

étude des propriétés d'une argile sensible au pressiomètre autoforeur

study of the properties of a sensitive clay with the selfboring pressuremeter

Marius ROY

Professeur au département de Génie Civil, Université Laval*

Trinh le CHI THIEN

Ingénieur, Hydro - Québec**

Résumé

Le pressiomètre autoforeur, modèle français, a été utilisé pour étudier les propriétés de l'argile sensible du site de Saint-Alban. Dans cette étude on a examiné le fonctionnement de l'autoforage dans une argile sensible et évalué l'influence de certaines données de la procédure d'essais sur les paramètres mesurés.

L'essai au pressiomètre autoforeur permet de recueillir des informations reliées à la phase de mise en place de la sonde, comme la pression horizontale dans le sol et le coefficient k_0 et à la phase de mise en charge, comme les modules pressiométriques, la résistance au cisaillement non-drainé et la pression limite par l'intermédiaire de la courbe pression déformation.

Les résultats obtenus montrent que les propriétés mesurées au pressiomètre autoforeur sont en général différentes de celles mesurées au pressiomètre Ménard à cause de la technique de l'autoforage qui préserve les propriétés naturelles de l'argile.

Abstract

The French type selfboring pressuremeter has been used to study the properties of the sensitive Saint-Alban clay. In this study, one has examined the working action of the selfboring in a sensitive clay and evaluated the influence of particulate data of the test procedure on the measured properties.

The selfboring pressuremeter test allows to collect data during the selfboring phase as the horizontal pressure and the coefficient k_0 . During the loading phase, it is possible to get from the pressure deformation curve the pressuremeter modulus, the undrained shear strength and the limit pressure of the clay.

The results obtained indicate that the properties measured with the selfboring pressuremeter, in general are different from those measured with the Ménard pressuremeter because the selfboring technique preserves the natural properties of the clay.

* Cité universitaire, Québec, Canada, G1K-7P4.

** 855 Est Sainte-Catherine, Montréal, Québec, Canada, H2L-4P5.

1. INTRODUCTION

La détermination in situ des caractéristiques des argiles sensibles a fait l'objet de plusieurs travaux réalisés par l'université Laval, Québec, et c'est dans ce cadre que le pressiomètre autoforeur a été expérimenté sur le site bien connu de Saint-Alban.

La réalisation d'essais d'expansion cylindrique dans le sol a débuté avec les travaux préliminaires de KÖGLER (1933) et de MÉNARD (1957). Sur le plan théorique, les travaux de GIBSON et ANDERSON (1961), LADANYI (1963, 1972), SALENÇON (1966), VÉSIC (1972), BAGUELIN et al. (1972), PALMER (1972), PREVOST et HOEG (1975), DENBY et CLOUGH (1980) ont contribué au développement de cet essai et à populariser son usage. Sur le plan pratique, les problèmes associés à la mise en place de la sonde ont fait l'objet de certaines préoccupations comme le montrent les travaux de JÉZÉQUEL et al. (1968), réalisés dans divers types de sols en France, et de ROY et al. (1975) dans l'argile molle et sensible de Saint-Alban, Canada. Afin de surmonter les difficultés liées à la mise en place de la sonde, BAGUELIN et al. (1972) et WROTH et HUGHES (1973) ont présenté un nouvel outil de mesure connu sous le nom de pressiomètre autoforeur. Dans la mesure où cet outil s'annonçait prometteur, en limitant le remaniement que provoquait la mise en place traditionnelle de la sonde classique, nous avons poursuivi nos travaux en expérimentant le pressiomètre autoforeur mis au point en France au début des années 1970.

Les paramètres pressiométriques mesurés par autoforage ont donc fait l'objet d'une étude dont les résultats sont discutés dans le présent article. Il s'agissait d'examiner le fonctionnement de l'autoforage dans une argile molle et sensible, en modifiant la longueur de la sonde, le fluide du forage et la pression d'injection d'une part et certaines données de la procédure d'essais d'autre part, tels le temps de relaxation et la vitesse de mise en charge, afin d'en évaluer l'influence sur les paramètres mesurés. L'étude réalisée sur le même site au moyen du pressiomètre Ménard (ROY et al., 1975) nous a permis de comparer les résultats et de juger des avantages de l'autoforage.

2. RAPPEL DU PRINCIPE

Le principe du procédé d'autoforage étant maintenant bien connu (BAGUELIN et JÉZÉQUEL, 1973; AMAR et al., 1981), on se limitera à en faire un rappel simple. Un carottier à paroi mince, portant la cellule de mesure, est enfoncé dans le sol par autoforage, c'est-à-dire qu'il fait lui-même son trou. La carotte est détruite au fur et à mesure de la pénétration dans le terrain grâce à un outil désagrégateur et à l'injection d'un fluide sous pression. Une trousse coupante, biseautée vers l'intérieur, découpe le sol destiné à l'essai sans déplacement extérieur. Le sol intérieur est d'abord comprimé, remanié et entraîné par le liquide de forage, de l'intérieur de l'appareil jusqu'à la surface du terrain. Le sol extérieur, durant la phase de mise en place, est uniquement soumis aux frottements latéraux le long des flancs de la sonde. Pour respecter cette condition, la membrane constituant la cellule de mesure est située dans le prolongement de la trousse coupante. Contrai-

rement à ce que nous retrouvons sur la sonde Ménard, la cellule de mesure ne comporte pas de cellules de garde.

3. PROGRAMME D'ESSAIS

3.1. Appareillage

Le pressiomètre autoforeur utilisé est de la première génération développée en France et est constitué essentiellement d'une sonde autoforeuse, d'un contrôleur pression volume (C.P.V.) relié à la sonde par des tubulures et d'un bâti de fonçage. Une description relativement détaillée en a été donnée par BAGUELIN et JÉZÉQUEL (1973). On fera le rappel des quelques détails technologiques suivants :

- le corps de la sonde est formé d'un carottier à paroi mince de 89 mm de diamètre et de 81 cm de longueur, dans lequel on retrouve la cellule de mesure, de longueur égale à 2,2 diamètres, et l'outil désagrégateur et d'injection. Une sonde de même diamètre et de 108 cm de longueur a également fait l'objet d'essais dans trois sondages ;
- la membrane constituant la cellule de mesure est située dans le prolongement de la trousse coupante biseautée vers l'intérieur. Aucune mesure de pression interstitielle était disponible au niveau de la membrane ;
- le contrôleur pression-volume (C.P.V.) comprend un ensemble cylindre-piston d'une capacité de 200 cm³ et un tableau de raccordement et de mesure ;
- le bâti de fonçage est équipé d'une tête de rotation et d'injection du fluide de forage.

3.2. Site d'essai

Les essais au pressiomètre autoforeur ont été réalisés sur le site expérimental de la Section de géotechnique de l'université Laval, situé dans la localité de Saint-Alban, à 80 km à l'ouest de la ville de Québec, sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent.

Le profil type du sol de Saint-Alban est présenté sur la figure 1. Il se compose d'une croûte d'argile raide altérée de 1,5 m d'épaisseur, de 8,2 m d'argile silteuse molle et sensible, d'origine marine, de 3,7 m de silt argileux mou et d'une couche profonde de sable, qui s'étend de 13,4 à 25 m de profondeur. L'argile molle et sensible possède une résistance au cisaillement non-drainé, mesurée au scissomètre, qui varie de 10 KPa à 2 m jusqu'à 30 KPa à une profondeur de 10 m. Les résultats des études antérieures (LAROCHELLE et al., 1974; TAVENAS et al., 1975) montrent que le dépôt est relativement homogène et que l'argile a subi une quasi-préconsolidation due à la consolidation secondaire et au vieillissement du dépôt. Ceci explique pourquoi l'on retrouve un degré de surconsolidation de l'ordre de 2,2.

Afin de permettre une comparaison avec les résultats obtenus au pressiomètre Ménard, les essais ont été effectués dans une zone rectangulaire de 15 m × 7,5 m adjacente à la zone dite Ménard (ROY et al., 1975).

