

Modélisation numérique du Géomécamètre®

S.M. SENOUCI
J. MONNET

LIRIGM,
Université J.-Fourier
Grenoble

Résumé

Un nouvel appareil d'essais *in situ* a été conçu et développé. C'est une nouvelle variante du pressiomètre, exploitant les forces générées par un écoulement d'eau contrôlé autour de la sonde de mesure. L'écoulement hydraulique permet de faire varier la contrainte verticale, artificiellement, au niveau des essais. L'influence de cette contrainte est prise en compte dans l'interprétation de résultats des essais. L'appareil permet de la contrôler et de la faire varier pour une meilleure évaluation des caractéristiques mécaniques du sol. Le sable fin d'Hostun a été choisi comme matériau pour réaliser l'étude expérimentale sur le Géomécamètre. Une série d'essai a été réalisée dans une cuve soumise à un dispositif de surcharge en surface du massif de sol. Une étude préliminaire des écoulements d'eau autour de la sonde de mesure Géomécamétrique, une évaluation du choix du mode opératoire et de l'augmentation des contraintes verticales ont été réalisées en utilisant le logiciel en éléments finis SEEP. Une simulation numérique des 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 et des conditions de réalisation des essais sur les résultats de calculs a été étudiée.

Numerical modelling of the Geomecameter®

Abstract

A new *in situ* testing apparatus was thought up and developed. It's a new variant of the pressuremeter, using the forces generated by a water flow around the measurement probe. The hydraulic flow allows the variation of the vertical stress, at the test level. The influence of this stress is taken into account for the interpretation of the test results. The apparatus allows control and variation of the vertical stress for a better evaluation of the soil mechanical characteristics. Hostun's thin sand was chosen for the experimental study with the Geomecameter. Tests were carried out in a tank with an overload mechanism at the surface of the soil. A preliminary study of water seepage around the geomecametric measurement cell, an evaluation of the choice of the appropriate test procedure and the increase of the vertical stresses were realised using a finite element software : SEEP. A numerical simulation of the tests was done with PLAXIS software. The numerical results were compared with experimental ones. The influence of mechanical parameters of the sand and the conditions of the experiment on the results were studied by calculation.

Introduction

La nécessité de prise de décision souvent très rapide jointe à la difficulté, voire l'impossibilité de prélever des échantillons « intacts » et représentatifs d'un massif pour effectuer des essais au laboratoire, sont autant d'impératifs qui poussent les géotechniciens à privilégier les essais *in situ*.

Ces essais sollicitant le sol dans ses conditions naturelles, sont affranchis des problèmes liés à la réalisation d'essais au laboratoire (échantillonnage, granulométrie, modification de l'état de contrainte et de teneur en eau), car le comportement du sol est écrit dans son contexte réel. Mais les chemins de sollicitation suivis dans ces essais ne sont pas homogènes, ce qui rend difficile leur interprétation théorique, et entraîne par conséquent des difficultés pour l'identification des paramètres de comportement.

Le pressiomètre est massivement utilisé de nos jours dans les projets de fondations. L'interprétation usuelle consiste à tirer de cet essai d'une part le module pressiométrique, et d'autre part la pression limite.

Ces deux caractéristiques n'étant pas des caractéristiques mécaniques intrinsèques au sol, de nombreux travaux ont été consacrés à la détermination des propriétés mécaniques des sables à partir de l'essai pressiométrique.

Un nouvel appareil d'essais *in situ*, nouvelle variante du pressiomètre couplé à un système hydraulique a été conçu. Cet appareil exploite les forces hydrauliques générées par la circulation d'eau autour de la sonde de mesure pour faire varier la contrainte verticale au niveau de l'essai.

L'appareil a été testé dans une cuve remplie de sable d'Hostun et soumise à un dispositif de surcharge en surface du massif.

Dans cet article, on détermine les caractéristiques mécaniques des sables à l'aide d'un modèle analytique élastique parfaitement plastique, basé sur le critère de Mohr Coulomb et une règle d'écoulement non associée (Monnet et Khelif, 1994).

Une première étude numérique est menée avec le logiciel en éléments finis SEEP pour étudier le mode de variation des contraintes dues à l'écoulement autour de la sonde de mesure, et une seconde étude avec le logiciel en éléments finis PLAXIS pour étudier la sensibilité de l'essai par rapport aux paramètres qui le régissent, ainsi que les conditions expérimentales dans lesquelles se sont déroulées les essais géomécaniques.

Description du Géomécamètre

L'appareil est constitué d'un pressiomètre couplé à un dispositif hydraulique. En surface, sont installés les tableaux de prise de mesures hydrauliques (Fig. 1) et pressiométriques (contrôleur pression - volume Ménard type G), connectés par des tubes en Rilsan à la sonde, descendues dans le trou de forage.

La sonde utilisée est une sonde monocellulaire (Fig. 2) de 31 cm de longueur et de 6 cm de diamètre. La cellule de mesure est intercalée entre la cellule d'injection (CI), à son amont, et la cellule de pompage (CP), à son aval. Une circulation d'eau verticale est établie en circuit fermé entre ces deux cellules.

Étude théorique

L'appareil exploite la circulation d'eau autour de la sonde de mesure pressiométrique et les forces qui sont générées pour faire varier la contrainte verticale régnant au niveau de l'essai.

Pour un élément de volume ΔV de sol, la force d'écoulement s'écrit :

$$\vec{F} = \vec{i} \gamma_w \Delta V \quad (1)$$

\vec{i} étant le gradient hydraulique au centre de l'élément considéré. Il est déterminé à partir de la formule suivante :

$$i = \frac{\partial H}{\partial l} = \frac{H_i - H_p}{l_e} \quad (2)$$

avec :

$$H_i = \frac{P_i}{\gamma_w} + Z_i$$

$$H_p = \frac{P_p}{\gamma_w} + Z_p$$

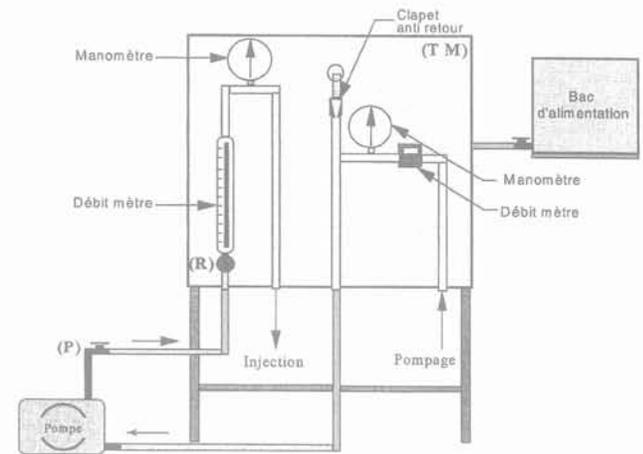


FIG. 1 Dispositif hydraulique du Géomécamètre.
The hydraulic panel of the Geomecameter.

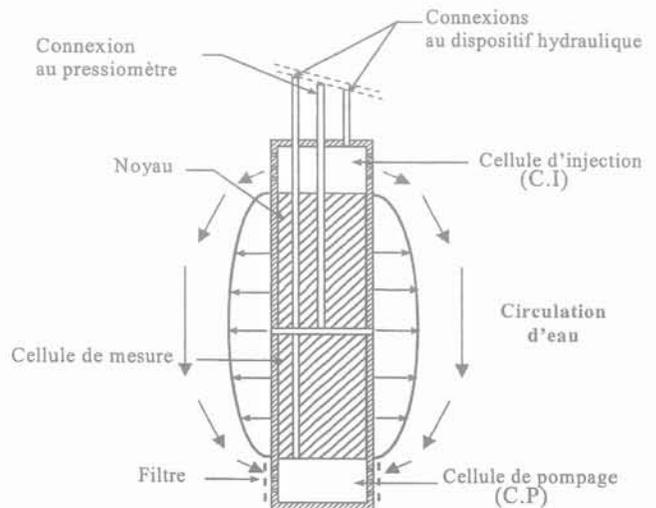


FIG. 2 Sonde monocellulaire du Géomécamètre.
The monocell probe of the Geomecameter.

H_i : charge d'eau appliquée au niveau de la cellule d'injection (m),

H_p : charge d'eau appliquée au niveau de la cellule de pompage (m),

Z_i : profondeur de la cellule d'injection,

Z_p : profondeur de la cellule de pompage,

l_e : longueur parcourue par l'écoulement entre les deux cellules (m).

L'augmentation de la contrainte effective au niveau du plan horizontal passant par le milieu de la sonde de mesure (correspondant à la profondeur de l'essai) est déterminée à partir de la formulation suivante :

$$\delta\sigma' = i\gamma_w \frac{l_e}{2} \quad (3)$$

avec :

γ_w : poids volumique de l'eau,

i : gradient hydraulique déterminé à partir de la formulation (2),

l_e : distance entre les cellules d'injection et de pompage.

Cette augmentation de contrainte effective traduit ainsi une augmentation provoquée de la profondeur de l'essai grâce à la circulation d'eau autour de la sonde de mesure. Cette profondeur est déterminée à partir de la formule suivante :

$$\sigma' = \gamma' \cdot Z_{sim} = (\gamma' + i \cdot \gamma_w) \frac{l_e}{2} + \sigma'_i \quad (4)$$

d'où :

$$Z_{sim} = \left(1 + i \frac{\gamma_w}{\gamma'}\right) \frac{l_e}{2} + Z_{ci} + Z_{\sigma} \quad (5)$$

Avec :

γ' : poids volumique déjaugé,

i : gradient hydraulique,

Z_{sim} : profondeur simulée correspondant au gradient hydraulique imposé,

Z_{ci} : profondeur de la cellule d'injection,

Z_{σ} : profondeur correspondant à la surcharge appliquée en surface du massif,

l_e : longueur parcourue par l'écoulement, entre les cellules d'injection et de pompage,

σ'_i : contrainte effective du sol au niveau de la cellule d'injection.

On remarquera que pour :

$$i = 0, \quad Z_{sim} = Z_{essai}$$

Z_{essai} étant la profondeur de l'essai.

4

Étude expérimentale

4.1

Matériau utilisé

La matériau utilisé pour notre étude expérimentale est un sable quartzique qui provient de la carrière d'Hostun (Drôme). Les caractéristiques de la granulométrie de ce matériau sont les suivantes :

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

$$d_{10} = 0,21 \text{ mm}$$

$$d_{60}/d_{10} = 2$$

Les poids volumiques maximaux et minimaux sont :

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

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

Ce qui correspond, avec un poids spécifique de $25,97 \text{ kN/m}^3$ ($\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$) aux indices des vides suivants :

$$e_{max} = 0,961$$

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

4.2

Réalisation de l'essai

Les essais sont réalisés dans une cuve ayant les dimensions suivantes : longueur = 0,9 m, largeur = 0,6 m, profondeur = 1 m.

