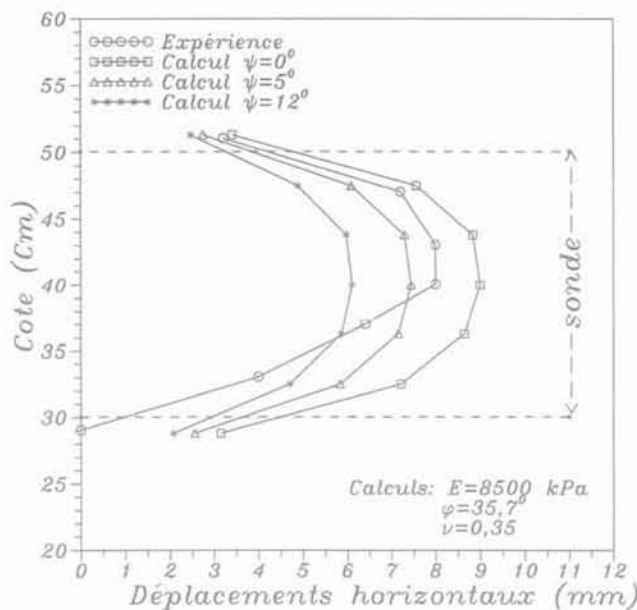
**Influence de l'angle de frottement interne : déplacements horizontaux et verticaux à 4 cm de l'axe de la sonde.**

Influence of the value of the internal friction angle : horizontal and vertical displacements at a distance of 4 cm from the axis of the probe cell.

En fin d'essai, le calcul des déplacements horizontaux à 4 cm de l'axe de la sonde avec un angle de dilatance  $\Psi = 5^\circ$  donne des valeurs plus faibles d'environ 20 % par rapport au calcul avec les mêmes paramètres  $E$ ,  $\varphi$ ,  $\nu$  et  $K_0$  mais avec une dilatance nulle. Avec un angle de dilatance de  $12^\circ$ , ces déplacements diminuent d'environ 35 % (Fig. 13).

Pour  $\Psi = 5^\circ$ , la pression qui correspond au doublement du volume de la sonde (la pression limite conventionnelle) est égale à 490 kPa. Pour cette pression, on a tracé les déplacements horizontaux de la membrane dans le cas de ce sable pour  $\Psi = 0^\circ$ ;  $5^\circ$  et  $12^\circ$  (Fig. 14).

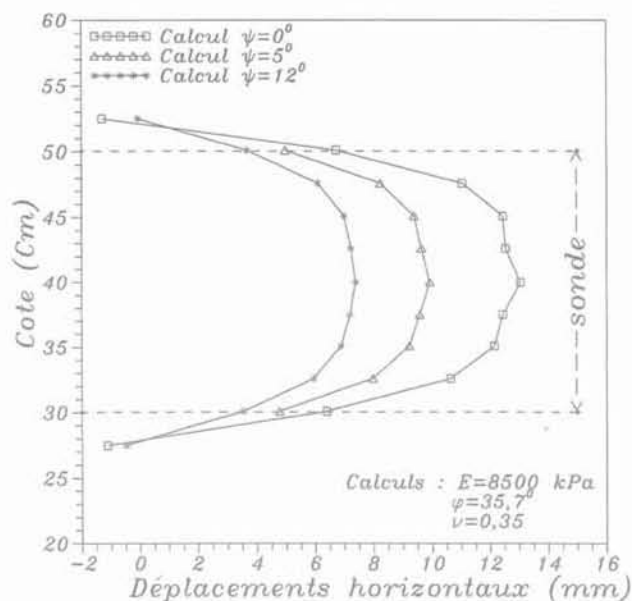
Pour  $\Psi = 0^\circ$ , la pression limite conventionnelle  $P_{lc}$  peut être estimée à partir du calcul numérique à 400 kPa. Pour  $\Psi = 12^\circ$  cette pression est de l'ordre de 590 kPa.



**FIG.13** Influence de la variation de volume plastique du sol sur les résultats du calcul : déplacements horizontaux et verticaux à 4 cm de l'axe de la sonde.

Influence of the value of the dilatancy angle : horizontal and vertical displacements at a distance of 4 cm from the axis of the probe cell.