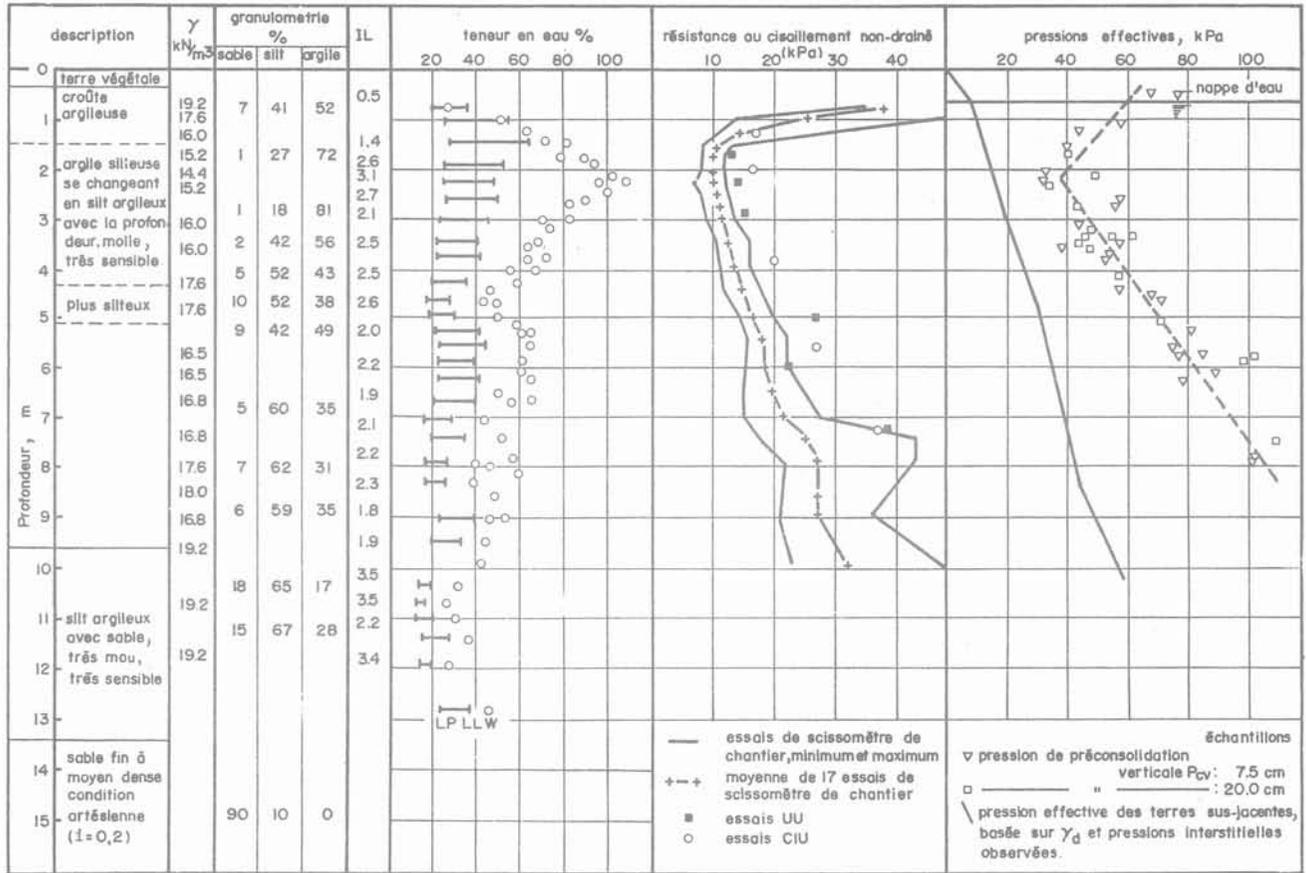


Fig. 1. — Profil des propriétés géotechniques du sol de Saint-Alban.

3.3. Campagne d'essais

En même temps que l'on cherchait à mesurer les caractéristiques pressiométriques de l'argile de Saint-Alban, on a voulu vérifier l'influence de certains éléments du mode opératoire susceptibles d'influencer les résultats de l'essai.

Lors de la mise en place de la sonde par autoforage, il nous est apparu nécessaire d'examiner comment le fluide de forage ainsi que la pression d'injection du fluide pourraient influencer la qualité du sol au contact sol-sonde et, de ce fait, la mesure des paramètres pressiométriques. On a donc utilisé une pompe centrifuge pour la réalisation de huit profils de forage, alors qu'une pompe manuelle a servi à l'établissement de deux profils supplémentaires. Quant aux fluides de forage, l'expérience acquise avec le pressiomètre Ménard (ROY et al., 1975) nous a conduits à retenir une bentonite de densité faible (1,04) pour l'établissement de neuf profils, tandis que l'eau a servi pour un seul profil. De plus, une sonde plus longue d'environ 27 cm a été expérimentée dans trois profils supplémentaires. Cette sonde longue a été réalisée en allongeant les parties inférieure et supérieure de la sonde sans modifier la longueur de la cellule de mesure.

Le système de mise en charge de notre appareil est du type « déformation contrôlée ». Deux points particuliers

ont été examinés durant la campagne d'essais ; le temps de relaxation et la vitesse de mise en charge. Le temps de relaxation généralement retenu a été de 2 heures et plus pour neuf profils, comparativement à une durée de 10 minutes pour un autre profil. Des vitesses de mise en charge de 6, 12, 20 et 36 cm²/min ont été utilisées dans la réalisation des treize profils pressiométriques. Le tableau 1 résume l'ensemble des données utilisées et fournit la légende d'identification des profils qui seront présentés et discutés ci-après.

Afin d'établir la pression nette exercée par la sonde sur la paroi du forage, nos mesures ont été corrigées pour tenir compte de l'inertie de la membrane et de la hauteur piézométrique. Devant les faibles pressions nécessaires pour amener l'argile jusqu'à la rupture, aucune correction de volume n'a été introduite pour prendre en compte la dilatation des tubulures Rilsan sous l'influence des pressions internes.

4. CARACTÉRISTIQUES DES RÉSULTATS DE LA MESURE

L'essai pressiométrique par autoforage permet de recueillir des informations lors des phases de mise en place et de mise en charge.

4.1. Phase de mise en place

La phase de mise en place de la sonde par autoforage s'effectue à volume constant, ce qui permet d'observer la pression dans la cellule de mesure pendant l'autoforage. Au niveau de l'essai, après l'arrêt de l'autoforage, on observe à volume constant, la variation de la pression en fonction du temps pour établir la courbe de relaxation, comme indiqué sur la figure 2.

Cette courbe type indique une diminution rapide de la pression durant la première heure qui suit l'arrêt de l'autoforage et, en général, une stabilisation complète de la pression après 2 heures de relaxation. Cette phase de relaxation permet la dissipation des pressions interstitielles qui peuvent être générées lors de l'autoforage. Bien que la durée normale soit de l'ordre d'une demi-heure à une heure (JÉZÉQUEL, 1982), nous croyons que la mise en œuvre de la sonde dans notre argile a pu nécessiter une période plus longue spécialement avec la sonde courte. Beaucoup d'essais ont été poursuivis jusqu'à plus de 10 heures afin de s'assurer de la stabilisation complète de la pression à volume constant. La valeur finale de cette pression, sans aucune autre interprétation et ou correction (LACASSE et LUNNE, 1982), correspond à la pression totale horizontale des terres au repos.

Pression horizontale

La figure 3 représente les profils minimum, moyen et maximum de la pression horizontale obtenue au moyen d'une technique d'autoforage similaire. Il s'agit d'un autoforage à la boue réalisé avec la sonde courte, activée au moyen d'une pompe centrifuge, accompagné d'une période de relaxation de 2 heures et plus.

On observe une zone relativement étroite qui montre bien que le dépôt est assez homogène et que P_{oh} croît quasi linéairement avec la profondeur. La valeur moyenne de P_{oh} croît de 32 KPa à 191 KPa respectivement entre 1,45 et 9,45 m de profondeur. La dispersion des résultats indique des écarts de 4 à 13 % entre les valeurs minimale ou maximale et la moyenne. Comme ces résultats proviennent de six sondages, on peut en déduire que cette technique est relativement bonne et efficace pour assurer une reproductibilité des résultats.

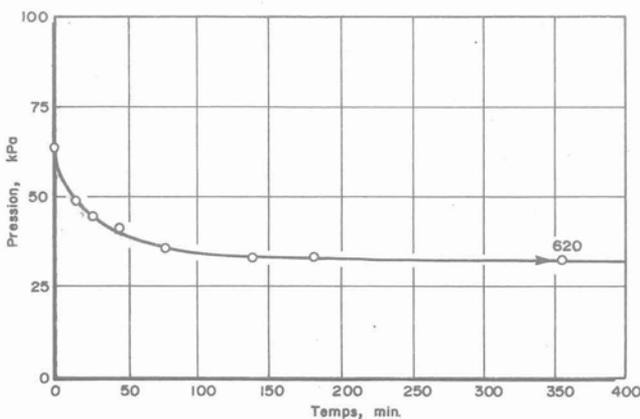


Fig. 2. — Courbe type de relaxation, argile de Saint-Alban.

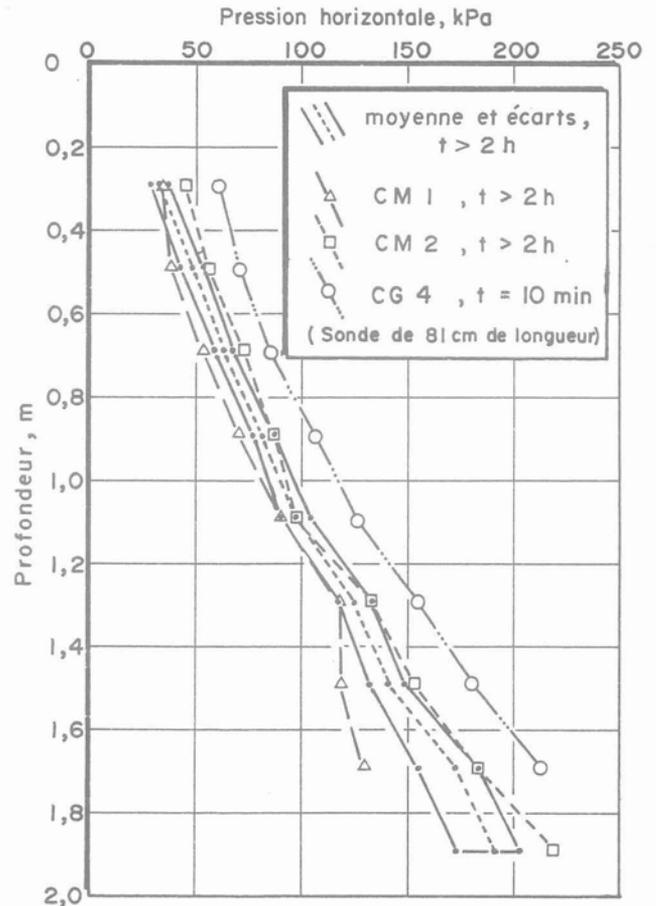


Fig. 3. — Pression horizontale des terres au repos mesurée par autoforage : sonde courte.