Une plaque en acier rigide de 1 cm d'épaisseur et de (0,89 m x 0,59 m) de dimensions est placée à la surface du sol. Au centre de la plaque, une ouverture circulaire de 8 cm de diamètre permet le passage des tubulures de connexions et de la sonde de mesure.

La plaque est surmontée par 4 vérins hydrauliques, supportant une charge maximale de 5 tonnes, et disposés uniformément sur des socles rigides, pour répartir uniformément la surcharge appliquée.

Avant de disposer la sonde au fond de la cuve, on procède à une circulation d'eau dans les tubulures du dispositif, afin d'évacuer les éventuelles bulles d'air, susceptibles de fausser les lectures.

La sonde est placée au centre de la cuve, on dispose alors le sol en trois couches successives de même hauteur. Chaque couche est compactée manuellement en utilisant un mouton de battage. On applique 100 coups avec une hauteur de chute de 15 cm. La hauteur finale du massif est de 70 cm.

Dès que la dernière couche est compactée, on installe délicatement la plaque métallique en surface du massif, et on sature le sol.

Une fois que la surcharge est appliquée en surface du massif, on amorce la pompe. Le robinet d'injection est ouvert. Le contrôle du débit d'eau injecté et de sa pression se fait manuellement grâce à ce robinet. L'eau est alors injectée dans le sol sous une charge et débit connus, à travers la cellule d'injection. Le système hydraulique fonctionnant en circuit fermé, l'eau est récupérée au niveau de la cellule de pompage, traverse le manomètre et le débitmètre de pompage où la pression et le débit sont enregistrés, et revient à la pompe.

On attend généralement quelques minutes jusqu'à ce qu'un régime d'écoulement contrôlé, à pressions et à débits constants, soit atteint et maintenu. On peut alors réaliser l'essai d'expansion de la sonde de mesure en suivant la méthodologie normale (Norme Française NF P94-110, 1991), préconisée pour l'essai pressiométrique à laquelle on ajoute un cycle de déchargement rechargement dans la partie pseudo-élastique du comportement pressiométrique.

Une fois l'essai réalisé, on assèche la cuve en évacuant l'eau par pompage, avant de la décharger pour réaliser un autre essai.

On a réalisé une série d'essais sous une même surcharge ($\sigma = 50 \text{ kPa}$), et pour un poids volumique du sol constant ($\gamma = 14,2 \text{ kN/m}^3$).

Allure générale des courbes d'expansion

Les courbes obtenues sont données pour différents gradients hydrauliques imposés (Fig. 3). Elles ne présentent pas de phases de recomptage, ce qui est normal pour des essais réalisés avec une sonde moulée dans le sol.

Ces courbes présentent une concavité monotone et ne semblent pas mettre en évidence l'existence d'une asymptote correspondant à une pression limite. On assimilera la pression limite conventionnelle à la pression de gonflement nécessaire pour le doublement du volume de la sonde.

L'interprétation des courbes géomécamétriques obtenues se fait en utilisant le logiciel de calcul « GAIAPRESS » qui utilise la méthode d'interprétation à partir de la théorie de l'équilibre élastoplastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre (Monnet et Khelif, 1994). L'interprétation se fait en utilisant la profondeur simulée correspondant au gradient hydraulique imposé lors de l'essai selon la formule 5. La détermination des modules élastiques du sol se fait à partir de cycles de déchargement - rechargement réalisés en début d'expansion ou au-delà des portions de courbes de déchargements réalisés en fin d'essais.

La détermination de l'angle de frottement interne (ϕ) se fait en utilisant la méthode développée par Monnet (1989). Cette méthode relie le logarithme de la déformée du forage, au logarithme de la pression appliquée au forage, au-delà de la pression de fluage. La pente de la droite ainsi obtenue prend la valeur α indiquée sur la formule ci-dessous :

$$\alpha = \frac{1+n}{1-N} \quad (6)$$

$$\text{Avec: } n = \frac{1 - \sin \Psi}{1 + \sin \Psi}$$

$$N = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

$$\Psi = \phi - \phi_{\mu}$$

Avec :

ϕ : angle de frottement interne,

ϕ_{μ} : angle de frottement intergranulaire,

Ψ : angle de dilataance.

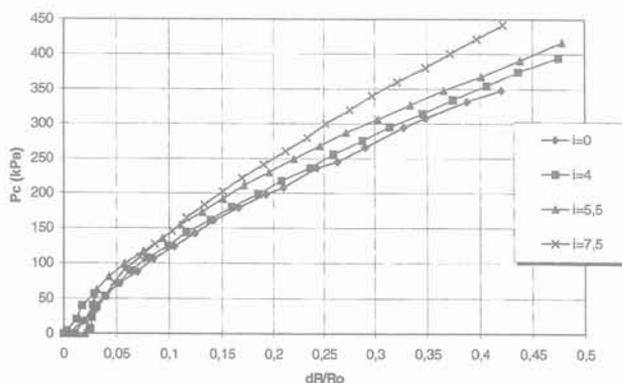


FIG. 3 Courbes d'expansion géomécamétriques ($\gamma = 14,2 \text{ kN/m}^3$, $\sigma = 50 \text{ kPa}$).
Expansion geomecametric curves ($\gamma = 14,2 \text{ kN/m}^3$, $\sigma = 50 \text{ kPa}$).

Le tableau I résume les résultats obtenus pour les essais réalisés dans la cuve soumise à une surcharge de 50 kPa.

Les angles de frottements ainsi déterminés ont été comparés à ceux obtenus lors de l'interprétation d'essais triaxiaux réalisés sur le sable d'Hostun au Laboratoire de Mécanique de Grenoble, à des poids volumiques identiques (Flavigny, 1993). Pour ces essais, les chercheurs ont trouvé un angle de frottement au triaxial de l'ordre de 35° . La différence de 5° entre les deux valeurs résulte de la différence entre les critères adoptés pour l'interprétation des essais triaxiaux (état en symétrie de révolution) et les essais géomécamétriques (état de déformation plane).

TABLEAU I Caractéristiques du sol déterminées avec « GAIAPRESS ».

Characteristics of the soil find by GAIAPRESS.

i	Z_{sim} (m)	P_{lim} (kPa)	E (kPa)	ϕ (deg)
0	1,8	340,8	11 466	40
4	2,2	357,8	11 405	39,6
5,25	2,3	385,6	11 225	39,8
7,25	2,5	430,5	11 890	41

5

Étude numérique

5.1

Logiciel d'hydraulique SEEP (1994)

Une étude numérique avec le logiciel en éléments finis SEEP a été réalisée pour modéliser l'évolution des contraintes lors des écoulements d'eau autour de la sonde de mesure.

SEEP est un logiciel d'éléments finis destiné à modéliser la circulation de l'eau au travers de matériaux poreux tels que les sols ou les roches. Il peut schématiser des milieux saturés ou non saturés.

Le problème est traité en régime permanent et en axisymétrie. La perméabilité est isotrope et le massif constitué de sol homogène.

Le maillage est constitué d'éléments quadrilatéraux. Il est serré à proximité de la paroi du forage et croit en s'éloignant de celle-ci (Fig. 4). Le logiciel donne, pour chaque point du massif, la charge hydraulique, la pression interstitielle, la vitesse d'écoulement et le gradient hydraulique. Il permet de visualiser graphiquement les courbes « isocharges » et les vecteurs vitesses dans tout le massif.

Le critère de convergence est défini à partir d'un nombre maximum d'itérations et d'un pourcentage de tolérance ; en deçà de ce pourcentage, la variation des valeurs calculées d'une itération à l'autre est considérée comme négligeable, le calcul s'arrête et donne les dernières valeurs calculées.

On a simulé un écoulement d'eau pour une sonde de mesure de 15 cm de longueur et 4 cm de diamètre, descendue à 0,8 m, 1 m et 1,5 m de profondeur. Les

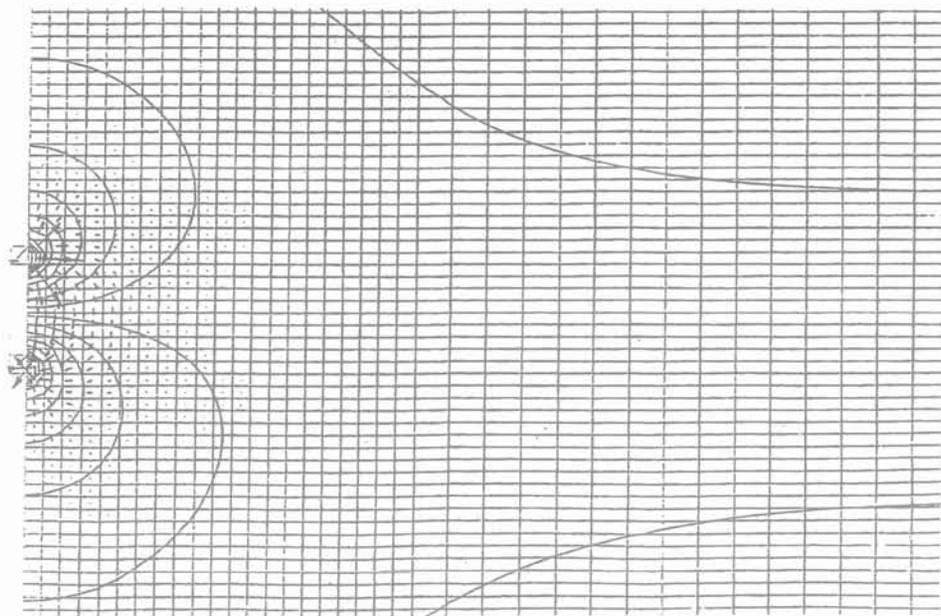


FIG. 4 Maillage avec SEEP et courbes isocharges hydrauliques.
The mesh used for SEEP and isohydraulic head curves.

essais sont réalisés dans du sable à béton ayant une perméabilité de $5,510^{-4}$ m/s et un poids volumique humide de $17,3$ kN/m³.

L'écoulement se fait en injectant des charges d'eau positives en amont, et en pompant avec des charges d'eau négatives en aval. Ces charges varient de 2 à 8 m de hauteur d'eau, symétriques et non symétriques, modélisant ainsi un éventail de possibilités d'exploitation de notre appareil.

