

Le Géomécamètre, un nouvel essai in situ adapté à la mesure des caractéristiques hydro-mécaniques du sol

The Geomechameter test, a new in-situ apparatus adapted to the measurement of the hydro-mechanical characteristics of the soil

Monnet J.
UJF-Grenoble 1 CNRS UMR 5521, Laboratoire 3SR, Grenoble

RÉSUMÉ : Un nouvel appareil d'essai in situ, le Géomécamètre a été conçu et construit. Cette évolution du pressiomètre utilise les forces produites par un écoulement d'eau vertical descendant autour de la sonde de mesure pour générer un champ de gravité artificiel. Cet écoulement hydraulique permet de régler la contrainte effective verticale au niveau de la sonde de mesure. L'influence de cette contrainte est prise en considération dans l'interprétation des résultats de l'essai. À l'origine conçu pour la caractérisation mécanique des sols et notamment pour la mesure indépendante des caractéristiques de résistance (cohésion c , angle de frottement ϕ) des caractéristiques de déformation (module d'élasticité E), l'appareil a été modifié pour la mesure de la perméabilité (coefficient k) et de la sensibilité à l'érosion du sol. Cette nouvelle version de l'appareil de 2004 est équipée de la saisie numérique pour la pression, pour le déplacement radial de la membrane et d'une caméra vidéo pour la mesure de turbidité. Un des avantages de cet appareil est la mesure simultanée des principales caractéristiques hydro-mécaniques du sol, notamment dans les digues et des remblais. Le sable fin d'Hostun a été choisi comme matériau de référence pour l'étude expérimentale du modèle réduit testé en laboratoire. Les limons de l'Isère ont été choisis pour expérimenter le prototype de ce nouvel appareil d'essai in situ. Les résultats des mesures au géomécamètre sont validés par la comparaison aux résultats de l'essai triaxial pour les caractéristiques mécaniques et à l'essai Lefranc pour la perméabilité. Cette expérimentation est développée au sein du Projet national Erinoh.

ABSTRACT: A new in situ testing apparatus, the Geomechameter, has been designed and built. It is an evolution of the pressuremeter, using the forces generated by water flow around the measurement probe. The hydraulic flow allows to control the level of the vertical stress at the test level. The influence of this stress is taken into account in the interpretation of the test results. Originally designed for the soil mechanical shearing resistance (cohesion c and friction angle ϕ), deformation resistance (Young modulus E), the apparatus was modified for the measurement of the permeability (coefficient k) and the sensibility to erosion. This new version of the 2004 apparatus is equipped with numerical gauge for pressure and radial displacement and video camera for turbidity measurement. One of its interests is the simultaneous measurement of the main hydro-mechanical characteristics of the soil inside the soil mass, for the dams and embankments. Hostun thin sand was chosen as a material to undergo the experimental study in laboratory. Isère loam was chosen to experiment the model of this in-situ apparatus. Results of the geomechameter are validated by comparison of mechanical characteristics obtained by the triaxial test and by the Lefranc injection test for the permeability. This experiment is developed with the help of the Erinoh project.

MOTS CLEFS : Erosion interne, essais in situ, modélisation numérique, pressiomètre

KEYWORDS: Internal Erosion, In-Situ Test, numerical modelling, Pressuremeter

1 INTRODUCTION

L'essai pressiométrique peut être considéré comme un essai de cisaillement entre les contraintes radiales et circonférentielles dans la condition de déformation plane, avec la contrainte verticale qui est la contrainte normale appliquée sur le plan de cisaillement (Baguelin et al., 1978). La limite théorique de l'essai pressiométrique est liée au fait que la contrainte verticale est donnée par le poids des terres au repos. Ce test peut être considéré comme un essai de cisaillement unique et il peut être utilisé pour déterminer soit l'angle de frottement interne (Hughes et al., 1977 ; Monnet, 1990 ; Monnet & Khlif, 1994 ; Monnet, 2012) ou la cohésion du sol ; il peut être utilisé aussi dans la conception des travaux de génie civil (Monnet & Allagnat, 2002). Lorsque la cohésion et l'angle de frottement interne sont déterminés conjointement, ils sont reliés entre eux dans l'interprétation du pressiomètre, si bien que la valeur de la cohésion dépend de l'angle de frottement interne.