Dans le but de mesurer l'influence de la durée de la période de relaxation sur les propriétés mesurées de l'argile, le profil CG4 a été réalisé après une période de relaxation de seulement 10 minutes. Comme le montrent les résultats présentés sur la figure 3, on distingue, dans ce cas, une nette différence dans les valeurs de P_{oh} mesurées, soit une augmentation moyenne de 34 % définie par le rapport $P_{oh}(10 \text{ min})/P_{oh}(2 \text{ h})$. Si les valeurs mesurées après 10 minutes sont maintenant comparées aux P_{oh} mesurés après 10 heures, l'augmentation passe à 35 %. Ceci montre bien qu'en général la période de relaxation pour cette argile est approximativement de 2 heures, comme représenté sur la courbe type de la figure 2.

Les résultats des deux profils obtenus par un autoforage à la boue activée par une pompe manuelle sont également comparés aux résultats précédents sur la figure 3. On observe que les résultats sont influencés par le débit d'injection du fluide de forage. Suite aux observations faites sur le terrain et à l'analyse des résultats, on peut en déduire qu'une mauvaise circulation du fluide de forage peut créer des surpressions au fond du forage, ce qui peut avoir pour conséquence un refoulement et un remaniement du sol extérieur. Il apparaît, tout au moins, que ces deux profils contribuent à élargir très nettement la zone des résultats précédents, ce qui montre qu'une certaine inefficacité se

dégage à l'usage d'un débit d'injection trop faible et probablement irrégulier.

Les résultats du profil C.G.E. obtenus en utilisant l'eau comme fluide de forage, indiquent que l'eau rend l'autoforage moins performant, les valeurs de la pression horizontale étant erratiquement distribuées tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la zone établie à l'aide de l'autoforage à la boue légère.

Les résultats obtenus avec la sonde longue sont montrés sur la figure 4 et comparés avec les résultats précédents obtenus avec la sonde courte. A faible profondeur les résultats sont relativement voisins alors qu'au-delà de 4 mètres une nette différence distingue les deux séries de résultats. Compte tenu du fait que la procédure de mise en place de la sonde a été identique dans tous les cas, il faut retenir que c'est un effet longueur de sonde qui influence les résultats. Retenant que le motif justifiant ce changement de géométrie visait à réduire la vibration au niveau de la sonde par une plus grande surface au contact avec la paroi du forage, il y a lieu de croire que ce phénomène a une influence sur la mesure des conditions initiales du sol.

Les vibrations causent certainement une génération plus importante des pressions interstitielles, ce qui explique que le temps de relaxation nécessaire à stabiliser la pression après l'arrêt de l'autoforage est beaucoup plus long que celui obtenu par JÉZÉQUEL (1982).

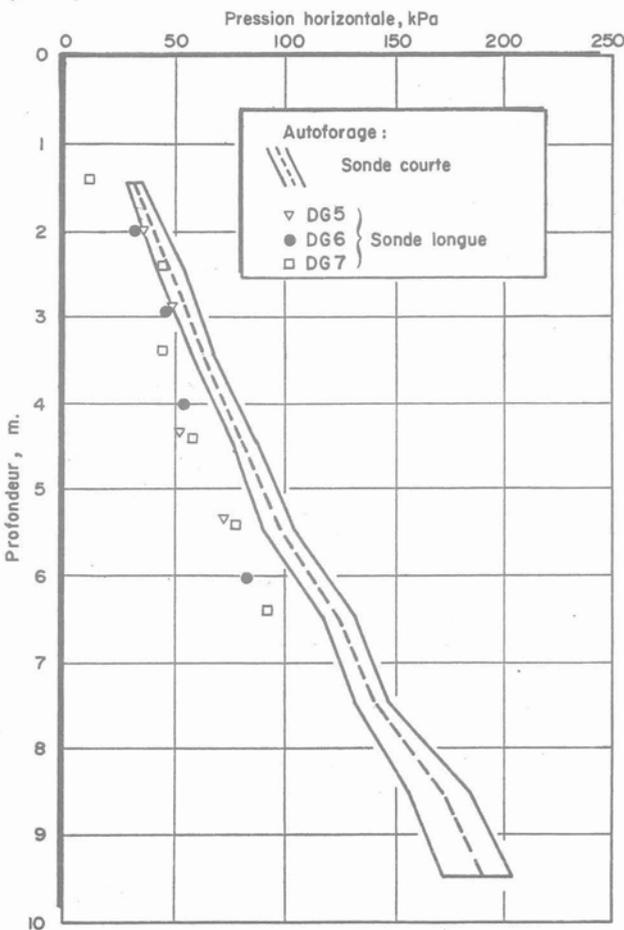


Fig. 4. — Pression horizontale des terres au repos mesurée par autoforage : sonde courte vs sonde longue.

La figure 5 représente, pour le site de Saint-Alban, les valeurs des pressions horizontales obtenues en pressiomètre autoforeur et au pressiomètre Ménard. Les essais au pressiomètre Ménard (ROY et al., 1975) ont été réalisés dans un forage spécialement préparé à l'aide d'une tarière motorisée à injection de boue. On constate que les résultats d'essais provenant de la technique d'autoforage avec la sonde courte sont nettement différents de la technique d'autoforage avec la sonde longue ou de la tarière motorisée. Pour ces deux techniques, la densité de la boue était la même. On observe que les pressions horizontales mesurées avec le pressiomètre Ménard sont inférieures d'environ 15 à 20 % par rapport à celles obtenues par autoforage avec la sonde courte et tout à fait comparables avec celles obtenues avec la sonde longue. Il apparaît donc que la sonde courte accompagnée de vibrations non-négligeables influencent grandement les résultats de la pression horizontale. Les valeurs élevées obtenues avec la sonde courte semblent inacceptables et nous analyserons cette conséquence sur l'évaluation du coefficient k_0 .

Coefficient k_0

La mesure de la pression horizontale des terres permet de passer au calcul du coefficient k_0 par le rapport P'_{oh}/P'_{ov} . Pour le site de Saint-Alban, les valeurs de P'_{ov} ont été déterminées d'après le profil des poids volumiques

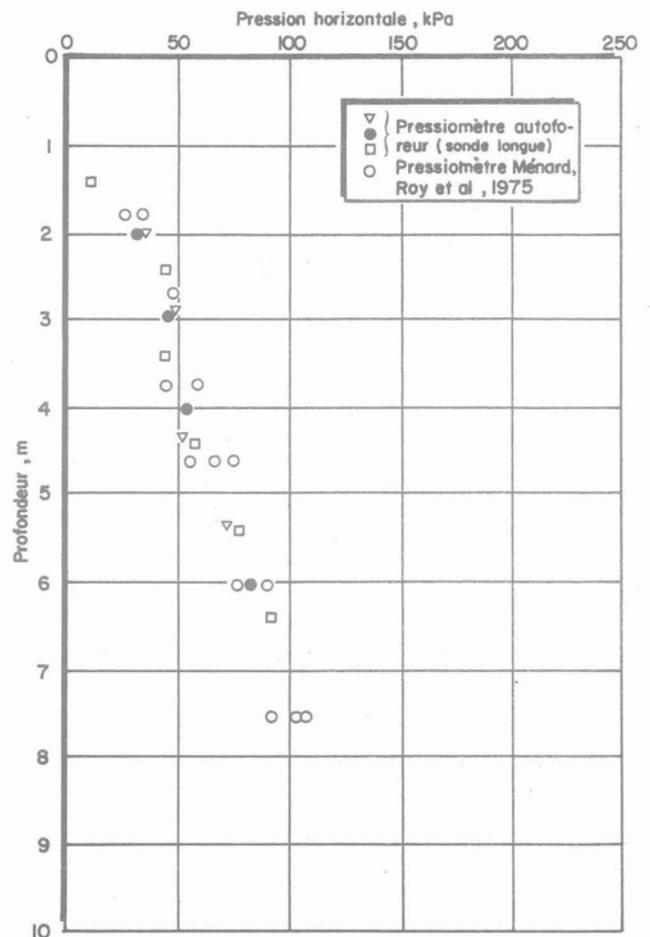


Fig. 5. — Pression horizontale des terres au repos : pressiomètre autoforeur (sonde longue) et pressiomètre Ménard.

représenté sur la figure 1, en tenant compte du niveau de la nappe située à 0,6 m de profondeur, et du gradient hydraulique ascendant de 0,2. Les coefficients k_0 , calculés pour les essais réalisés avec la sonde courte et à la boue légère activée par pompe centrifuge varient entre 1,3 et 1,7 avec une moyenne d'environ 1,5. Comme il fallait s'y attendre, ces valeurs de k_0 sont nettement trop élevées et démontrent que cette série d'essais n'était pas adéquate pour mesurer la pression horizontale du sol en place.