On a utilisé les courbes d'isopressions, obtenues avec SEEP, pour représenter l'augmentation des contraintes le long du plan horizontal passant par le milieu de la sonde de mesure, avec les formules (2) et (3).

L'allure des courbes des augmentations de contraintes (provoquées) obtenues pour des charges symétriques est représentée sur la figure 5, et pour des charges non symétriques sur la figure 6.

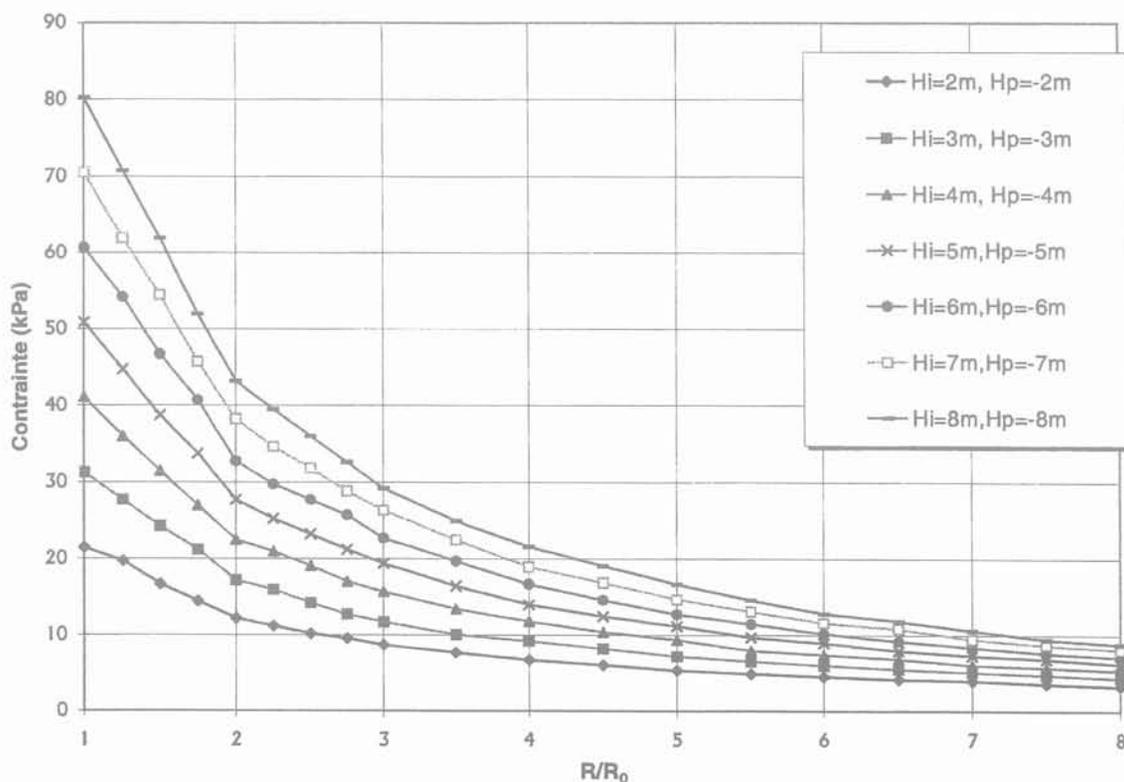


FIG. 5 Variation de la contrainte verticale pour des charges hydrauliques symétriques à 0,8 m de profondeur (point milieu de la sonde).
Variation of the vertical stress for the symmetrical hydraulic heads at 0.8 m of deep.

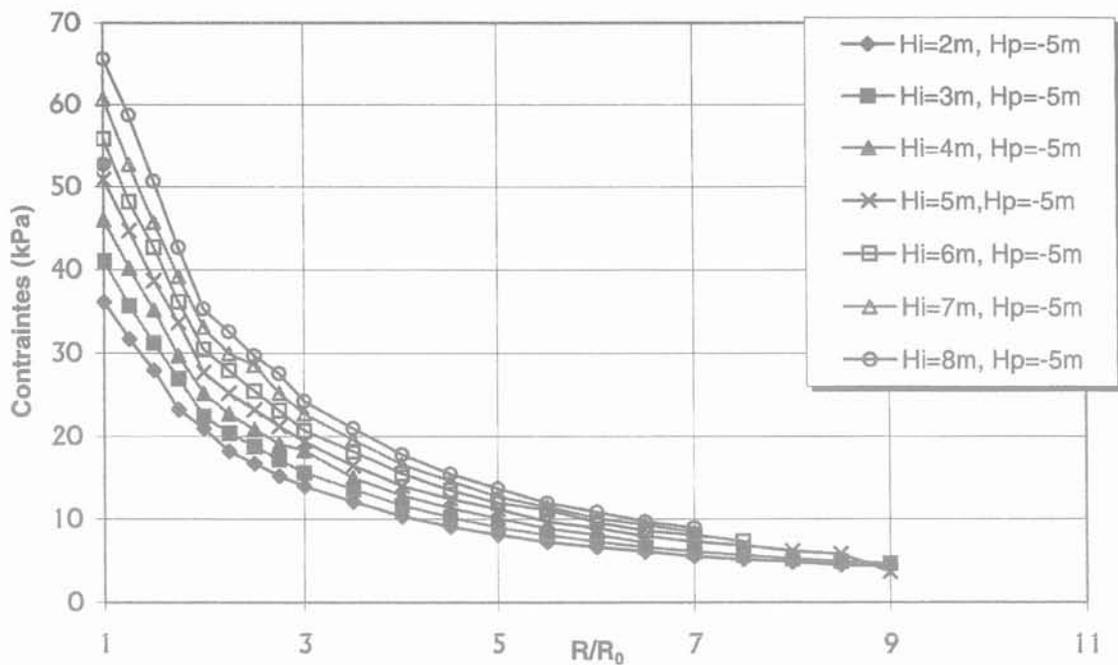


FIG. 6 Variation de la contrainte verticale pour des charges hydrauliques non symétriques à 0,8 m de profondeur (point milieu de la sonde).
Variation of the vertical stress for the non symmetrical hydraulic heads at 0.8 m of deep.

Le tableau II regroupe l'ensemble des résultats en terme de contrainte verticale provoquée en fonction de la perte de charge imposée. On les a comparés à l'augmentation de contrainte correspondant à la relation 6.

A partir des courbes des isocharges obtenues et de leur interprétation, on a conclu que :

- l'augmentation des contraintes verticales est assez significative sur une distance égale au moins à une fois le rayon de la sonde, à partir de la paroi du forage (soit $R/R_0 = 2$). C'est pratiquement la distance sur laquelle pourrait se produire un cisaillement dans les plans $r - \theta$ ou $z - \theta$;

- l'augmentation de la contrainte verticale est liée à la différence entre la charge d'injection et celle de pompage, et non pas à la valeur nominale de l'une ou l'autre charge ;

- l'augmentation de la contrainte verticale sur la distance d'une fois le rayon est en moyenne égale à 0,8 fois la contrainte verticale hydraulique imposée, ce qui correspond à une contrainte verticale simulée donnée par la formule 6 :

$$\sigma' = \gamma' \cdot Z_{sim} = (\gamma' + 0,8 \cdot i \cdot \gamma_w) \frac{L_e}{2} + \sigma'_i \quad (6)$$

5.2

Logiciel PLAXIS (1995)

On a abordé avec le logiciel en éléments finis PLAXIS l'influence des caractéristiques du sol, et leur choix dans la simulation numérique. On a étudié l'incidence des conditions aux limites, et on a analysé l'influence de l'élanement de la sonde sur les résultats des essais.

Le programme traite les problèmes aux limites bidimensionnels hydromécaniques couplés d'un milieu continu, soumis aux chargements du type déplacements imposés, contraintes imposées, etc. Il fonctionne en axisymétrie ou en déformation plane. Nous n'utili-

TABLEAU II Comparaison des augmentations de contrainte verticale obtenues avec SEEP et analytiquement.

Comparison of the augmentation of the vertical stress compute by SEEP and by the analysis.

H_i (m)	H_p	$\Delta\sigma_{Seep}$ (kPa)	$\Delta\sigma_{(6)}$ (kPa)
2	-2	16	16
3	-3	25	24
2	-5	28	28
4	-4	32	32
3	-5	32	32
4	-5	35	36
5	-5	38	40
6	-5	43	44
7	-5	46	48
6	-6	47	48
8	-5	51	52
7	-7	55	56
8	-8	62	64

sons pas le couplage hydraulique puisque Plaxis ne prend pas en compte les charges négatives.

Plaxis utilise des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds, ces derniers prédisent avec une meilleure précision les charges limites classiques typiques en mécanique des sols.

La méthode d'intégration spatiale est celle de Gauss, utilisant 12 points d'intégration en déformation plane et 16 points en axisymétrie.

Le comportement du sol, lors de nos simulations, est décrit à l'aide d'un modèle élastoplastique de type Mohr Coulomb à écoulement plastique non associé, défini par sa fonction de charge :

$$F(\sigma) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi - C\cos\varphi \quad (7)$$

et son potentiel plastique :

$$G(\sigma) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\Psi \quad (8)$$

Avec :

φ : angle de frottement interne,

Ψ : angle de dilatance,

C : cohésion intergranulaire,

σ_1 et σ_3 sont respectivement les contraintes principales majeure et mineure.

5.3

Modélisation de l'essai

On a discrétisé la demi-cuve suivant le maillage représenté sur la figure 7. Le massif a été décomposé en trois blocs, les deux premiers présentant un maillage très serré, surtout à proximité de l'emplacement de la sonde de mesure.

Le maillage est composé de 180 éléments triangulaires à 15 nœuds, et au total de 1 525 nœuds. On portera une attention particulière au nœud 10, nœud d'intersection de la membrane du géomécamètre et du plan horizontal passant par le milieu de la sonde. A ce niveau, les contraintes et les déplacements sont les plus importants.

La sonde est disposée au fond de la cuve, et le massif est soumis à une surcharge verticale de 50 kPa appliquée en surface.