L'essai au Géomécamètre a plusieurs avantages.

- Il contrôle le niveau de contrainte 3D autour de la sonde. Le principe de l'essai au Géomécamètre est de créer un gradient hydraulique (Figure 1) pour contrôler la contrainte verticale en la réglant à une valeur appropriée. Ce nouvel appareil règle la

contrainte radiale et circonférentielle par l'expansion de la sonde. Il permet le contrôle de l'état tridimensionnel des contraintes autour de la sonde, à la paroi du forage.

- Il permet la mesure de la cohésion et de frottement. Une série de trois essais réalisés avec trois valeurs différentes du gradient hydraulique externe i (Eq.3) permet d'imposer trois contraintes verticales différentes. Ces trois contraintes verticales correspondent à trois courbes différentes d'expansion radiales qui sont autant de courbe de cisaillement différentes. Ceci permet de déterminer cohésion et l'angle de frottement interne. Cette possibilité de mesure locale du couple cohésion-frottement est d'un grand intérêt en Génie Civil.

- Il permet la mesure du coefficient de perméabilité et du coefficient de consolidation. Le pressiomètre peut également mesurer la dissipation de la pression interstitielle autour du forage lorsque la consolidation est atteinte dans un délai d'une heure ou plus (Clarke et al., 1979). Le Géomécamètre améliore cette mesure par une détermination simultanée du module de cisaillement et de la perméabilité et n'a pas besoin d'attendre jusqu'à la consolidation finale.

- Il permet la mesure du risque de l'érosion interne du sol dans les barrages et les digues. Ce risque aussi appelé suffusion résulte des exfiltrations. La suffusion semble être la principale

cause des incidents hydrauliques observés sur les barrages et les digues. Sur l'ensemble des barrages qui présentent des dommages ou des ruptures, dans 46% des cas on trouve un phénomène d'érosion interne (Foster et al. 2000). En France, 70 cas critiques ont déjà été détectés.

Dans cet article, nous présentons la nouvelle version du Géomécamètre qui a été adapté pour la mesure de la suffusion du sol dans les digues. Pour valider les principes théoriques de fonctionnement du Géomécamètre, il est nécessaire d'utiliser un sol standard qui est connu, homogène et dont l'état initial est parfaitement défini. Tous ces paramètres peuvent être mesurés dans une chambre d'étalonnage. L'essai de ce nouveau dispositif est réalisé avec une démarche qualité où chaque étape est soigneusement contrôlée. L'essai en chambre d'étalonnage est la première opération de contrôle qu'il est nécessaire d'effectuer. Nous présentons une première série de test de validation de l'appareil dans des conditions réelles in-situ.

2 DESCRIPTION DU GEOMECAMETRE

2.1 La sonde du géomécamètre

Le prototype de la sonde Géomécamètre est constitué de six modules différents.

- Le module 0 relie la tige de forage à la sonde.
 - Le module 1 : le packer supérieur isole la circulation hydraulique autour de la sonde de la partie supérieure du forage.
 - Le module 2 : il a deux fonctions différentes, l'injection de l'eau dans le sol et la mesure de la turbidité de l'eau extraite à la base de la sonde.
 - Le module 3 : c'est la partie centrale de la sonde. Ses fonctions consistent à imposer une pression contrôlée au forage par l'expansion d'une membrane par l'expansion radiale au niveau de la sonde.
 - Le module 4 : c'est la cellule de pompage qui sert à extraire l'eau du sol.
 - Le module 5 : le packer inférieur qui isole la circulation hydraulique autour de la sonde du bas du forage.
- La sonde doit répondre à plusieurs spécifications :
- Il doit être possible de démonter les différentes parties pour les besoins d'entretien de l'appareil (changement de membrane,...).
 - L'indépendance des quatre circulations liquides doit être assurée, notamment au niveau des liaisons entre les modules (pompage, injection, pression de l'air, la pression de l'eau).
 - La mesure des pressions, des déformations, des débits, de la turbidité, doit être réalisée numériquement et stockée sur micro-ordinateur.
 - L'expansion de la sonde, ainsi que la mesure de la déformation doit être possible jusqu'à la pression limite (doublement du rayon du forage).