La pression limite conventionnelle augmente donc de 47 % quand  $\Psi$  passe de  $0^\circ$  à  $12^\circ$ . On constate à partir des résultats de Yu et Houlsby (1991), une influence de  $\Psi$  de cet ordre sur la pression limite de l'expansion d'une cavité cylindrique. Selon les résultats de Yu et Houlsby, quand  $\Psi$  passe de  $0^\circ$  à  $10^\circ$ , la pression limite augmente de l'ordre de 50 %. Ce grand rôle de la dilatance sur les résultats de l'essai pressiométrique a été signalé aussi, d'une part par Baguelin *et al.* (1972), par Wroth et Windle (1989) et par d'autres auteurs, et d'autre part, par Cambou *et al.* (1990) d'après les résultats de leur calcul numérique avec le logiciel Pressi'dent. Il s'agit d'un calcul monodimensionnel utilisant l'axisymétrie du problème et l'hypothèse de déformation plane.



**FIG.14** Déplacements horizontaux calculés de la membrane pour la pression de 490 kPa. Calculated horizontal displacements of the membrane for the pressure of 490 kPa.

Ce dernier modèle a donné des résultats raisonnables dans le cas du sable lâche. En revanche, pour le sable dense, les résultats ne sont pas satisfaisants. Cambou *et al.* trouvent que la simulation numérique n'a pas donné de bons résultats à cause de l'effet de la dilatance non pris en compte dans le modèle, la prise en considération de cet effet, hors hypothèse de déformation plane, améliorant les résultats.

### 3.5

## Comparaison avec d'autres calculs numériques

En comparant nos résultats numériques à ceux de Zanier, qui a réalisé une étude en choisissant pour le sol un modèle élastoplastique avec écrouissage cinématique, l'allure des déformées d'une sonde d'élançement 6, poussée selon cette étude jusqu'à 17 % de déformation volumique, présente un palier de déplacement radial constant sur environ 60 % de la longueur de la sonde. Mais on peut remarquer que le palier où le déplacement radial est constant diminue au fur et à mesure que la déformation volumique augmente ; il est probable qu'à  $\Delta V/V_0 = 1$ , la membrane prend la forme d'un tonneau.

Elgamali (1991) a fait une étude numérique, en utilisant une loi de comportement incrémentale non-linéaire. En considérant l'hypothèse de la déformation plane, l'essai pressiométrique est simulé dans un matériau non pesant, avec une sonde de rayon 2,5 cm et de longueur 15 cm.

Les déplacements radiaux au sein du massif d'après notre calcul en fin d'essai ( $\Delta V/V_0 = 1,29$ ) et d'après les résultats numériques de Elgamali ( $\Delta V/V_0 = 1,25$ ), sont donnés sur la figure 15,  $R_0$  étant le rayon initial de la sonde, R la distance à son axe. D'après notre calcul, dans le plan horizontal passant par le milieu de la sonde, les déplacements radiaux diffèrent de ceux trouvés aux extrémités de la sonde. Les valeurs trouvées

## Conclusion

La simulation numérique avec PLAXIS a donné des résultats satisfaisants comparés à l'expérience pour les déplacements horizontaux (radiaux) durant l'essai pressiométrique dans la cuve à sable. Pour les déplacements verticaux, la simulation numérique a donné des résultats qualitatifs comparables à ceux de l'expérience (allure de la courbe) mais plus petit (de l'ordre de 50 %). Ce résultat numérique aurait pu être amélioré en prenant pour le calcul, les mêmes conditions que celles de l'expérience (transmission partielle de la surcharge verticale et fixation de la membrane pressiométrique à ses extrémités).

Les deux courbes pressiométriques, expérimentale et calculée, sont très proches l'une de l'autre, une amélioration radicale des résultats pouvant probablement être apportée en donnant au modèle PLAXIS la possibilité de tenir compte de grandes déformations et de suivre l'évolution des paramètres mécaniques du sol avec la variation de la densité et avec l'état de contrainte durant l'essai.

Le calcul confirme le résultat expérimental de la nature de l'expansion et la forme en tonneau prise par la sonde monocellulaire lors de son gonflement. Pour cette sonde, le calcul montre que le gonflement aux extrémités est de l'ordre de la moitié de celui en son milieu. Le raisonnement avec l'hypothèse de la déformation plane sous-estime le déplacement au centre de la sonde de l'ordre de 20 % ; l'utilisation d'une sonde monocellulaire exige donc de la prudence avec cette hypothèse. Il nous semble que l'utilisation d'une sonde tricellulaire Menard, type « G », peut diminuer cette incidence.