Vu les dimensions de la cuve d'essai, on suppose que la transmission de cette surcharge dans le sol est de l'ordre de la moitié de celle appliquée en surface,

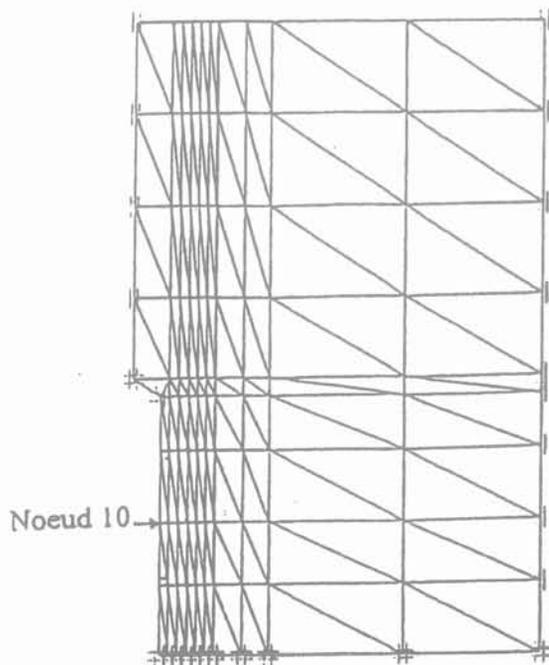


FIG. 7 Conditions aux limites en déplacements. The limit conditions for displacements.

conformément aux travaux réalisés par des chercheurs au Laboratoire de Mécanique de Grenoble, dans des cuves de dimensions similaires (Renoud-Lias, 1978 et Fawaz, 1993).

Lors des modélisations, on applique une surcharge en surface de 25 kPa, à laquelle on ajoute une surcharge équivalente à la contrainte générée par l'écoulement hydraulique autour de la sonde de mesure.

Les conditions aux limites en déplacements sont représentées sur la figure 7. Les déplacements sont bloqués dans les deux sens pour les nœuds représentant le fond de la cuve et la partie supérieure en aluminium de la sonde. Des déplacements verticaux sont tolérés au niveau des nœuds représentant la paroi de la cuve et l'axe de symétrie. Tous les autres nœuds peuvent se mouvoir librement.

Les conditions aux limites en contraintes sont représentées sur la figure 8. En surface, un premier système de contraintes A représente la surcharge verticale appliquée au surface du massif. Un second système B représente la pression appliquée au niveau de la sonde de mesure.

Les deux systèmes de contraintes sont uniformes et indépendants.

L'axe de la sonde est un axe de révolution, le problème va être traité en axisymétrie.

5.4

Étude de la sensibilité du modèle

L'étude de la sensibilité du modèle par rapport à chacun des paramètres qui le régissent est fort utile dans leur choix pour la modélisation.

Le comportement du sol est modélisé par un critère élastoplastique de type Mohr Coulomb à écoulement plastique non associé. En plus de la masse volumique

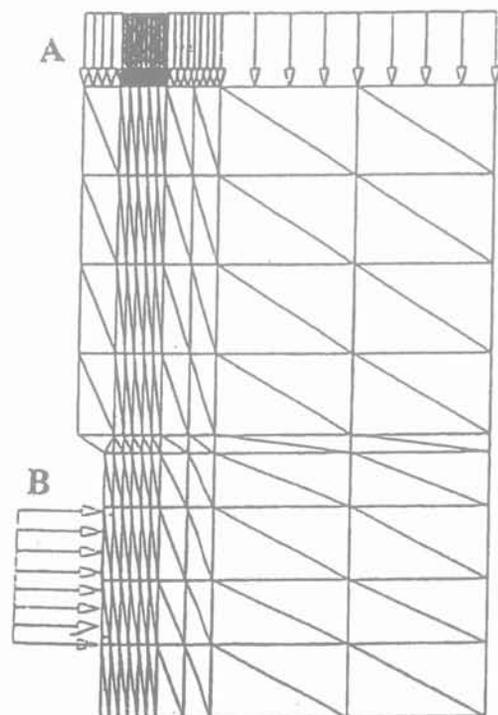


FIG. 8 Conditions aux limites en contraintes. The limit conditions for stresses.

moyenne initiale du sable (γ), six autres paramètres régissent ce modèle : le coefficient des terres au repos (K_0), le module de Young (E), le coefficient de Poisson (ν), l'angle de frottement interne (ϕ), l'angle de dilata-
 tance (ψ) et la cohésion du sol (C). Pour le cas du sable d'Hostun, la cohésion est nulle. Il ne reste à étudier que la sensibilité par rapport à cinq paramètres.

Pour étudier la sensibilité du modèle éléments finis, on effectue pour chaque paramètre des simulations numériques, en faisant varier sa valeur, tout en gardant les autres paramètres fixes.

Comme essai de référence, on a choisi l'essai soumis au gradient hydraulique $i = 4$ (noté Essai Cu.4). Cet essai présente un cycle de déchargement recharge-
 ment réalisé en début de la courbe d'expansion et un déchargement en fin d'essai (Fig. 3).

Les caractéristiques obtenues à partir de l'interprétation théorique avec le logiciel de calculs « Gaiapress », sont résumées sur le tableau III.

TABLEAU III Caractéristiques mécaniques du sol obtenues avec « GAIAPRESS » pour l'essai avec $i = 4$.
 Mechanical characteristics obtained by GAIAPRESS with $i = 4$.

E_I	(kPa)	3 402
E_{DR}	(kPa)	10 107,8
ϕ_{DR}	(degré)	39,8
E_F	(kPa)	11 405
ϕ_F	(degré)	39,6

Avec :

E_I : module élastique initial,

E_{DR} : module élastique obtenu sur le cycle de déchargement recharge-
 ment réalisé en début d'essai,

ϕ_{DR} : angle de frottement pour E_{DR} ,

E_F : module élastique obtenu sur la courbe décharge-
 ment en fin d'essai,

ϕ_F : angle de frottement pour E_F .

Pour les simulations on a pris comme référence le jeu de paramètres suivant :

- poids volumique sec du sol : $\gamma' = 14,2 \text{ kN/m}^3$,
- poids volumique saturé du sol : $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$,
- coefficient de Poisson : $\nu = 0,3$,
- angle de frottement interne : $\phi = 40^\circ$,
- angle de dilata-
 tance : $\psi = \phi - 30^\circ = 10^\circ$,
- coefficient des terres au repos : $K_0 = 1 - \sin\phi = 0,35$,
- module élastique initial en début d'expansion : $E_0 = 3500 \text{ kPa}$,
- module élastique du cycle de déchargement recharge-
 ment, et de déchargement en fin d'essai : $E = 10\,000 \text{ kPa}$.

5.4.1

Influence du module élastique initial

Tout en gardant les autres paramètres constants, on fait varier le module élastique initial E_0 entre 3 000 et 8 000 kPa. Pour chacune de ses simulations, on a réalisé un cycle de déchargement recharge-
 ment en début d'expansion, avec un module élastique $E = 10\,000 \text{ kPa}$.

La figure 9 résume les résultats obtenus avec Plaxis. Elle représente les déplacements horizontaux obtenus pour le nœud 10, en fonction de la variation du module élastique initial. Les déplacements du nœud diminuent proportionnellement à l'augmentation du module élastique initial E_0 du sol. Le module de Young influence l'ensemble du domaine des déformations, on constate une différence entre les courbes simulées dès le début du chargement.

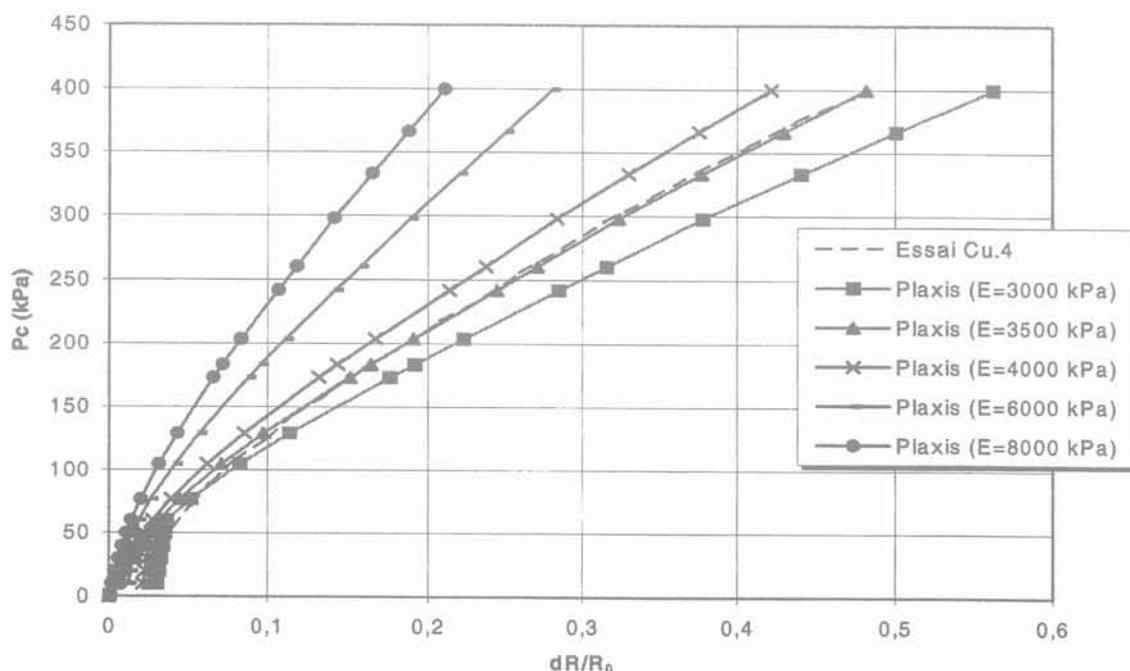


FIG. 9 Influence du Module élastique initial E_0 .
 Influence of the initial elastic modulus E_0 .

La courbe correspondant au module élastique $E_0 = 3500$ kPa présente une très bonne concordance avec notre courbe expérimentale (Essai Cu.4). Cette valeur sera retenue comme valeur de référence pour les autres simulations numériques.

5.4.2

Influence de l'angle de frottement et de l'angle de dilatance

On a étudié l'interaction de ces deux paramètres et leur degré d'influence sur la simulation numérique. On garde en un premier temps l'angle de dilatance constant ($\psi = 10^\circ$) et on fait varier l'angle de frottement interne ϕ . La figure 10 représente les déplacements horizontaux obtenus avec Plaxis pour le nœud 10.

On a réalisé une série de simulations en considérant 4 valeurs différentes de l'angle de frottement ($\phi = 38^\circ, 40^\circ, 42^\circ$ et 44°) et en faisant varier l'angle de dilatance ψ pour chacun de ces cas. Les figures 11, 12 et 13 représentent les déplacements du nœud 10 en fonction de la variation de ces deux paramètres.

Les déplacements du nœud 10 diminuent proportionnellement à l'augmentation de l'angle de frottement et de l'angle de dilatance, plus leurs valeurs sont importantes et plus les déplacements diminuent.