Quant aux résultats de k_0 calculés des poussées horizontales mesurées avec la sonde longue, ils sont présentés sur la figure 6. Pour fin de comparaison les valeurs de k_0 obtenues sur le site de Saint-Alban au moyen du pressiomètre Ménard (ROY et al., 1975), par fracturation hydraulique et au moyen de cellules de contrainte totale (TAVENAS et al., 1975) sont également représentées sur la figure 6. Dans la partie supérieure du dépôt, c'est-à-dire entre 1,5 et 5 m de profondeur, les valeurs de k_0 , calculés par ces différentes techniques de mesure sont en général du même ordre de grandeur, bien que la limite inférieure soit constamment obtenue pour le pressiomètre Ménard. Entre 5 et 7,5 m de profondeur, les résultats obtenus par autoforage et au pressiomètre Ménard sont systématiquement plus faibles que ceux obtenus au moyen des autres techniques. Dans l'ensemble les valeurs de k_0 sont voisines de l'unité immédiatement sous la croûte et décroissent graduellement à une valeur moyenne de 0,6 à la profondeur de 7,5 m.

4.2. Phase de mise en charge

Lorsque la pression horizontale des terres au repos est atteinte, suite à la période de relaxation, on est en mesure d'effectuer l'essai d'expansion non drainée à déformation contrôlée. De cette seconde phase de l'essai on est en mesure de déduire, à partir de la

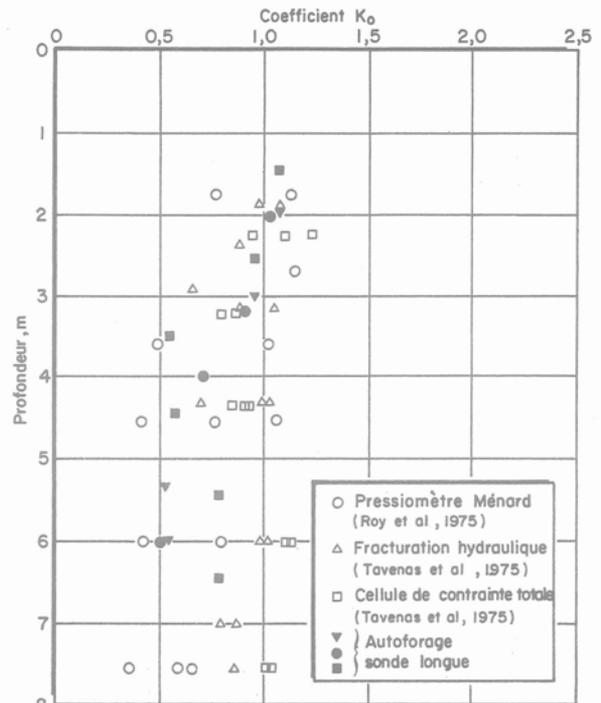


Fig. 6. — Coefficient K_0 obtenu par différentes méthodes.

courbe pression-déformation, les modules pressiométriques, la résistance au cisaillement non drainé ainsi que la pression limite de l'argile.

Dans nos essais à déformation contrôlée, la vitesse d'expansion standard a été fixée à 20 cm³/min. Cependant, comme la vitesse peut influencer le résultat expérimental, trois profils ont été réalisés avec la sonde courte à des vitesses de 6, 12 et 36 cm³/min, respectivement (voir tableau I).

Tableau I. — Liste des caractéristiques de forage et d'essai retenues pour chacun des forages.

Forage	Fin du forage (m)	Fluide de forage	Mode d'injection	Temps de relaxation	Vitesse d'essai (cm ³ /min)
CM1	7,45	bentonite	manuel	> 2 heures	20
CG1	9,45	bentonite	centrifuge	> 2 heures	20
AG	9,45	bentonite	centrifuge	> 2 heures	6
CG2	9,45	bentonite	centrifuge	> 2 heures	20
CG3	9,45	bentonite	centrifuge	> 2 heures	20
BG	9,45	bentonite	centrifuge	> 2 heures	12
CM2	9,45	bentonite	manuel	> 2 heures	20
DG	8,45	bentonite	centrifuge	> 2 heures	36
CGE	8,45	eau	centrifuge	> 2 heures	20
CG4	8,45	bentonite	centrifuge	10 minutes	20
DG5	5,40	bentonite	centrifuge	> 2 heures	36
DG6	6,10	bentonite	centrifuge	> 2 heures	36
DG7	6,40	bentonite	centrifuge	> 2 heures	36

Légende : Les indices A, B, C, D désignent respectivement les vitesses d'essai de 6, 12, 20 et 36 cm³/min. Les indices M et G désignent respectivement la pompe manuelle et la pompe centrifuge électrique. L'indice E désigne l'eau comme fluide de forage.

Courbe pression-déformation

Une courbe type d'expansion non drainée obtenue dans l'argile de Saint-Alban est présentée sur la figure 7. On observe le point de départ, correspondant à la pression horizontale des terres au repos, suivi d'une courbe concave sans partie linéaire qui se termine, en principe, par la mesure de la pression limite. Les courbes d'expansion qui ne font apparaître aucun point d'inflexion, indiquent raisonnablement bien que le point de départ de la courbe correspond à la pression horizontale discutée précédemment.

Modules pressiométriques : Selon les travaux de BAGUELIN, JÉZÉQUEL et SHIELDS (1978), deux modules de cisaillement sont définis sur la courbe d'expansion, soit G_{po} , le module initial tangent, et G_{ps} , le module sécant. Ce dernier module est calculé à partir du point représentant la rupture (déviateur maximum), comme on le montre sur la figure 7. Les modules de déformation pressiométriques E_o et E_s sont alors calculés à l'aide de la relation

$$E = 2(1 + \lambda) G_p$$

où λ est le coefficient de Poisson.

— **Résistance au cisaillement :** Les données de la courbe d'expansion (pression-déformation), permettent par différenciation de retrouver la loi de cisaillement :

$$\tau = f(\varepsilon_o) = \varepsilon_o(dF/d\varepsilon_o) (1 + \varepsilon_o) (1 + \varepsilon_o/2)$$

où ε_o est la déformation circonférentielle au contact de la sonde et F l'équation de la courbe d'expansion. La méthode de dérivation retenue pour notre interprétation est celle qui utilise cinq points (BAGUELIN et al., 1972). La loi de cisaillement dérivée de la courbe d'expansion (fig. 7) est montrée sur la figure 8 comme un exemple type tiré de nos essais.

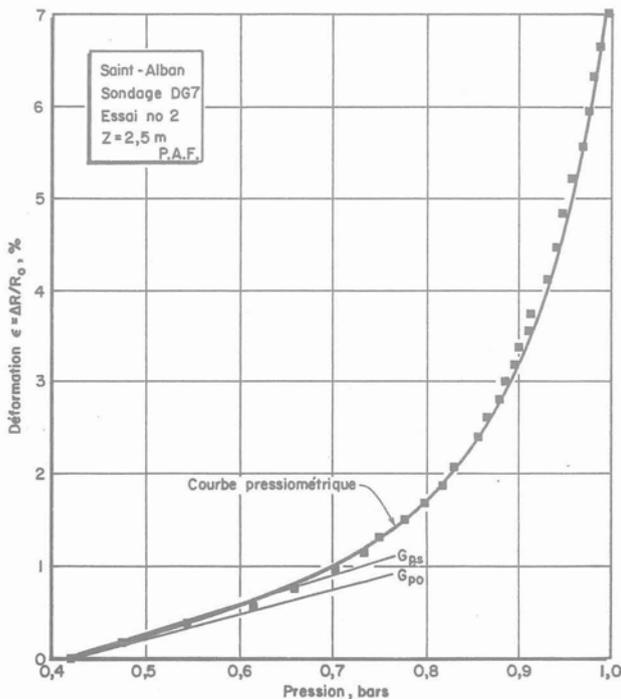


Fig. 7. — Courbe type pression-déformation mesurée au pressiomètre autoforeur.

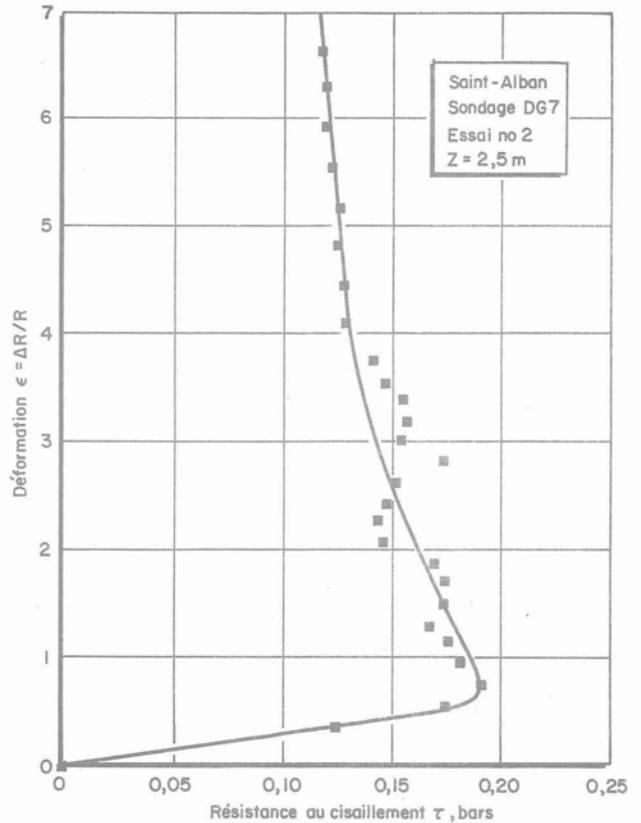


Fig. 8. — Courbe type contrainte déformation dérivée de la courbe d'expansion.