2.2 Evolution de la sonde du géomécamètre

Cette nouvelle version du géomécamètre (Figure 2) permet de déterminer le risque de suffusion du sol, par la mesure de la turbidité de l'eau extraite, en utilisant une vidéo caméra embarquée dans le module 2.

3 ÉTUDE THÉORIQUE

3.1 Etude analytique : circulation hydraulique autour de la sonde géomécamètre

Le Géomécamètre (Figure1) est un appareil qui utilise le flux hydraulique autour d'une sonde gonflable pour augmenter localement la contrainte effective verticale dans le plan moyen de la sonde. La charge hydraulique diminue le long de la trajectoire lorsque l'eau se déplace dans le sol de la tête jusqu'au pied de la sonde. Une force est appliquée aux particules de sol dans la direction de l'écoulement. Dans l'essai au Géomécamètre, ces forces sont semblables à l'action des forces

de gravité. Cette action peut être considérée comme l'action inverse de l'écoulement de l'eau de boulangerie obtenu par la relation de Terzaghi (Eq.1) :

$$i_{crit} = (\gamma_{sat} - \gamma_w) / \gamma_w \quad (1)$$

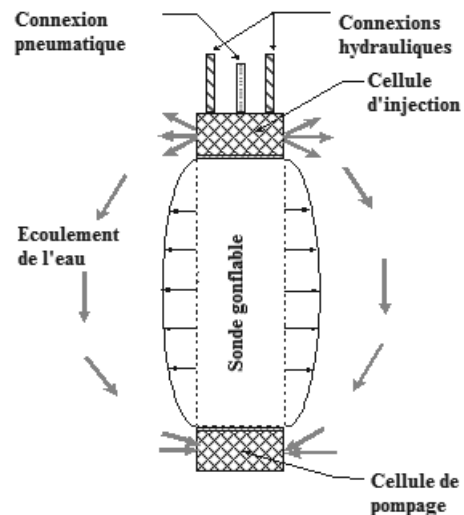


Figure 1: Le principe de l'essai géomécamétrique



Figure 2: Le Géomécamètre, version 3, juin 2012

Lorsque le coefficient de perméabilité est supérieur à 10^{-8} m/s, l'expansion de la sonde n'a aucune influence sur la pression d'eau interstitielle (Cambou et Bahar, 1993 ; Frank et Nagra, 1986) et la pression effective peut être utilisée, mais si le coefficient de perméabilité est inférieur à 10^{-10} m/s, le test ne peut pas être effectué car le sol devient non drainé. Une modélisation numérique de l'essai (Senouci et Monnet 1999) montre que dans une unité de volume du sol, la force appliquée par le débit hydraulique peut être estimée au moyen de la relation (Eq.2). Dans l'essai au Géomécamètre, l'eau est injectée dans le sol de la cellule d'injection à une pression d'injection (p_i). Après circulation dans le sol, l'eau est pompée par la cellule de

pompage avec une pression (p_p). Le gradient hydraulique (Eq.3) est obtenu par la différence entre la charge hydraulique à l'injection et au pompage. L'augmentation de la contrainte effective verticale (Eq.4) est associée à un écoulement hydraulique de gradient i dans le sol, au niveau de la sonde de longueur l_e . La contrainte verticale imposée au niveau de la sonde et la profondeur simulée sont ainsi trouvées (Eq.5-6):

$$\vec{F} = \vec{i} \cdot \gamma_w \cdot \Delta V \quad (2)$$

$$i = (H_i - H_p) / l_e \quad (3)$$

$$\delta \sigma_v' = (i \gamma_w) l_e / 2 \quad (4)$$

$$\sigma_v' = \gamma' \cdot Z_{sim} = (\gamma' + i \cdot \gamma_w) \cdot l_e / 2 + \sigma_{vi}' \quad (5)$$