Ses deux paramètres agissent simultanément sur le modèle et sont inversement proportionnels si on compare leurs influences vis-à-vis de la courbe expérimentale. On remarque une bonne concordance de cette dernière pour les couples de valeurs ($\phi = 38^\circ, \psi = 12^\circ$), ($\phi = 40^\circ, \psi = 10^\circ$), et ($\phi = 42^\circ, \psi = 8^\circ$). Le modèle est très sensible à la variation de ces deux paramètres à partir de 10 % des déformations.

Il existe donc plusieurs solutions en termes de ϕ et ψ au problème de l'analyse inverse des caractéristiques du sol à partir de l'essai pressiométrique. C'est la relation ($\psi = \phi - \phi_\mu$) qui enlève l'ambiguïté.

On retiendra pour les simulations le couple de valeurs ($\phi = 40^\circ, \psi = 10^\circ$) qui correspondent à la formulation usuelle $\phi = \psi + 30^\circ$, et qui sont en concordance avec la valeur de l'angle de frottement qu'on a déterminé avec le logiciel de calculs Gaiapress.

5.4.3

Influence du coefficient des terres au repos K_0

On a fait varier K_0 entre 0,2 et 0,5 pour visualiser son influence sur la modélisation, tout en maintenant les autres paramètres constants. La figure 14 représente les courbes des déplacements horizontaux au nœud 10 en fonction de cette variation.

Les déplacements du nœud 10 diminuent proportionnellement à l'augmentation du coefficient des terres au repos. Le rapport K_0 permet de déterminer les contraintes initiales dans le massif. Son incidence ne semble pas trop significative sur le modèle étudié, ceci est dû essentiellement à la faible profondeur de l'essai et aux faibles contraintes mobilisées. Dans le cas où l'essai pressiométrique serait soumis à de fortes contraintes, le modèle devient sensible à la variation de ce paramètre. Il faudra par conséquent accorder une attention particulière à son choix ou à sa détermination.

La meilleure concordance entre l'essai expérimental et les simulations avec Plaxis est pour $K_0 = 0,35$. Cette valeur correspond à celle déterminée à partir de la formule usuelle proposée par Jaky, pour les sols pulvérulents ($K_0 = 1 - \sin\phi$), avec $\phi = 40^\circ$.

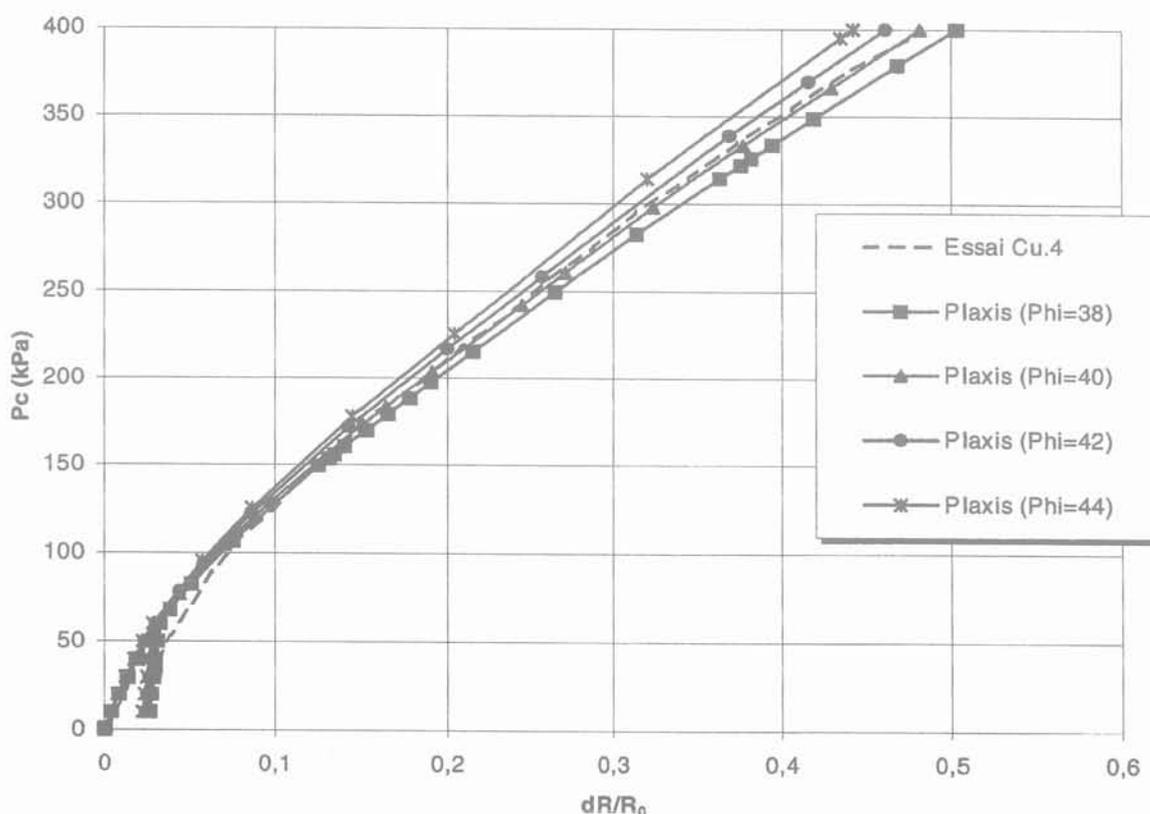


FIG. 10 Influence de l'angle de frottement ϕ avec $\psi = 10^\circ$.
Influence of the friction angle ϕ with $\psi = 10^\circ$.

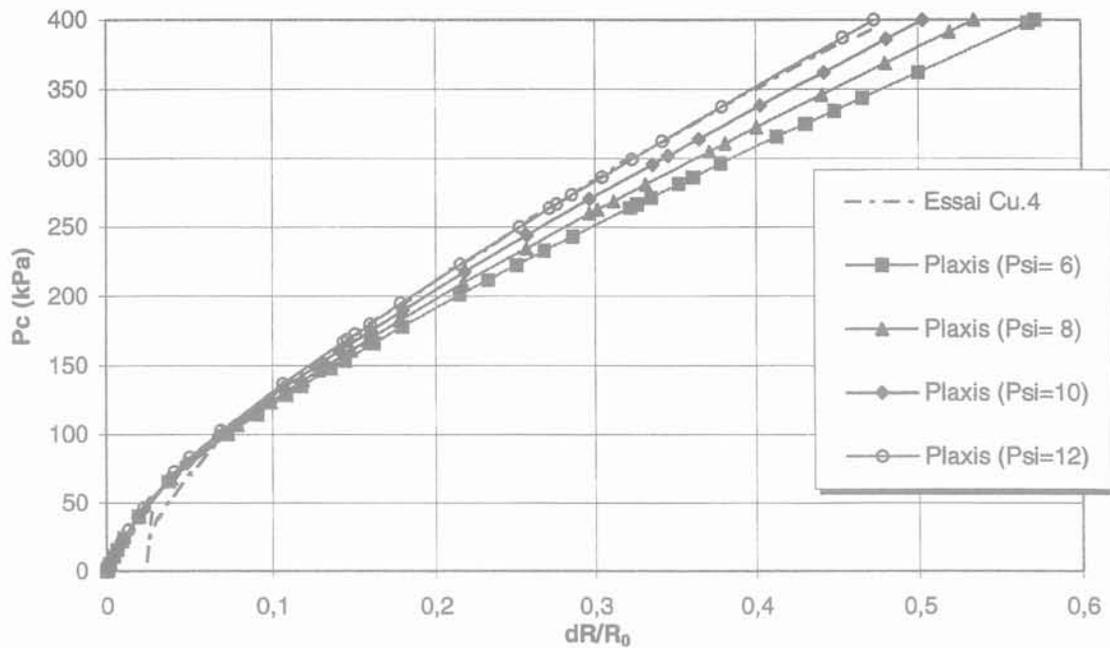


FIG. 11 Influence de l'angle de dilatance ψ pour $\phi = 38^\circ$.
Influence of the dilatancy angle ψ with $\phi = 38^\circ$.

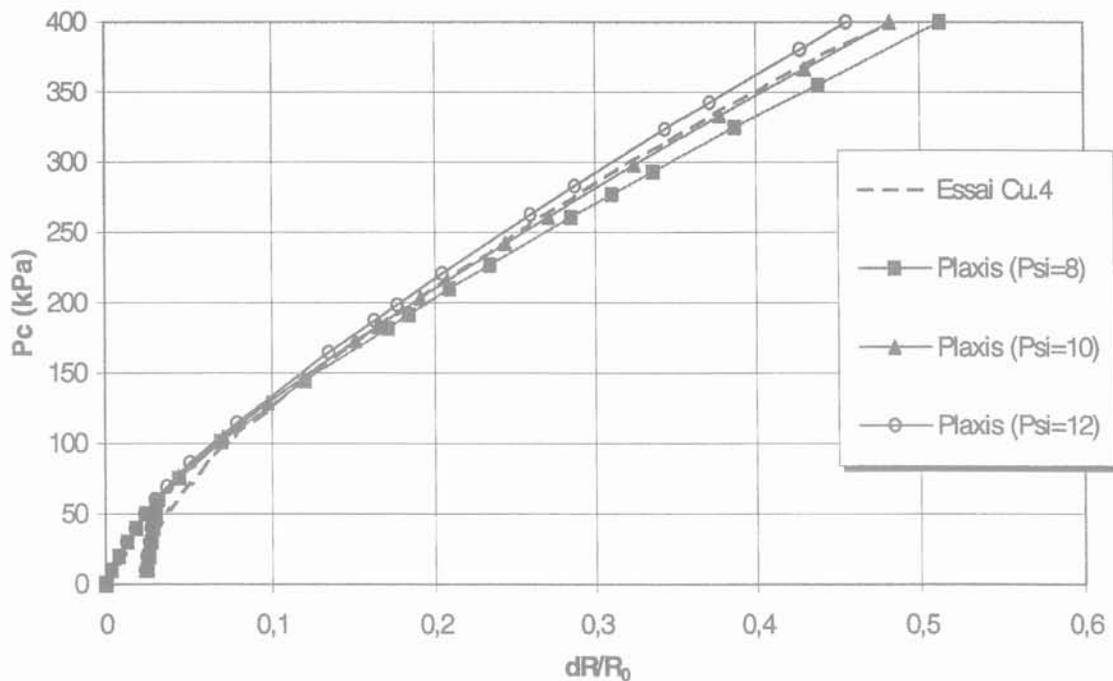


FIG. 12 Influence de l'angle de dilatance ψ pour $\phi = 40^\circ$.
Influence of the dilatancy angle ψ with $\phi = 40^\circ$.