Il est très important de tenir compte de l'influence de la variation de volume sur le résultat déduit de l'essai pressiométrique, notamment sur la pression limite conventionnelle qui augmente quand l'angle de dilatance augmente.

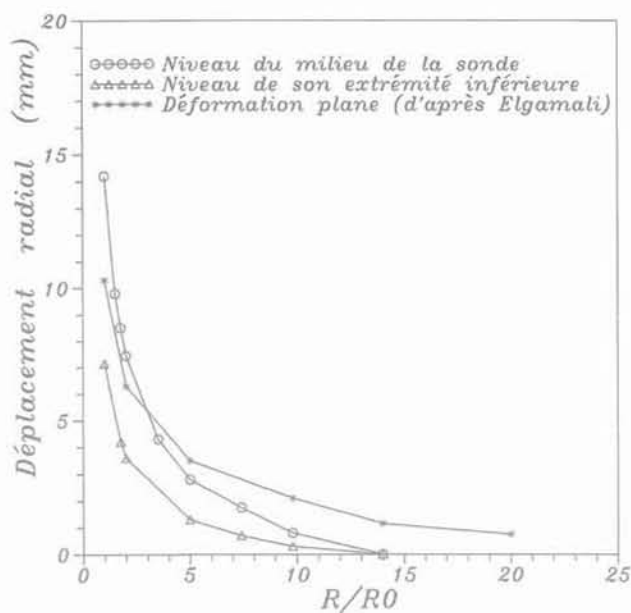


FIG.15 Répartition du déplacement radial le long d'un rayon dans le massif.  
Radial displacement along the radius situated at mid height of the cell.

par Elgamali (qui considère l'hypothèse de déformation plane) sont comprises entre les valeurs qui ont été trouvées jusqu'à  $R/R_0 = 4$ .

Loin de la sonde, les conditions aux limites sont différentes entre notre calcul et celui de Elgamali ; le rayon limite de notre maillage est  $R_L = 14 R_0$ , alors qu'Elgamali a pris  $R_L = 80 R_0$  ; c'est pourquoi, le déplacement radial qu'il a trouvé s'annule pratiquement à une distance de  $40 R_0$  loin du nôtre qui s'annule à  $14 R_0$ .

Cette comparaison reste symbolique, compte tenu des différences entre les conditions de calculs.

## Bibliographie

- Baguélin F., Le Tirant P. - « La méthode pressiométrique. Application à terre et en mer. Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer », 19-20 avril, Paris, ed. Technip., vol. 2, 1982, p. 13-29.
- Bellotti R., Ghionna V., Jamiolkowski M., Robertson P.K., Peterson R.W. - « Interpretation of moduli from self boring pressuremeter tests in sand ». *Géotechnique* 39 n° 2, 1989, p. 269-292.
- Benoit J., Clough G.W. - « Principal stresses derived from self-boring pressuremeter test in soft clay ». The pressuremeter and its marine applications. Second International Symposium A.S.T.M. Texas- 2.3 May, 1986, p. 137-149.
- Biguenet G., Sirieys P. - « Étude expérimentale du comportement de sols meubles à l'aide du pressiomètre », 4<sup>e</sup> Colloque franco-polonais de mécanique des sols appliquée. Grenoble, 14-18 septembre, 1987, p. 17-32.
- Borsetto M., Imperato L., Nova R., Peano A. - « Influence de la longueur du pressiomètre dans l'argile molle ». Symposium international. « Essais en place », édition *Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur*, 1983, Paris, vol. 2, p. 211-215.
- Cambou B., Boubanga A., Bozett O.P., Maghrou M. - « Determination of constitutive parameters from pressuremeter tests ». Third international symposium on pressuremeters, Oxford University 2-6 April 1990, Thomas Telford ed., London, p. 243-252.
- Chaffois S., Monnet J. - « Modèle de comportement du sable au cisaillement dans un état tridimensionnel de contrainte et de déformation ». *Revue française de Géotechnique* n° 32, 1985, p. 59-69.
- Fahey M., Randolph M.F. - « Effect of disturbance on parameters derived from self-boring pressuremeter tests in sand ». *Geotechnique* 34 n° 1, 1986, p. 81-97.
- Faugeras J.-C., Gouves R., Meunier P., Nagura M., Matsubara L., Sugawara N. - « On the various factors affecting pressuremeter test results ». Symposium international. « Essais en place », ed. *Bulletin de l'associa. Int. de géol. de l'ing.* Paris, vol. 2, 1983, p. 275-281.
- Fawaz A. - « Étude expérimentale et numérique du pressiomètre en milieu pulvérulent ». Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble.
- Flavigny E., Desrués J., Palayer B. - « Le sable d'Hostun "RF" ». *Revue Française de Géotechnique* n° 53, 1990, p. 67-70.
- Gambin M. - « The history of pressuremeter practice in France ». Proceedings of the Third International Symposium on Pressuremeters, Oxford University, 2-6 April 1990, Thomas Telford ed., p. 5-24.
- Ghionna V., Jamiolkowski M., Manassero M. - « Limit pressure in expansion of cylindrical cavity in sand ». British geotechnical society symposium.