$$Z_{sim} = (1 + i \cdot \gamma_w / \gamma') \cdot l_e / 2 + Z_i \quad (6)$$

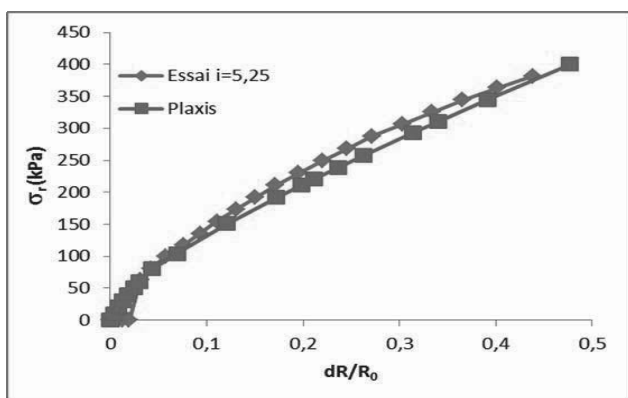


Figure 3: Comparaison entre les résultats numériques du Géomécamètre pour une profondeur simulée $Z_{sim}=2,74\text{m}$ et la courbe expérimentale correspondante avec $i = 5,25$ ($\gamma = 14,2 \text{ kN/m}^3$, $\sigma' = 50 \text{ kPa}$)

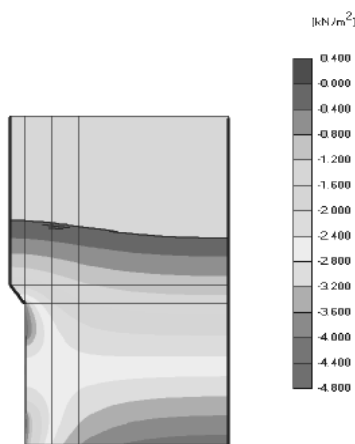


Figure 4 : Variation de la charge hydraulique autour de la sonde du Géomécamètre – résultat Plaxis

3.2 Etude numérique : Simulation de l'essai par Plaxis

La modélisation numérique (Senouci, Monnet 1999) par programme d'éléments finis Plaxis montre que la variation du gradient hydraulique calculé donne une variation de la contrainte verticale (Eq.5) qui permet de définir une profondeur simulée de la sonde (Eq.6). Les différences entre la courbe numérique trouvée par Plaxis à la profondeur simulée de 2,74 m (Eq.6) et la courbe expérimentale pour le gradient hydraulique correspondant ($i = 5,25$) sont très faibles (Figure 3).

La variation de charge hydraulique calculée par Plaxis dans la masse du sol (Figure 4) montre l'augmentation de la charge hydraulique imposée par la cellule d'injection (sur la gauche, à hauteur moyenne) et la décharge hydraulique imposée par la

cellule de pompage (à gauche en bas). On voit dans le plan médian que la charge hydraulique reste égale constante à $-2,6\text{m}$. Le gradient i (Eq.3) est donc constant dans le plan moyen, l'augmentation de contrainte (Eq.4) est également constante dans le plan moyen.

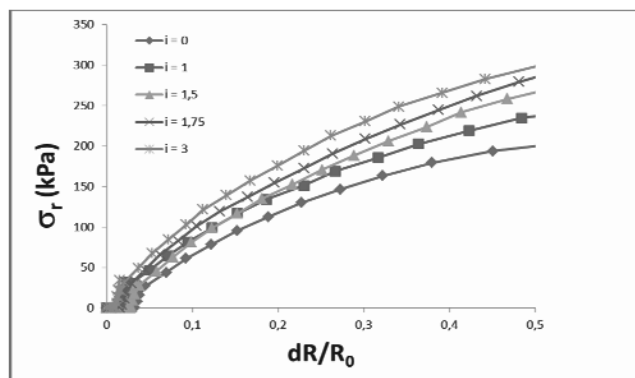


Figure 5 : Influence du gradient hydraulique sur l'expansion de la sonde du géomécamètre