5.4.4

Influence du coefficient de Poisson

Pour la modélisation, on fait varier ce paramètre de 0,3 à 0,5. La figure 15 représente les déplacements du nœud 10 en fonction de cette variation. La variation du paramètre (ν) n'a pas d'effets importants sur la simulation, ce qui rend difficile sa détermination. On pourra donc le fixer à la valeur moyenne usuellement considérée ($\nu = 0,3$).

En conclusion, on peut dire que le modèle numérique est sensible à la variation du module élastique initiale E_0 plus particulièrement. Il faudra veiller à son choix et à sa détermination. Les angles de frottement et de dilatance influent sur le modèle individuellement ou simultanément. L'incidence du coefficient des terres au repos se manifeste pour des essais soumis à des contraintes importantes. Le coefficient de Poisson ne semble pas présenter un caractère déterminant dans les paramètres qui régissent le modèle.

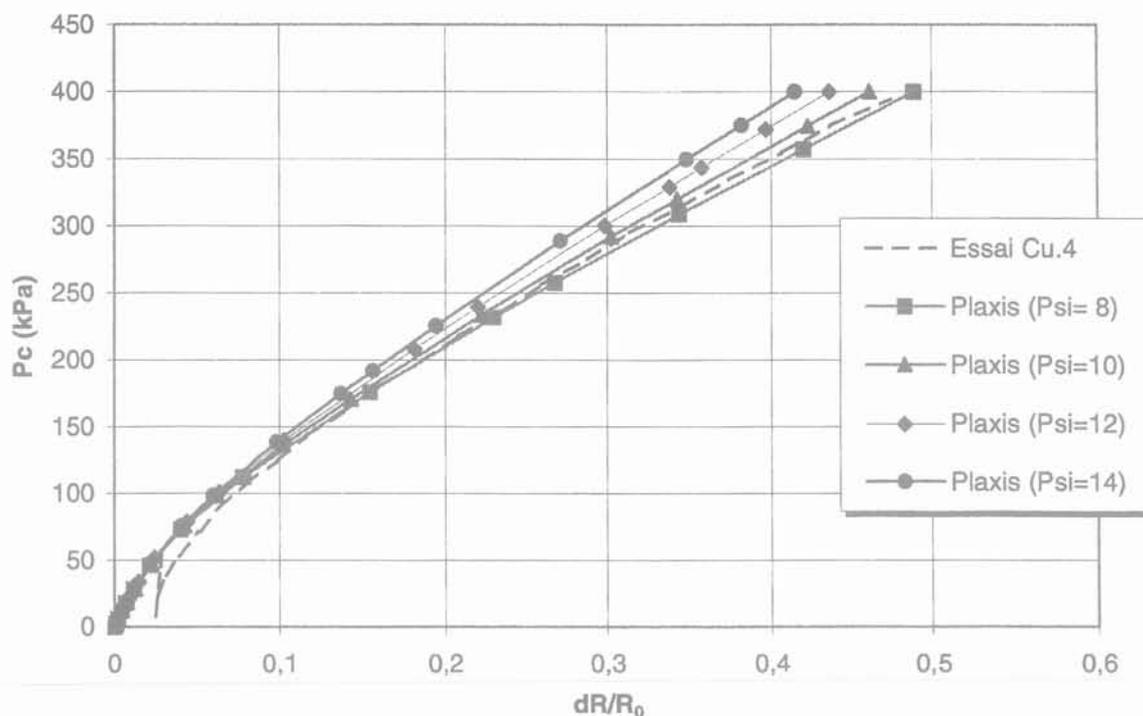


FIG. 13 Influence de l'angle de dilatance ψ pour $\phi = 42^\circ$.
Influence of the dilatancy angle ψ with $\phi = 42^\circ$.

Influence of the dilatancy angle ψ with $\phi = 42^\circ$

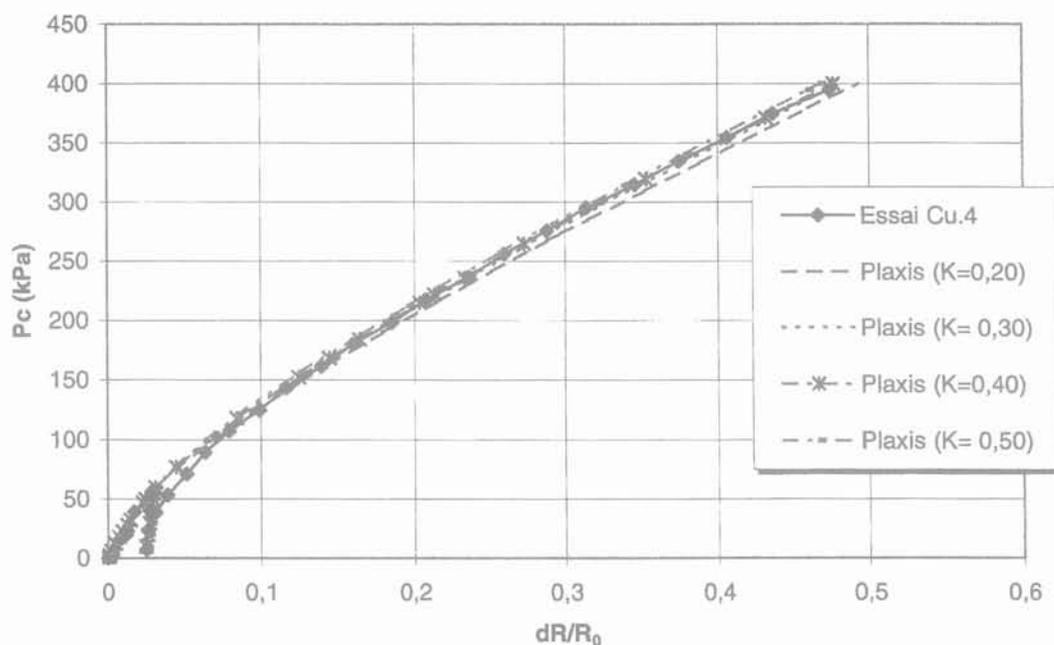


FIG. 14 Influence du coefficient des terres au repos.
Influence of the coefficient of earth pressure at rest.

5.5

Étude des conditions expérimentales

On étudie l'influence des conditions d'essais sur les résultats obtenus. On analyse l'influence des dimensions de la cuve d'essais, et de l'élançement de la sonde.

5.5.1

Influence des dimensions de la cuve d'essai

Les dimensions limitées de notre cuve d'essais influent sur nos résultats expérimentaux. Le choix d'un tel dispositif expérimental est régi essentiellement par des raisons de commodité et de pratique, car il permet de réaliser un bon nombre d'essais et utilise une quantité de sol raisonnable.

Influence des parois

La cuve utilisée est de forme parallélépipédique, l'axe de la sonde placée au centre, est à 30 cm en largeur et 45 cm en longueur des parois de la cuve. Les modélisations ont été effectuées en considérant la plus grande dimension de la cuve ($L = 45$ cm).

Les figures 16 et 17 représentent, respectivement, les courbes des déplacements horizontaux et verticaux

obtenus pour le nœud 10 en considérant les deux cas de figures des dimensions aux parois.

Les déplacements horizontaux du nœud 10 sont plus faibles pour le cas où son axe serait à 30 cm des parois. Cette diminution est inverse en ce qui concerne les déplacements verticaux du même nœud. Tout porte à croire que la proximité de la paroi de la cuve mobilise plus de frottements qui se traduisent par une diminution des déplacements horizontaux du nœud et une augmentation de ces déplacements verticaux (soulèvement).

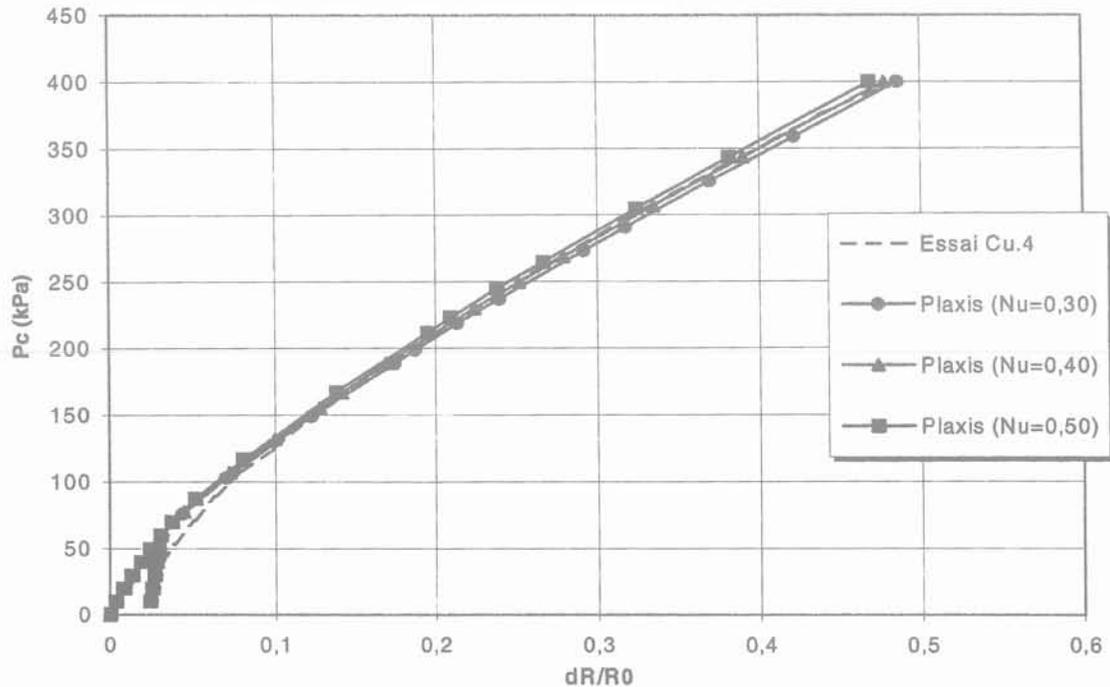


FIG. 15 Influence du coefficient de Poisson.
Influence of the Poisson's ratio.