— **Pression limite :** La pression limite est la pression exercée sur la paroi de la cavité lorsque l'expansion tend vers l'infini. A cause des limitations de l'expansion, lors de la réalisation des essais, la valeur de la pression limite peut être déterminée par l'une des quatre méthodes suivantes : la méthode semi-logarithmique (GIBSON et ANDERSON, 1961), la méthode conventionnelle de Ménard, la méthode bi-logarithmique (LEMÉE, 1973) ainsi que la méthode de la courbe inverse (VAN WANBEKE et d'ENRICOURT, 1971). Selon les résultats de JUNEAU (1975), ces méthodes conduisent à déterminer la pression limite avec un écart de 12 %, la méthode de Ménard (lorsque le volume initial est doublé) fournissant la valeur minimale et GIBSON et ANDERSON la valeur maximale.

Modules pressiométriques

Le module initial tangent E_o et le module sécant E_s au point de rupture sont représentés sur la figure 9. Dans la mesure où l'effet de la vitesse de déformation n'a pas été perçu dans les calculs des modules, probablement à cause du petit domaine de variation étudié (de 6 à 36 cm³/min), les résultats obtenus dans les forages à la boue activée par une pompe centrifuge sont regroupés pour définir les profils de modules calculés des résultats d'essais obtenus des sondes courte et longue. On montre qu'avec la sonde courte la moyenne du module initial tangent E_o varie de 8 à 39 MPa entre les profondeurs de 2 et 9 m, alors que la moyenne du module sécant passe de 5,5 à 24,7 MPa entre les mêmes pro-

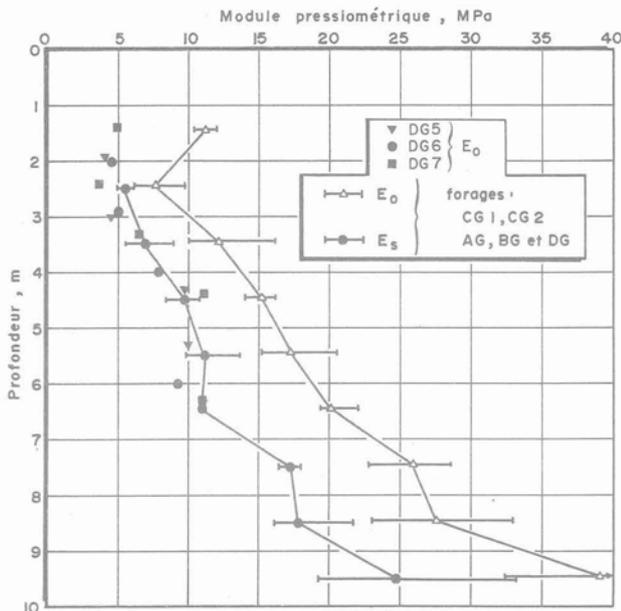


Fig. 9. — Modules pressiométriques déduits des courbes pression-déformation.

fondeurs. Sur la figure 9 on présente également les résultats obtenus avec la sonde longue. Les valeurs du module initial tangent sont plus faibles et varient de 3,4 à 11,1 MPa entre les profondeurs de 2 et 5 m. Ces derniers résultats nous apparaissent plus valables compte tenu des explications fournies dans la section précédente.

La figure 10 montre les résultats obtenus dans les forages C.M.1, C.M.2 et C.G.E. réalisés respectivement à la boue activée manuellement et à l'eau activée à la pompe centrifuge. Notre comparaison se limite au module initial tangent, compte tenu des difficultés rencontrées avec ces techniques de forage. On observe que la moyenne pour les forages C.M.1 et C.M.2 est, en général, plus faible que la moyenne obtenue dans les forages précédents. Ceci découle du fait qu'avec une circulation activée manuellement on n'arrive pas à dégager entièrement l'argile remaniée à l'intérieur de la trousse coupante et que des surpressions et du refoulement se produisent pendant l'autoforage. Ces résultats sont en accord avec les résultats précédents portant sur la pression horizontale des terres au repos. Également sur cette figure, on présente le profil des modules calculés avec les résultats du forage C.G.E. Dans ce cas, le module étant en général plus élevé, on peut en déduire que l'eau n'est pas un fluide approprié pour réussir l'autoforage dans les argiles.

Les résultats du forage C.G.4, réalisé avec un temps de relaxation de 10 minutes, ont été analysés mais il n'a pas été possible d'en tirer des valeurs de module.

La comparaison des modules pressiométriques E_0 , E_s , obtenus par autoforage (sonde longue), et E_m , obtenus par les différentes techniques de mise en place de la sonde Ménard (ROY et al., 1975), est présentée sur la figure 11. Tout d'abord, les résultats obtenus avec la sonde Ménard ont été réalisés avec différentes techniques de forage qui se différencient principalement par le rapport $\frac{\varnothing 2}{\varnothing 1}$, correspondant respectivement aux dia-

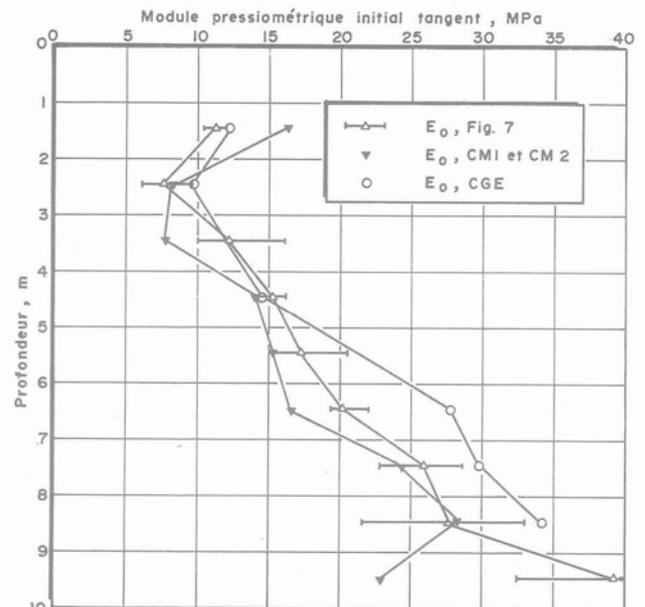


Fig. 10. — Comparaison des modules pressiométriques initiaux tangents en fonction du mode d'injection et du fluide de forage.

mètres du forage et de la sonde Ménard. Pour un autre profil, la sonde Ménard a été vérinée directement dans le sol, avec une période de relaxation suffisamment longue pour dissiper les surpressions interstitielles de fonçage.

On observe que le profil A de E_m est obtenu lorsque $\frac{\varnothing 2}{\varnothing 1}$ est plus grand que l'unité, le diamètre du forage

étant alors plus grand que celui de la sonde. Avec ce procédé traditionnel, une zone mince remaniée peut exister dans la paroi et celle-ci a pu fluer avant la phase de mise en charge. Dans le cas où $\frac{\varnothing 2}{\varnothing 1} = 1$, les diamètres sont égaux et les modules sont plus élevés de 60 % à 100 % comme le montre le profil B. Lorsque le rapport $\frac{\varnothing 2}{\varnothing 1}$ est inférieur à l'unité, la sonde est mise en

place dans une cavité de diamètre plus faible que celui de la sonde. Il y a donc eu un léger refoulement de la paroi de la cavité avant de procéder à la mise en charge du sol. Dans ce dernier cas, également, il a pu y avoir fluage de la paroi avant la mise en place de la sonde. On observe dans ce cas une nette augmentation du module E_m , (profil C) par rapport au cas précédent. Ces trois cas montrent bien que la technique utilisée pour mettre en place la sonde Ménard impose un cheminement de contraintes qui diffère et qu'en conséquence la valeur du module de déformation peut varier de 100 à 150 %.

Le profil D, réalisé en fonçant directement la sonde dans l'argile, avec une période de relaxation avant la mise en charge, se dégage nettement des trois précédents. L'écart avec le profil A est d'environ 340 % dans la partie supérieure du dépôt et monte jusqu'à plus de 700 % dans sa partie inférieure. Il est important de préciser que le profil D correspond à des valeurs de modules d'une argile remaniée-reconsolidée en place autour de la sonde pressiométrique.