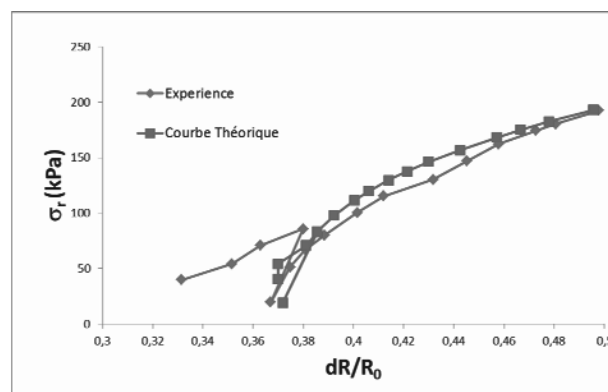


Figure 6 : Un exemple d'essai au Géomécamètre à 2,2m de profondeur

4 ÉTUDE EXPERIMENTALE

4.1 Essai au laboratoire – Vérification de l'influence du gradient hydraulique sur l'expansion de la sonde

Des essais ont été réalisés en chambre de calibration avec le sable d'Hostun au poids volumique de 16kN/m^3 (Figure 5). Ils montrent que la courbe d'expansion pour un gradient de 3 est au-dessus de la courbe sans écoulement. Le gradient hydraulique produit une augmentation de la rigidité apparente du sol qui peut être interprétée comme une augmentation de la contrainte verticale.

4.2 Essai in situ - Détermination des caractéristiques mécaniques

Des essais in situ ont été réalisés sur les digues de l'Isère (Figure 6). Pour l'essai présenté, le débit est d'environ 40 l/min avec 5 h de temps d'essai. Ce temps est nécessaire pour atteindre un débit stabilisé saturé, afin que la contrainte verticale soit modifiée par la sonde du géomécamètre. La simulation de la contrainte verticale est 119kPa pour une contrainte verticale au repos de 55kPa , ce qui correspond à une augmentation de 64kPa . L'essai au géomécamètre permet de mesurer, le module élastique 5MPa , sur le cycle déchargement rechargement. La comparaison avec les courbes d'expansion théoriques permet la détermination de la cohésion 5kPa et de l'angle de frottement $30,5^\circ$.

Des essais triaxiaux de contrôle ont été effectués sur des échantillons de limon recompressés en conditions drainées à la même densité. Les résultats sont indiqués (Tableau 1). On peut noter pour un niveau de contrainte (100kPa) proche de celui

imposée par le géomécamètre, un module de Young qui est très proche de la valeur mesurée in situ avec une différence de 10 %, une cohésion nulle et un angle de frottement 33,5° qui est légèrement plus grand de 3° que celui trouvé in situ. Cette différence peut être expliquée par le fait que l'échantillon triaxial est remanié, reconsolidé, et que cette procédure expérimentale a supprimé la cohésion.

4.3 Essais in situ - Détermination de la perméabilité

Le Géomécamètre permet de mesurer la perméabilité par la mesure du débit injecté, avec la relation de Ménard (Eq.7) :

$$k = \frac{\gamma_w Q}{2\pi l(p - p_0)} \left[\ln \frac{l}{r_0} + \frac{1}{2} \right] \quad (7)$$

L'essai au géomécamètre a été réalisé le long des berges de l'Isère, dans les limons sablonneux. Le coefficient de perméabilité obtenu est de $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s. Ces résultats peuvent être comparés avec les essais Lefranc (Tableau 2), qui ont été réalisés sur le même site pour le Symbhi. A l'exception du forage P250, la perméabilité moyenne mesurée par l'essai Lefranc est $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s et la perméabilité minimale est de $1,1 \cdot 10^{-6}$ m/s. La perméabilité mesurée par l'essai au géomécamètre se trouve dans l'échelle des valeurs de l'essai Lefranc, mais proche de la valeur minimale mesurée. D'autres expériences doivent être réalisées pour confirmer et expliquer une telle différence.

Tableau 1 : Résultats de l'essai triaxial sur un échantillon remanié reconsolidé des Limons de l'Isère

σ'_3 kPa	E MPa	ν	c' kPa	ϕ degré
60	2,7	0,47		
100	4,5	0,42	0	33,5°
200	10	0,3		
300	18,9	0,28		

Tableau 2 : Résultats de l'essai Lefranc test réalisés sur les digues de l'Isère

Profils	Profondeur m	k m/s
P 252	2	$2,8 \times 10^{-5}$
P 252	4	$6,6 \times 10^{-6}$
P 250	3	$1,1 \times 10^{-6}$
P 248	2	$> 10^{-3}$
P 248	5,8	$6,6 \times 10^{-6}$
P 248	7,5	$1,1 \times 10^{-5}$

4.4 Détermination de la suffusion

La micro caméra utilisée sur le Géomécamètre a été calibrée avec différentes concentrations de sol érodé. La densité en couleur rouge a été utilisée pour la turbidité de l'eau. Le système a été calibré dans un réservoir rempli d'un mélange de sable et de gravier, et la turbidité de l'eau des effluents a été mesurée. Il semble qu'une suffusion apparaisse pour un gradient hydraulique environ 3. Après une valeur d'un gradient hydraulique de 6, l'analyse de l'image montre que l'eau est claire, mais que parfois certaines particules passent devant la caméra et modifient la valeur de la densité de couleur rouge (Figure 7). Les essais de juin 2012 n'ont pas permis de réaliser correctement la mesure in situ. De nouveaux essais sont programmés pour juin 2013.