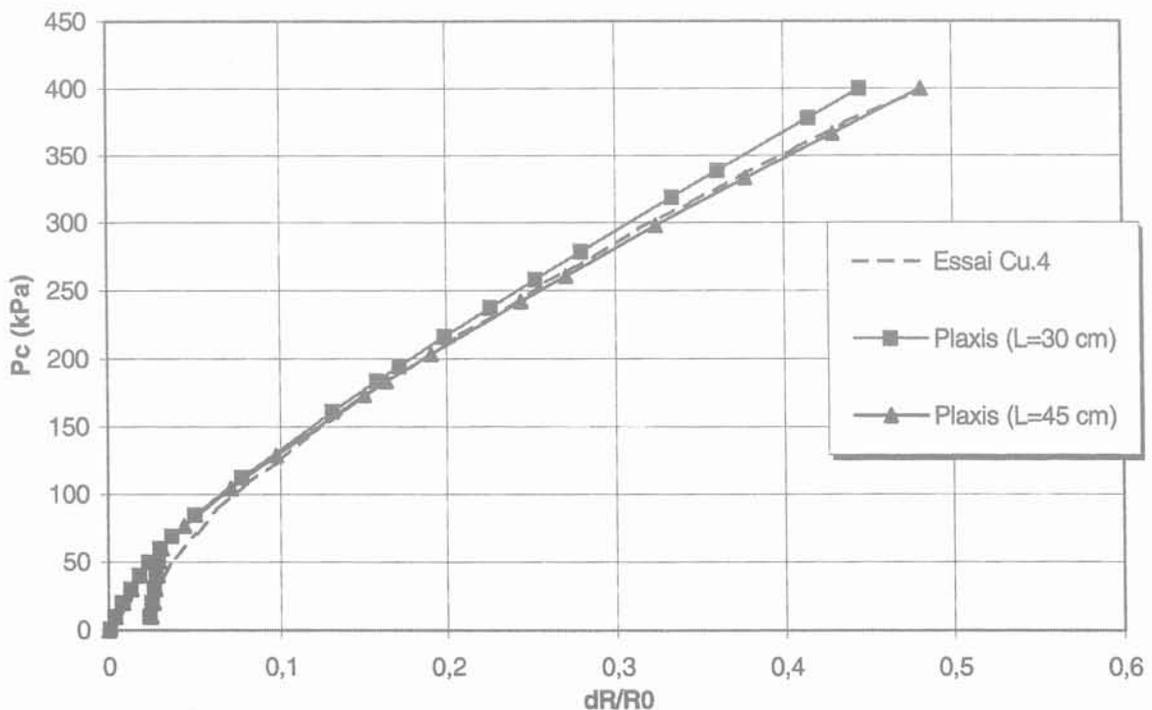


FIG. 16 Influence des parois - déplacement horizontal du nœud 10.
Influence of the walls of the tank on the horizontal displacement of node 10.

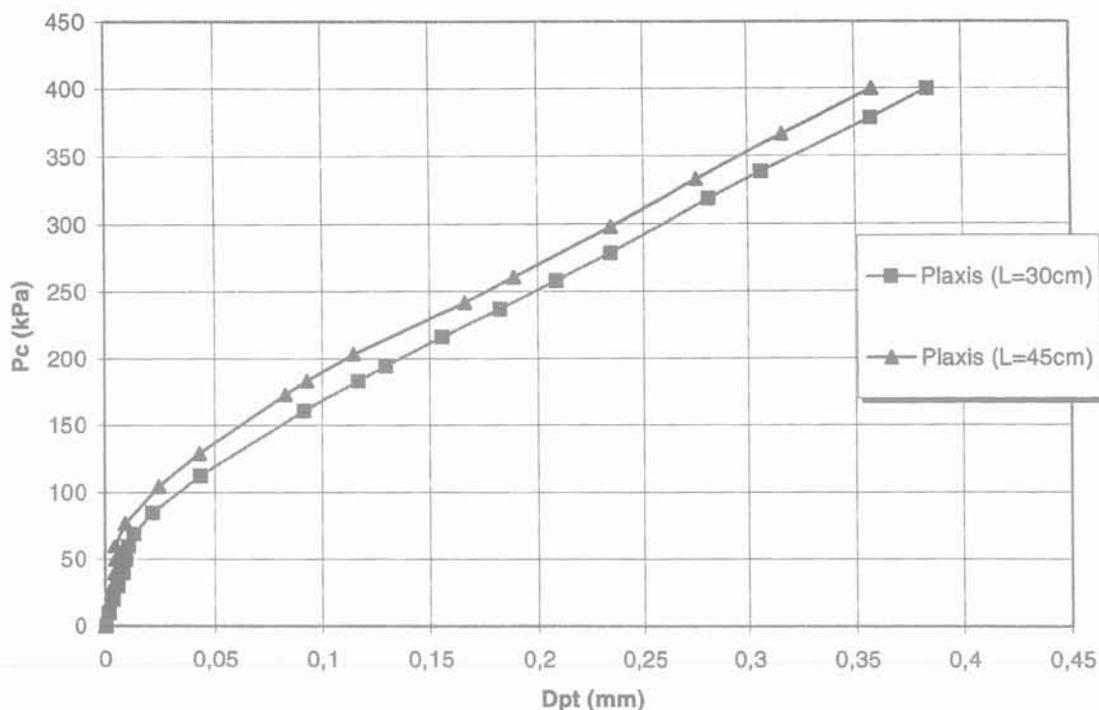


FIG. 17 Influence des parois – déplacement vertical du nœud 10.
Influence of the walls of the tank on the vertical displacement of node 10.

5.5.1.2

Influence de la proximité du fond de la cuve

Lors des essais, la sonde est posée au fond de la cuve. La profondeur d'essai est à 15 cm au-dessus de ce niveau. Pour visualiser l'influence de la proximité du fond de la cuve par rapport à la profondeur d'essai, on a simulé un essai réalisé à mi-hauteur dans un massif de sol de 1,1 m de hauteur (Fig. 18).

Les déplacements horizontaux du nœud 10 sont représentés sur la figure 19 pour les deux cas de figures du maillage utilisé. Les déplacements du nœud sont plus importants pour le cas où le fond de cuve est éloigné du plan passant par le milieu de la sonde. Cette différence est visible dès le début de la courbe d'expansion ($dR/R_0 = 5\%$). Ceci traduit le fait de la forte mobilisation des frottements due à la proximité du fond (supposé indéformable) lors de la réalisation des essais.

En conclusion, on peut dire que les dimensions petites de la cuve influent sur le mode d'expansion de la sonde. La proximité des parois et du fond de la cuve par rapport à la sonde d'essai mobilise des frottements sol parois et sol fond de cuve qui s'opposent à l'expansion de la membrane de mesure lors de la réalisation des essais. Les déplacements sont alors diminués.

5.5.2

Influence de l'élanement de la sonde

La sonde de mesure a une longueur de 15 cm et un diamètre de 6 cm ce qui correspond à un élanement de $L/D = 2,5$. On étudie l'influence de l'élanement de la sonde sur les résultats obtenus en considérant le maillage représenté sur la figure 1. On suppose les mêmes conditions aux limites de contraintes et de déplacements, et on fait varier la longueur représentant la sonde de mesure, portion sur laquelle agit le système de contraintes B représentant la pression appliquée sur la sonde de mesure.

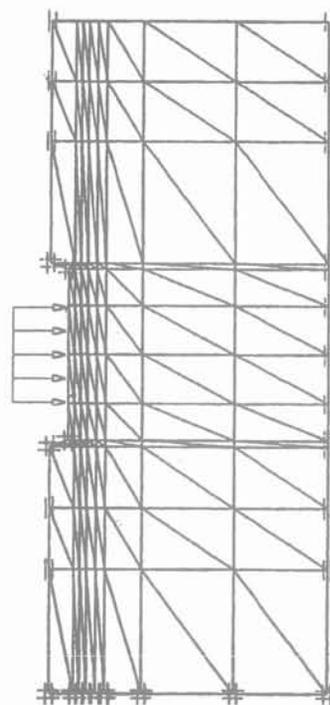


FIG. 18 Maillage représentant un fond de cuve distant.
Mesh representing a distant bottom tank.

On utilise trois élanements différents $E = 1,5$ ($L = 9$ cm, $D = 6$ cm), $E = 2,5$ ($L = 15$ cm, $D = 6$ cm) et $E = 3,5$ ($L = 21$ cm, $D = 6$ cm). La figure 20 représente les déplacements du nœud 10 en fonction de la variation de l'élanement de la sonde.

Les déplacements du nœud augmentent en fonction de l'accroissement de l'élanement de la sonde. Plus la longueur d'application de la pression est importante, plus les déplacements mobilisés sont importants.

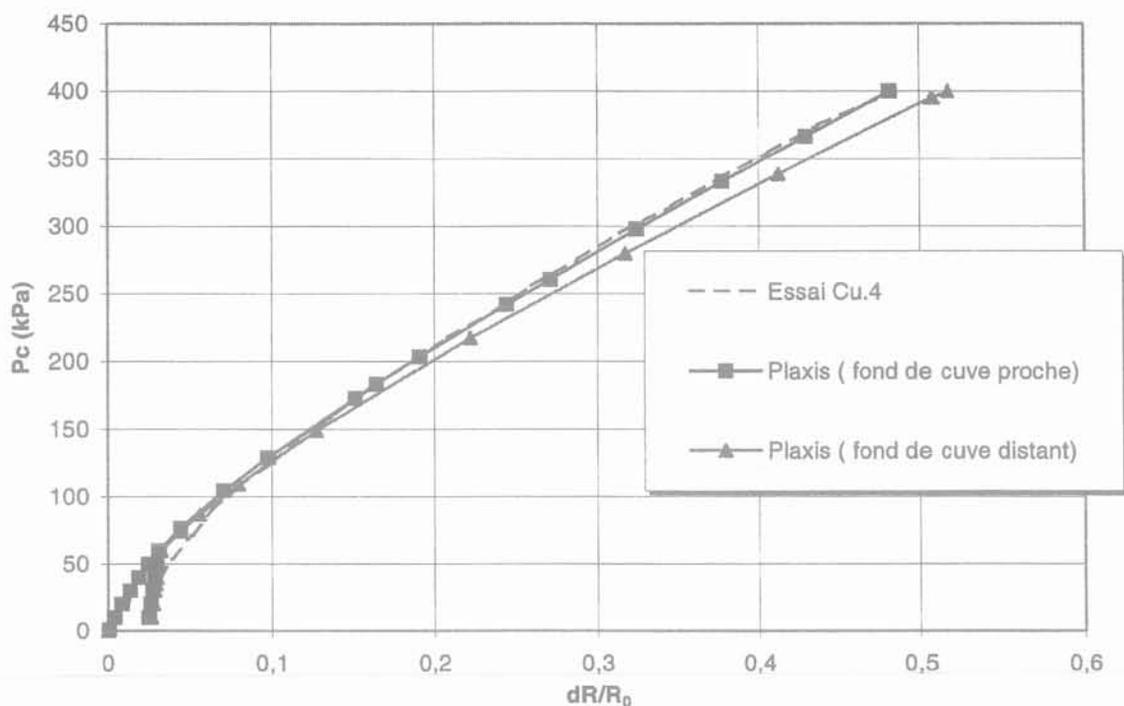


FIG. 19 Influence de la proximité du fond de la cuve.
Influence of the distance at the bottom of the tank.