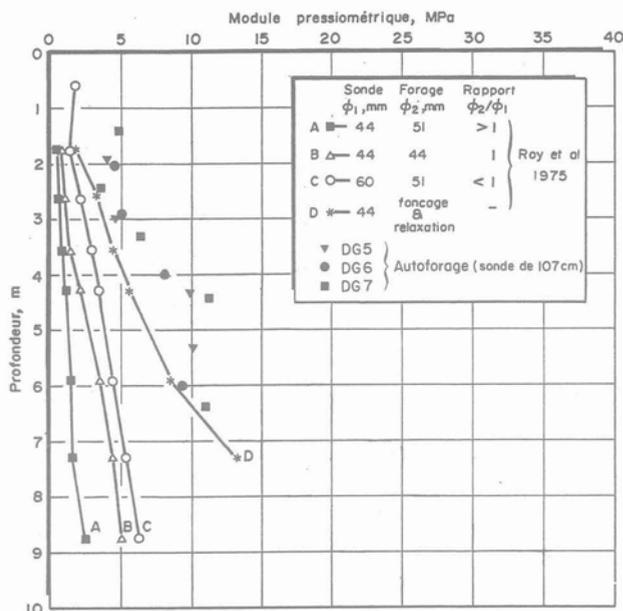


Fig. 11. — Comparaison des modules pressiométriques : autoforage vs pressiomètre Ménard.

Les valeurs du module initial tangent obtenues des essais réalisés au pressiomètre autoforeur (sonde courte) sont comparées sur la figure 11 à toutes les autres mesures. On observe une nette différence entre tous ces profils, l'autoforage assurant une mesure plus appropriée du module de déformation.

Les résultats précédents montrent bien que plusieurs facteurs influencent la courbe d'expansion et les paramètres qui en découlent. Principalement, la variation du rapport $\frac{\phi_2}{\phi_1}$ introduit des cheminements de

contraintes différents, fonction de la technique de mise en place de la sonde. Également, la présence d'une zone annulaire remaniée autour de la sonde pressiométrique conduit à une réduction importante du module, comme le montrent nos résultats. Le problème de la mise en place de la sonde, aussi discuté par LAW et EDEN (1980) et GIONNA et al. (1982), est donc très important et mérite une plus grande attention de la part des chercheurs.

Résistance au cisaillement

Les profils de résistance au cisaillement ont été calculés pour la plupart des forages identifiés dans le tableau I, le forage C.G.E. étant exclu. Afin d'identifier du mieux possible l'effet de la vitesse, les résultats sont présentés en tenant compte de cet aspect et de la technique de l'autoforage. De plus, il est important de préciser que les résultats obtenus avec les deux sondes sont comparables à une vitesse de cisaillement identique.

La figure 12, qui résume tous les résultats, montre que la technique de circulation du fluide de forage (C.M. 1, C.M.2 vs C.G.1, C.G.2) n'a pas un effet très marqué sur la valeur de la résistance et que la dispersion observée peut être associée aux variations naturelles du dépôt. Quant à l'effet de la vitesse de déformation, on peut observer une tendance générale montrant une légère diminution de la résistance avec la vitesse croissante. Compte tenu du nombre limité d'essais aux

vitesse de 6, 12 et 36 cm³/min, il faut être prudent dans l'interprétation et se limiter à parler de tendance.

Les résultats du profil C.G.4, également représentés sur la figure 12, montrent bien que la résistance au cisaillement est systématiquement plus faible à cause de la période de relaxation limitée à 10 minutes avant l'essai d'expansion. Il est bien montré par ce résultat qu'il faut attendre la stabilisation complète de la pression horizontale avant de débiter la phase de mise en charge du sol.

Si l'on retient que la vitesse de déformation normale est voisine de 20 cm³/min et que l'on regroupe les résultats obtenus à cette vitesse, exception faite du profil C.G.4, la résistance au cisaillement varie de 20 KPa à 60 KPa respectivement entre 1,5 et 9,5 m de profondeur. Ce profil moyen sera utilisé pour établir une comparaison avec les résultats obtenus avec le pressiomètre Ménard.

Les travaux de ROY et al. (1975) ont montré que la résistance au cisaillement obtenue au pressiomètre Ménard peut varier suivant que l'on retient comme base d'interprétation les théories de la première génération (MÉNARD, 1957; GIBSON et ANDERSON, 1961) ou celles de la deuxième génération (LADANYI, 1972; PALMER, 1972 et BAGUELIN et al., 1972). Pour fin de comparaison, les résultats obtenus selon MÉNARD sont présentés sur la figure 13. De plus, sur la même figure on a reproduit les résultats obtenus au scissomètre d'une part et au pressiomètre

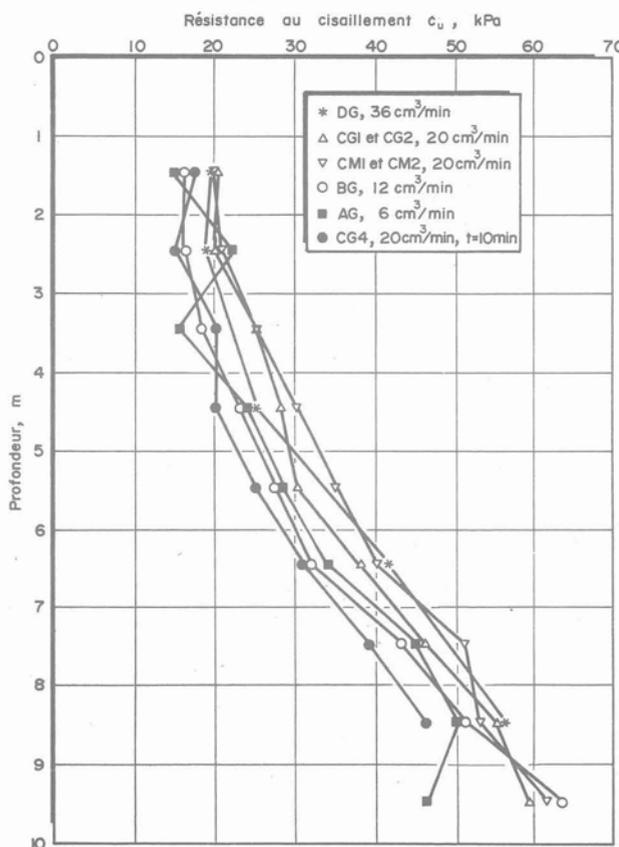


Fig. 12. — Résistance au cisaillement non drainé obtenue au pressiomètre autoforeur.

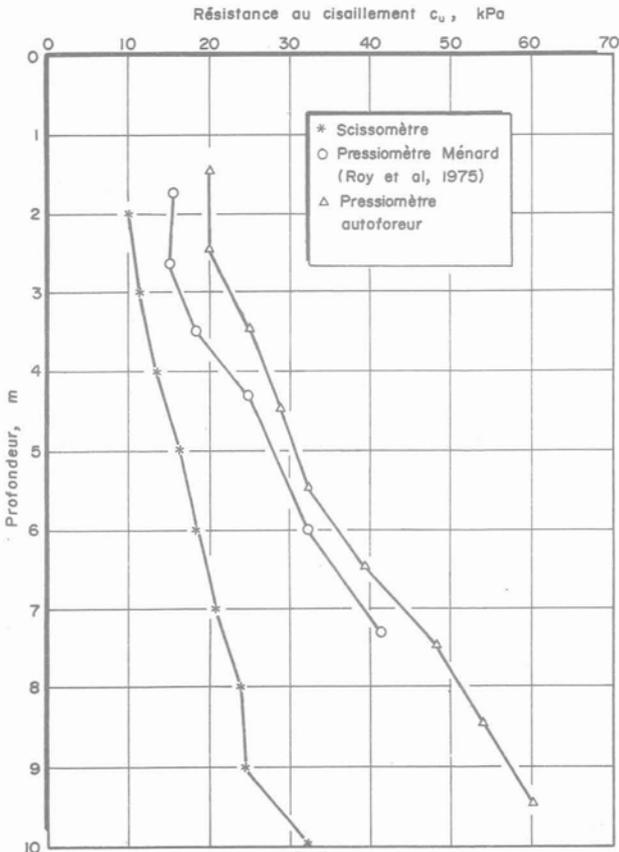


Fig. 13. — Résistance au cisaillement non drainé obtenue au moyen de différentes techniques d'autoforage.

autoforeur d'autre part. On observe que la technique d'autoforage conduit à des résultats nettement plus élevés de la résistance au cisaillement, soit de 8 et 35 % plus élevés que ceux de Ménard et de 100 % à 180 % plus élevés que ceux du scissomètre.

Dans le but de comparer les résistances au cisaillement mesurées à l'autoforage à celles mesurées dans un appareil en déformation plane, nous avons réalisé deux séries d'essais du type CAU. Dans une première série les essais ont été cisailés dans la direction verticale alors que dans la deuxième série les essais l'ont été dans la direction horizontale. La figure 14 indique la position de l'échantillon au moment du prélèvement ainsi que celle occupée au moment de le soumettre à un cisaillement horizontal dans l'appareil à déformation plane. Les valeurs de k_0 retenues pour la consolidation anisotrope sont celles calculées des essais par autoforage avec la sonde longue.

Les résultats présentés sur la figure 15 montrent que les essais CAU cisailés verticalement donnent les résistances les plus faibles, lesquelles se comparent très bien avec les résistances du scissomètre de chantier (fig. 13). Quant aux résultats des essais CAU cisailés horizontalement, ils se rapprochent des résistances obtenues par autoforage tout en y demeurant plus faibles d'environ 20 %. Toutefois, ces mêmes résultats CAU se comparent relativement bien avec les résultats obtenus au pressiomètre Ménard (fig. 13). Des résultats d'essais triaxiaux CAU, également montrés sur la figure 15, indiquent que ce profil de résistance est supérieur aux profils des essais CAU en déformation plane.