5 CONCLUSION

Un nouvel appareil de mesure in situ a été construit pour tester le sol dans des conditions de contrainte tridimensionnelle. Le modèle réduit du géomécamètre a montré sa capacité à augmenter la contrainte verticale autour de la sonde pendant l'expansion de la sonde. Ces conditions ont permis de déterminer les caractéristiques de cisaillement des limons de l'Isère en élasticité, cohésion, frottement avec une bonne précision. L'injection de l'eau produite par le géomécamètre a permis de mesurer la perméabilité du limon.

La sonde du Géomécamètre sera équipée d'une micro caméra vidéo pour la mesure de la turbidité de l'eau extraite et ainsi détecter le seuil de suffusion à l'intérieur des massifs de sols comme les digues.

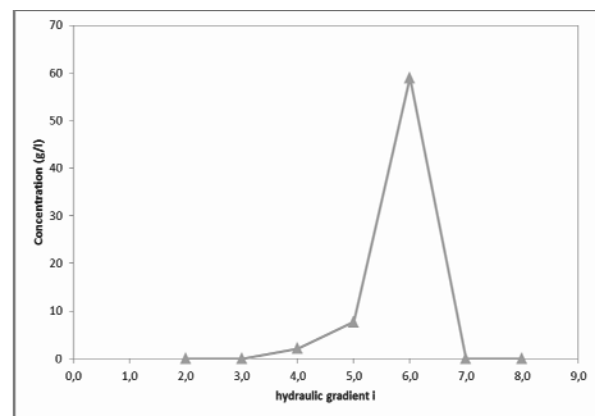


Figure 7 : Mesure de la suffusion entre un point d'injection et un point de pompage

6 RÉFÉRENCES

- Baguelin F, Jézéquel J.F., Shield D.H., 1978, The pressuremeter and foundation engineering, *Series on Rock and Soil Mechanics, Vol. 2, Trans. Tech. Publication, 335-406.*
- Cambou B., Bahar R., 1993, L'utilisation de l'essai pressiométrique pour l'identification de paramètres intrinsèques du comportement du sol, *Revue Française Géotechnique* (N°63): 39-53.
- Clarke B.G., Carter J.P., Wroth C.P., 1979, In-situ determination of the consolidation characteristics of saturated clays, *Proc. 5th Europ. Conf. SMFE, Brighton, Vol.2, 207-213.*
- Foster M., Fell R., Spannagle M., 2000, The statistics of embankment dam failure and accidents, *Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, pp. 1000-1024*
- Frank R., Nahra R., 1986, Contribution numérique et analytique à l'étude de la consolidation autour du pressiomètre, *Rapport recherche LCPC* (N°137)
- Hughes J.M.O., Wroth C.P., Windles D., 1977, Pressuremeter tests in sand, *Geotechnique, Jnl 27* (N° 4): 455-477.
- Monnet J, 1990, Theoretical study of elasto-plastic equilibrium around pressuremeter in sands, *Proc. 3rd Int. Symp. Pressuremeter, Oxford, 137-148.*
- Monnet J., Allagnat D. 2002, Design of a large soil retaining structure with pressuremeter analysis, *Geotechnical Engineering 155, Issue 1, 71-78.*
- Monnet J., Khelif J, 1994, Etude théorique de l'équilibre élastoplastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre, *Revue Française Géotechnique* (N°67): 71-80
- Monnet J., 2012, An Elasto-Plastic analysis of the Pressuremeter Test in Granular Soil – part 1: theory, *European J. of Environmental and Civil Engineering, Vol.16, N°6, June 2012, 699-71*
- Senouci S.M., Monnet J, 1999, Modélisation numérique du Géomécamètre, *Revue Française de Géotechnique* (N°88): 21-35.