- Oxford University Third International Symposium on Pressuremeters 2-6 April 1990, Thomas Telford ed., p. 149-158.
- Hughes J.M.O., Wroth C.P., Windle D. - « Pressuremeter tests in sands ». *Géotechnique* 27 n° 4, 1977, p. 455-477.
- Jewell R.J., Fahey M., Wroth C.P. - « Laboratory studies of the pressuremeter tests in sand ». *Géotechnique* 30, n° 4, 1980, p. 507-531.
- Lassoudiere F., Zanier F. - « Numerical analysis of pressuremeter tests by the finite element method ». The pressuremeter and its marine applications second international symposium. Texas 2-3 May 1986, ASTM STP950, p. 121-135.
- Manassero M. - « Stress strain relationships from drained self-boring Pressuremeter tests in sands ». *Géotechnique* 39 n° 2, 1989, p. 239-307.
- Palmer A.C. - « Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay, a simple interpretation of the pressuremeter test ». *Géotechnique* 22 n° 3, 1972, p. 451-457.
- Salençon J. - « Expansion quasi statique d'une cavité à symétrie sphérique ou cylindrique dans un milieu élastoplastique ». *Annales des ponts et chaussées* III., 1966, p. 175-187.
- Schnäid F., Houlsby G. - « Measurement of the properties of sand in a calibration chamber by the cone pressuremeter test ». *Géotechnique* 42 n° 4, 1992, p. 587-601.
- Selvadurai P. - « Large strain and dilatancy effects in pressuremeter ». *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 110, n° 3 1984, p. 421-436.
- Shahrour I., Kasdi A., Abriak N. - « 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 ». *Revue française de géotechnique*, n° 73, p. 27-33.
- Sloan S.W., Randolph M.F. - « Numerical prediction of collapse loads using finite element methods ». *Int. J. numer. and methods. geomech.*, 6, 1982, p. 47-76.
- Suyama K., Imai T., Ohya S. - « Lateral lead tester (LLT) its method and accuracy ». Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer. 19-20 avril 1982, Paris, ed. Technip., p. 67-83.
- Suyama K., Ohya S., Imai T., Matsubara M., Nakayama E. - « Ground behavior during pressuremeter testing ». Symposium international « Essais en place », ed. *Bullet. de l'associa. int. de géol. de l'ing.* Paris, vol. 2, 1983, p. 397-402.
- Vermeer P.A., De Borst R. - « Non associated plasticity for soils, concrete and rock ». Delft, Heron Edition, vol. 29, n° 3, 1984, 64 p.
- Wood D.M., Wroth C.P. - « Some laboratory experiments related to the results of pressuremeter tests ». *Geotechnique* 27, n° 2, 1977, p. 181-201.
- Wroth. C.P., Windle. - « Analysis of the pressuremeter test allowing for volume Change ». *Geotechnique* 25 n° 3, 1975, p. 598-604.
- Yeung S.K., Carter J.P. - « Interpretation of the pressuremeter test in clay allowing for membrane end effects and material non homogeneity ». Third international symposium on pressuremeter. British geotechnical society, Oxford University, 2-6 April 1990, ThomasTelford ed., p. 199-208.
- Yu H.S., Houlsby G.T. - « Finite cavity expansion in dilatant soil: Loading analysis ». *Géotechnique* 41 n° 2., 1991, p. 173-183.