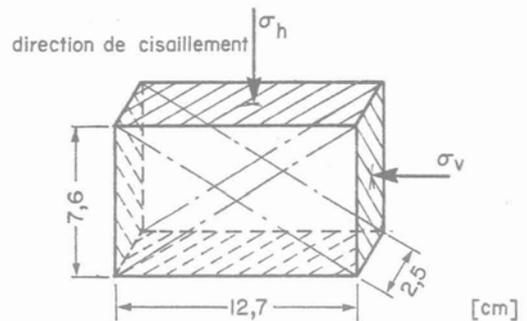
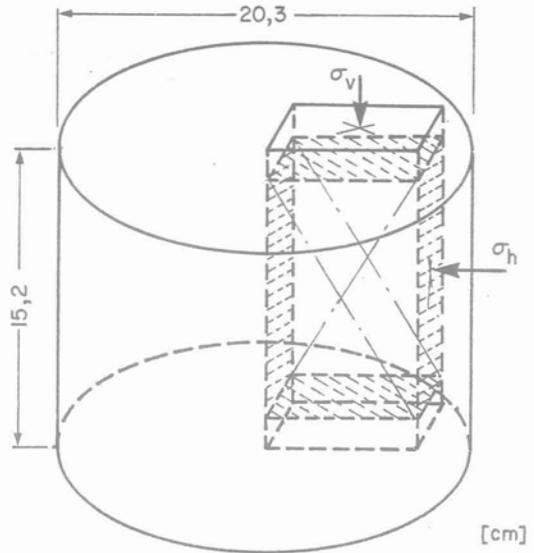


Fig. 14. — Découpage et montage de l'échantillon sollicité horizontalement dans l'appareil à déformation plane.

L'ensemble des résultats de la résistance au cisaillements montre bien la variation possible de celle-ci en fonction de la nature de l'essai. Les essais CAU en déformation plane et CAU au triaxial donnent des résistances qui sont relativement près de celles obtenues par autoforage.

Pression limite

Les pressions limites, évaluées selon les méthodes identifiées précédemment sont représentées sur la figure 16 pour l'ensemble des forages du programme réalisé. La pression limite moyenne varie de 125 kPa à 450 kPa entre les profondeurs de 1,5 et 9 m. Ces résultats indiquent que les méthodes d'interprétation amènent une certaine dispersion dans les résultats de la pression limite. La limite inférieure de la zone est fournie par la méthode de la courbe inverse (VAN WANBEKE et d'ENRICOURT, 1971) et la limite supérieure

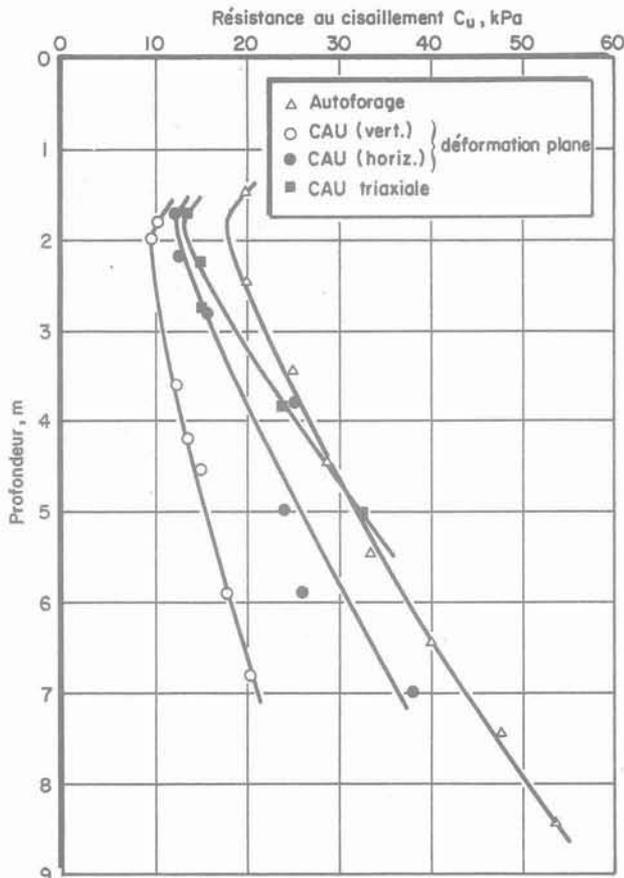


Fig. 15. — Comparaison des résistances au cisaillement mesurées en laboratoire et in situ.

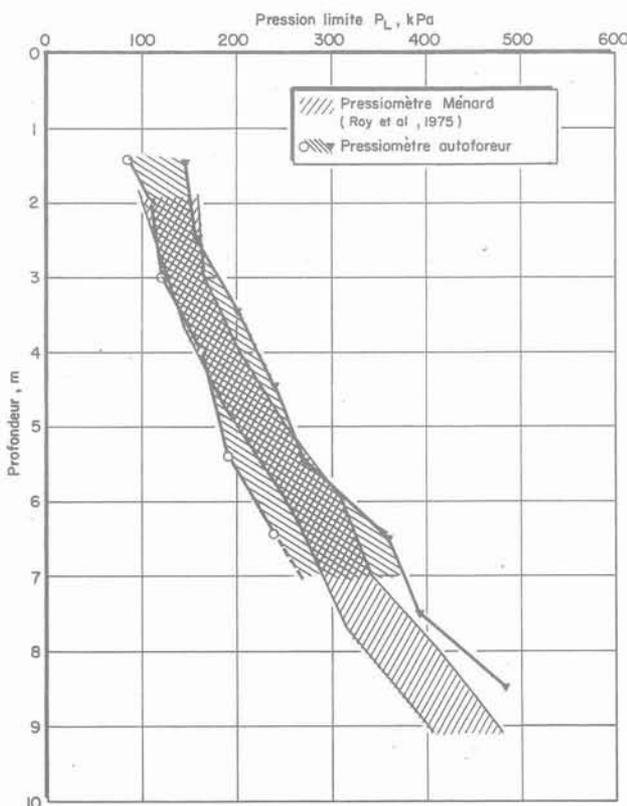


Fig. 16. — Pression limite mesurée sur le site de Saint-Alban.

par la méthode de GIBSON et ANDERSON, 1961. Ce paramètre demeure facile à obtenir et, dans un dépôt d'argile comme celui de Saint-Alban, la reproductibilité de la mesure en général ne pose pas de problème.

Sur la figure 16 sont également représentées les valeurs des pressions limites mesurées au pressiomètre Ménard (méthode de MÉNARD). L'importance de la plage des résultats provient des différentes techniques de mise en place de la sonde ($1 > \frac{\delta_2}{\delta_1} > 1$) ainsi

que des sondes AX et BX utilisées (ROY et al., 1975). Les résultats obtenus avec la sonde BX ont contribué à élargir d'une façon importante la plage des résultats du côté supérieur, à cause du rapport L/D qui est beaucoup plus faible pour cette sonde.

La comparaison des résultats montre que les valeurs du profil moyen obtenu par autoforage sont égales à celles de MÉNARD.

5. DISCUSSION

Les résultats obtenus au moyen de l'autoforage sont en général bien différents de ceux que l'on avait obtenus précédemment avec le pressiomètre Ménard (ROY et al., 1975). Le premier facteur qui explique cette différence est la technique de mise en place de la sonde par autoforage. Déjà en 1975, on avait montré que la réalisation d'un forage au carottier, aussi bien que le vérinage direct de la sonde Ménard dans le sol, conduisaient à mesurer correctement seulement la pression limite du sol. En réalisant un forage plus soigné, à l'aide d'une tarière motorisée à injection de boue, nous sommes parvenus à améliorer considérablement la qualité du forage et à obtenir une paroi de forage sur laquelle il a été possible de mesurer toutes les caractéristiques pressiométriques du sol. La comparaison des résultats obtenus au moyen de ces différentes techniques montre que le forage à la tarière utilisé en 1975 a permis de solliciter une paroi quasi intacte. On peut confirmer maintenant que la présence d'une zone de sol légèrement remanié de la paroi a pu influencer la mesure des paramètres pressiométriques. De plus, l'absence d'une phase de relaxation bien contrôlée de la paroi d'un forage peut jouer un rôle important. Ce point est partiellement mis en évidence lorsque l'on compare les profils C et D de la figure 11.

Tous ces résultats confirment qu'avec l'autoforage nous sommes en mesure de solliciter le sol au voisinage de sa condition intacte. Il est particulièrement encourageant de constater que, même dans une argile très molle et sensible, il est possible de pratiquer l'autoforage avec un certain succès.

L'avantage particulier de l'autoforage est de permettre la mesure in situ de la pression totale horizontale des terres au moment de la mise en place de la sonde. Les résultats de la figure 6, portant sur les valeurs du coefficient K_0 , illustrent très bien la supériorité de cette technique de mesure, due au fait que les deux autres techniques de mesure se réalisent dans un sol remanié par la mise en place des appareils.