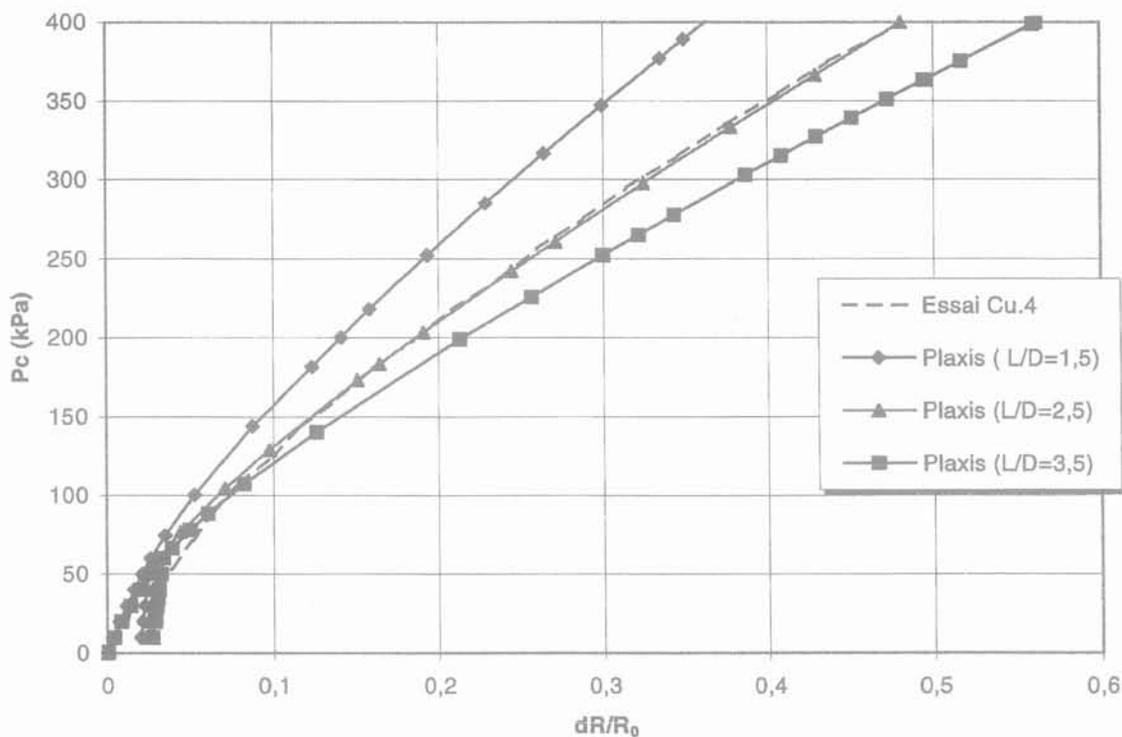


FIG. 20 Influence de l'élanement de la sonde.
Influence of the length of the probe.

6

Répétabilité de la modélisation numérique

Pour valider l'hypothèse prise sur l'augmentation des contraintes due à l'écoulement hydraulique autour de la sonde de mesure, on a simulé tous les essais de la série

en représentant la contrainte verticale provoquée expérimentalement grâce au gradient hydraulique par une surcharge imposée en surface du massif (Fig. 21, 22 et 23).

Les courbes numériques obtenues avec Plaxis sont en bonne concordance avec celles obtenues expérimentalement.

On en conclut que si les essais sont réalisés dans les mêmes conditions, la variation des gradients hydrau-

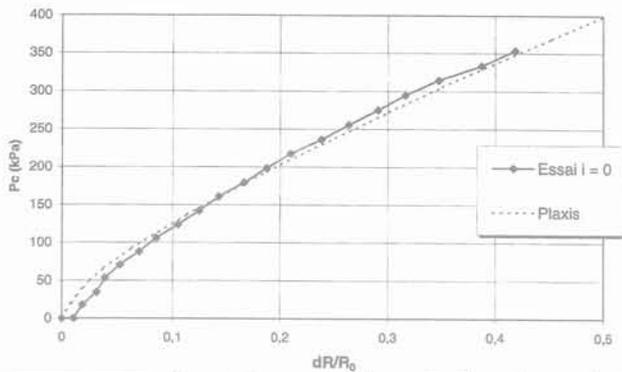


FIG. 21 Simulation numérique de l'essai avec $i = 0$ ($\gamma = 14,2 \text{ kN/m}^3$, $\sigma = 50 \text{ kPa}$).
Numerical simulation of the test with $i = 0$ ($\gamma = 14.2 \text{ kN/m}^3$, $\sigma = 50 \text{ kPa}$).

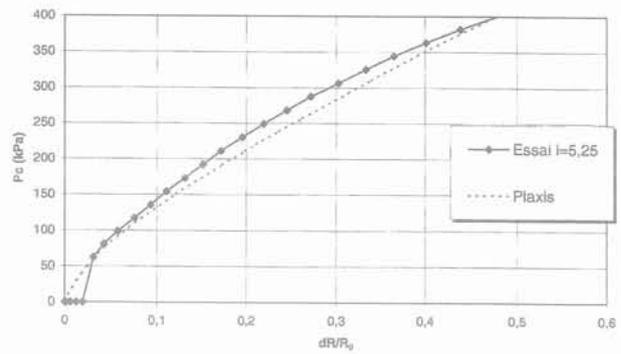


FIG. 22 Simulation numérique de l'essai $i = 5,25$ ($\gamma = 14,2 \text{ kN/m}^3$, $\sigma = 50 \text{ kPa}$).
Numerical simulation of the test with $i = 5.25$ ($\gamma = 14.2 \text{ kN/m}^3$, $\sigma = 50 \text{ kPa}$).

liques imposés correspond à une variation provoquée de la contrainte verticale au niveau de l'essai, et par conséquent à une augmentation provoquée de la profondeur de l'essai. C'est le but recherché lors de la réalisation du nouvel appareil d'essai *in situ*.

7

Conclusion de l'étude numérique

L'étude numérique avec SEEP nous a permis de visualiser le mode de variation des contraintes générées grâce à l'écoulement hydraulique autour de la sonde de mesure.

L'étude numérique avec PLAXIS a été menée avec l'hypothèse que la variation des gradients hydrauliques autour de la sonde de mesure correspond à une augmentation provoquée de la contrainte verticale à son niveau, et par conséquent à une augmentation provoquée de la profondeur de l'essai.

Cette étude nous a permis de définir le degré d'influence des différents paramètres qui régissent le modèle. Le module élastique initial (E_0), les angles de frottement (φ) et de dilatance (ψ), et le coefficient des terres au repos (k_0) sont autant de caractéristiques du sol auxquelles il faudra porter une attention particulière lors de leurs choix pour les intégrer dans les modèles numériques.

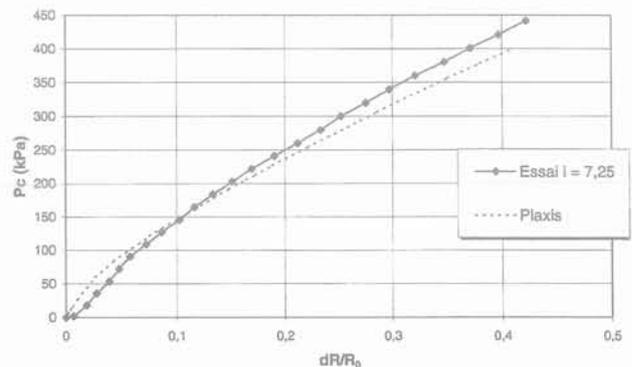


FIG. 23 Simulation numérique de l'essai avec $i = 7,25$ ($\gamma = 14,2 \text{ kN/m}^3$, $\sigma = 50 \text{ kPa}$).
Numerical simulation of the test with $i = 7.25$ ($\gamma = 14.2 \text{ kN/m}^3$, $\sigma = 50 \text{ kPa}$).

On a aussi étudié l'influence des conditions d'essais. Les dimensions réduites de la cuve sont bien pratiqués pour mener une étude expérimentale, mais influent sur les résultats obtenus. Les conditions idéales pour la modélisation seraient des essais réalisés *in situ* sans aucune contrainte sur les dimensions du massif.

L'élanement de la sonde d'essai est une caractéristique prépondérante lors de notre étude numérique. La sonde de mesure définitive de l'appareil aura les mêmes dimensions que les sondes de mesure des pressiomètres usuels, ce qui permettra d'obtenir des augmentations de contraintes significatives pour les pressions d'eau circulant autour de la sonde.

Bibliographie

- Baguelin F., Jezequel J.F., Shields D.H. – « The pressuremeter and foundation engineering ». Series on rock and soil mechanics, vol. 2 (1974/1977) n° 4, Trans Tech Publications, 1978.
- Cambou B., Bahar R. « L'utilisation de l'essai pressiométrique pour l'identification de paramètres intrinsèques du comportement d'un sol ». *Revue française de géotechnique*, janvier 1993, p. 39-50.
- Flavigny E. – « Compilation des essais triaxiaux de révolution sur le sable d'Hostun RF ». Rapport interne, Institut de Mécanique de Grenoble, 1993.
- Hughes J.M.O., Wroth C.P., Windle D. – « Pressuremeter tests in sand ». *Geotechnique* 27, n° 4, 1977, p. 455-477.
- Monnet J. – « Étude théorique de l'équilibre élastoplastique autour du pressiomètre dans un sol non cohérent ». Troisièmes entretiens Jacques Cartier, Lyon, 5-9 décembre 1989.
- Monnet J., Khlif J. – « Étude théorique de l'équilibre élastoplastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre ». *Revue française de géotechnique*, n° 67, 1994, p. 3-12.
- Norme Française NF P94-110 – Essai pressiométrique Ménard, AFNOR, 1991.
- PLAXIS – Manuel d'utilisation version 6.1. Delft University of Technology, Hollande, 1995.
- Senouci M. – « Étude et réalisation d'un nouvel appareil d'essais *in situ* : le Géomécamètre ». Thèse de l'Université Joseph-Fourier, septembre 1998.
- SEEP – Manuel d'utilisation, Version 3. Geo Slope Internationale limited, Calgary, Alberta, Canada, 1994.
- 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, 1995, p. 35-46.