Dans la phase de mise en charge du sol, les résultats présentés sur les figures 11 et 12 montrent bien les gains réalisés sur les mesures du module et de la résistance au cisaillement. Ces écarts très importants, égale-

ment mesurés dans d'autres cas (BAGUELIN et al., 1978; GIONNA et al., 1982), sont attribuables aux facteurs mentionnés précédemment. De plus, lors de la mise en place de la sonde par autoforage, nous avons adopté une période de relaxation de plus de deux heures pour assurer la dissipation des pressions interstitielles. Notre expérience avec le piézocone (ROY et al., 1982) nous indique que la dissipation était terminée après cette période. Par contre, dans les résultats obtenus au pressiomètre Ménard, la mise en charge du sol a suivi immédiatement la phase de préparation du trou de forage. Avec cette technique, la résistance au cisaillement est largement influencée par les surpressions interstitielles autour de la cavité et est logiquement plus faible que celle obtenue après une période de relaxation plus importante. Ceci est en accord avec les résultats concernant les profils de résistance (fig. 12) obtenus par autoforage, après une période de relaxation limitée à 10 minutes.

En fonction des résultats obtenus par autoforage, il est cependant encore nécessaire de se demander si l'on contrôle bien le remaniement dans le processus de l'autoforage. Sinon, comment peut-on arriver à le quantifier? De plus, il serait normal de croire qu'un autoforage réalisé avec succès ne devrait pas créer de surpressions interstitielles, comme nous arrivons à l'obtenir avec une technique de carottage de très bonne qualité (LAROCHELLE et al., 1981).

6. CONCLUSION

L'expérimentation du pressiomètre autoforeur dans l'argile molle et sensible du site de Saint-Alban met en évidence une nette supériorité de la technique de l'autoforage pour définir les caractéristiques pressiométriques des sols mous.

L'autoforage permet, dans un premier temps, de prendre en compte l'état de référence initial, qui correspond quasiment à la condition naturelle du sol. A cet effet, la mesure de la pression totale horizontale mérite une plus grande crédibilité que celles tirées des autres méthodes. Cependant, la période de relaxation qui accompagne la phase de mise en place dans une argile sensible et qui est nécessaire pour mesurer la pression totale horizontale dans le sol, est relativement longue et indique que des mesures de pressions interstitielles devraient être réalisées pour faciliter la compréhension de ce phénomène.

Dans un deuxième temps, une courbe d'expansion monotone, donc sans point d'inflexion, est une indication de la qualité de l'essai et des caractéristiques que l'on en déduira par la suite. L'autoforage permet de solliciter le sol pour de petites déformations et de définir un module de cisaillement dès l'application des premiers paliers de chargement. L'argile a dans ce cas un comportement très proche de celui de l'argile intacte.

REMERCIEMENTS

Les résultats d'essais présentés dans cette article ont été obtenus par le personnel de la Section de géotechnique de l'Université Laval, Québec. Les auteurs remercient spécialement les professeurs LAROCHELLE et TAVENAS pour leurs contributions au cours de cette

étude. Ils remercient également les personnels technique et de secrétariat qui y ont contribué. Le support financier a été fourni par le ministère de l'Éducation du Québec, ainsi que par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (subvention A-7744).

BIBLIOGRAPHIE

1. AMAR S., BAGUELIN F., FRANK R., JÉZÉQUEL J.F. (1981), *L'autoforage*. Travaux, n° 552, pp. 63-76.
2. BAGUELIN F., JÉZÉQUEL J.F., LEMÉE E., LE MÉHAUTÉ A. (1972), *Expansion of cylindrical probes in cohesive soils*. A.S.C.E., Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol. 98, n° SM11, pp. 1129-1142.
3. BAGUELIN F., JÉZÉQUEL J.F. (1973), *Le pressiomètre autoforeur*. Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, supplément nos 307-308, n° 97, pp. 133-160.
4. BAGUELIN F., JÉZÉQUEL J.F., SHIELDS D.H. (1978), *The pressuremeter and foundations engineering*. Trans Tech Publications, Clauthal, France.
5. DENBY M.G., CLOUGH G.W. (1980). *Self-boring pressuremeter tests in clay*. A.S.C.E., Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol. 106, n° 12, pp. 1369-1387.
6. GHIONNA V., JAMIOLKOWSKI M., LANCELLOTTA R. (1982), *Caractéristiques des argiles saturées tirées des essais P.A.F.* Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, L.C.P.C., Paris, pp. 177-199.
7. GHIONNA V., JAMIOLKOWSKI M., LACASSE S., LADD C.C., LANCELLOTTA R., LUNNE T. (1983), *Évaluation of self-boring pressuremeter*. Proceedings of the International Symposium on Soil and Rock Investigation by in Situ Testing, Paris, vol. 11, pp. 275-281.
8. GIBSON R.E., ANDERSON W.F. (1961), *In situ measurement of soil properties with pressuremeter*. Civil Engineering Public Works Review, vol. 56, n° 658, pp. 151-160.
9. JÉZÉQUEL J.F. (1982), *Le pressiomètre autoforeur*. Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, L.C.P.C., Paris, pp. 121-136.
10. JÉZÉQUEL J.F., LEMASSON H., TOUZE J. (1968), *Le pressiomètre Louis Ménard. Quelques problèmes de mise en œuvre et leur influence sur les valeurs pressiométriques standard*. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, 32, pp. 97-120.
11. JUNEAU R. (1975), *Contribution au développement de la mise en place de la sonde pressiométrique dans les argiles sensibles*. Thèse présentée à l'École des Gradués comme exigence partielle pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences.
12. KÖGLER F. (1933), *Baugrundprüfung im Bohrloch*. Der Bauingenieur, Berlin, Heft 19-20.

13. LACASSE S., LUNNE T. (1982), *Contrainte horizontale in situ à partir d'essais pressiométriques*. Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, Paris, L.C.P.C., pp. 199-220.
14. LADANYI B. (1963), *Expansion of cavity in a saturated clay medium*. A.S.C.E., Journal of the Soil Mechanics and foundation Engineering Division, vol. 90, n° S.M.4, pp. 127-161.
15. LADANYI B. (1972), *In situ determination of undrained stress-strain behaviour of sensitive clays with the pressuremeter*. Revue canadienne de géotechnique, vol. 9, n° 3, pp. 313-319.
16. LAROCHELLE P., SARRAILH J., TAVENAS F., ROY M., LEROUÉIL S. (1981), *Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils*. Revue canadienne de géotechnique, vol. 18, n° 1, pp. 52-66.
17. LAROCHELLE P., TRAK B., TAVENAS F.A., ROY M. (1974), *Failure of a test embankment on a sensitive Champlain clay deposit*. Revue canadienne de géotechnique, vol. 11, n° 1, pp. 142-164.
18. LAW K.T., EDEN W.J. (1980), *Influence of cutting shoe size in self-boring pressuremeter tests in sensitive clays*. Revue canadienne de géotechnique, vol. 17, n° 2, pp. 165-173.
19. LEMÉE E. (1973), *Simulation analytique de la courbe pressiométrique*. Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc, pp. 1-6.
20. MÉNARD L. (1957), *Mesure in situ des propriétés physiques des sols*. Annales des Ponts et Chaussées, Paris, n° 14, pp. 357-377.
21. PALMER A.C. (1972), *Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay : a simple interpretation of the pressuremeter test*. Géotechnique, vol. 22, n° 3, pp. 451-457.
22. PREVOST J.H., HOEG K. (1975), *Analyses of pressuremeter in strain-softening soil*. A.S.C.E., Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol. 101, n° 8, pp. 717-731.
23. ROY M., TREMBLAY M., TAVENAS F., LAROCHELLE P. (1982), *Development of pore pressures in quasi-static penetration tests in sensitive clay*. Revue canadienne de géotechnique, vol. 19, n° 2, pp. 124-138.
24. ROY M., JUNEAU R., LAROCHELLE P., TAVENAS F.A. (1975), *In situ measurement of the properties of sensitive clays by pressuremeter tests*. A.S.C.E., Proceeding of the Specialty Conference on in Situ Measurement of Soils Properties, Raleigh, N.C., vol. 1, pp. 350-372.
25. SALENÇON J. (1966), *Expansion quasi statique d'une cavité à symétrie sphérique ou cylindrique dans un milieu élasto-plastique*. Annales des Ponts et Chaussées, Paris, 3, pp. 175-187.
26. TAVENAS F.A., BLANCHETTE G., LEROUÉIL S., LAROCHELLE P. (1975), *Difficulties in the in situ determination of K_0 in soft sensitive clays*. A.S.C.E., Proceedings of the Specialty Conference on in Situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, N.C., vol. 1, pp. 450-476.
27. VANWANBEKE A., d'ENRICOURT J. (1971), *Courbes pressiométriques inverses : Méthode d'interprétation de l'essai pressiométrique*. Publication de l'École Royale Militaire de Bruxelles.
28. VESIC A.C. (1972), *Expansion of cavities in an infinite soil mass*. A.S.C.E., Journal of the Geotechnical Engineering, vol. 98, 3, pp. 265-290.
29. WROTH C.P., HUGHES J.M.O. (1973), *An instrument for in situ measurement of the properties of soft clays*. Comptes rendus du VIII^e Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Moscou, vol. 1, pp. 487-494.