

DIMENSIONNEMENT D'UN GRAND MUR DE SOUTÈNEMENT PAR RECONNAISSANCE PRESSIOMÉTRIQUE*

JACQUES MONNET

LIRIGM, Univ. Joseph Fourier, BP 53, 38041, Grenoble, France, Jmonnet@ujf-grenoble.fr

DOMINIQUE ALLAGNAT

SCETAUROUTE, 2, rue Docteur Schweitzer, 38180, Seyssins, France

Streszczenie: Autostrada A51 biegnie wzdłuż rzeki Isère blisko Tèche, między Grenoble a Valence, i dlatego potrzebny jest tam duży mur oporowy. Konstrukcję tę zrobiono, opierając się na pomiarach presjometrycznych. Testy presjometryczne przeprowadzono, korzystając z sondy, którą wciskano w glebę. Nowej teorii presjometrycznej użyto, aby określić wewnętrzny kąt tarcia gliny. Otrzymane wyniki umożliwiły przystosowanie muru do środowiska geotechnicznego i oszacowanie wewnętrznego kąta tarcia.

Résumé: Pour passer le long de l'Isère, il a été nécessaire de construire un grand mur de soutènement à Tèche, sur l'autoroute A51 entre Grenoble et Valence. Cet ouvrage est constitué de murs voiles ancrés à leurs niveaux supérieurs. Le dimensionnement a été réalisé à partir d'une campagne d'essais pressiométriques lanternés et battus dans le sol. Ces essais ont été interprétés avec une nouvelle théorie pour trouver l'angle de frottement interne des limons glaciaires. Les résultats ont permis d'adapter l'ouvrage à son environnement géotechnique ce qui a permis de mieux cerner l'angle de frottement in situ.

Abstract: The A51 motorway is going along the river Isère near Tèche, between Grenoble and Valence and a large retaining wall was needed. This is an anchor wall. The design was made based on pressuremeter measurement. The pressuremeter tests were carried out with lantern probe that was pushed in the soil by dynamic driving. A new pressuremeter theory was used for finding the internal angle of friction of the loam. The results allowed the adjustment of the wall to the geotechnical environment and to evaluate the internal angle of friction.

Резюме: Автострада A51 протскает вдоль реки Изеры, вблизи Теше, между Гренобль и Валенс, и поэтому там нужна большая подпорная стенка. Эту конструкцию выполнили, ссылаясь на напорнометрические измерения. Напорнометрические тесты были проведены с использованием зонда, который вдавливали в почву. Новую напорнометрическую теорию использовали для определения внутреннего угла трения глины. Полученные результаты дали возможность приспособления стенки к геотехнической среде и оценки внутреннего угла трения.

* The paper presented at the French-Polish Colloquium on Applied Mechanics of Soils and Rocks held in Paris on July 3-4th, 2000.

1. INTRODUCTION

Le dimensionnement des grands murs de soutènement est un judicieux équilibre entre les règles de sécurité à appliquer pour prévenir la rupture ou les grands déplacements et le budget d'investissement dans la construction qui doit être le plus économique possible. Pour ce type d'ouvrage, les caractéristiques de cisaillement du sol sont des paramètres extrêmement sensibles, si bien que de petites variations sur les hypothèses de cohésion ou d'angle de frottement conduisent à des grandes variations sur les efforts que doit supporter la structure. La méthode usuelle d'investigation est de prélever des échantillons de sol intacts qui seront ensuite testés au laboratoire. Malheureusement certains sols ne sont pas prélevables comme les graves dont la taille maximum des grains n'est pas compatible avec la petite dimension des échantillons à mettre en œuvre sur les presses triaxiales.

L'analyse pressiométrique est alors d'un grand secours car elle permet de caractériser de tels sols en respectant leur structure naturelle. Dans cette étude les dépôts fluvio-glaciaires ont été supposés non cohérents. Les courbes pressiométriques étant liées à la fois au module élastique de cisaillement G et à l'angle de frottement interne Φ , un cycle de déchargement rechargement a été réalisé pour séparer le comportement élastique du comportement plastique. L'angle de frottement interne est ensuite mesuré par la pente de la relation linéaire entre les logarithmes des pressions et des déformations radiales au forage (CLARK et GAMBIN [1], HUGHES et al. [3]) et les caractéristiques mécaniques sont contrôlées par la comparaison entre les courbes pressiométriques expérimentale et théorique, mais aussi par la valeur des pressions limites expérimentale et théorique (MONNET [5], MONNET et KHLIF [6]). Le dimensionnement du mur de soutènement de Tèche sur l'autoroute A49 entre Grenoble et Valence a été réalisé avec l'angle de frottement déterminé au pressiomètre, ce qui a permis de mieux cerner l'angle de frottement in situ. L'autoroute est en service depuis 1991, et le suivi du mur ne montre aucun désagrément.

2. DESCRIPTION DU PROJET

L'autoroute A49 (Grenoble Valence) permet d'assurer la continuité des autoroutes alpines, concédées à la société des autoroutes Rhône-Alpes (AREA), avec l'autoroute de la vallée du Rhône. L'autoroute A49 implantée sur les plateaux bordant l'Isère depuis Grenoble doit franchir à flanc de coteau un verrou de près de 1300 m de long dans le secteur de Tèche. Le versant de Tèche marque un resserrement de la vallée de l'Isère en rive droite et un point de passage imposé pour le tracé autoroutier. Ce secteur a une pente de 30 à 40°.

2.1. CADRE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL

La géologie du site est relativement simple dans son ensemble; le substratum molassique (Liocène), sub-affleurant dans les zones de ravinement est recouvert par des dépôts fluvio-glaciaires hétérogènes et d'épaisseur très variable appartenant à la « terrasse de Saint Marcel les Valences ». A l'aval du projet côté Nord une terrasse alluviale ennoie le pied du versant.

2.2. DESCRIPTION GÉOTECHNIQUE DES TERRAINS

Les terrains présentent ici des faciès assez hétérogènes, surtout ceux constituant la couverture, le substratum molassique restant relativement homogène. Il s'agit d'un site de versant où les dépôts ont subi de nombreux remaniements (ravinement, altération du substratum ...) consécutifs aux variations de niveau de l'Isère lors du retrait des glaciers. On peut donc distinguer les sept faciès suivants, *graves argileuses et argiles graveleuses rouges* 0/150 mm, rencontrées en surface sur une épaisseur d'ordre métrique, *graves sableuses* 0/150 mm, à faible matrice argileuse plastique enrobant les galets et pouvant contenir de gros blocs. Ce faciès représente environ 75% des terrains meubles, *graves argileuses* 0/150 mm, de couleur blanc-gris et présentant une certaine cohésion. Les épaisseurs sont parfois importantes et se présentent sous forme de lentilles aléatoires au sein de la formation précédente, *poudingues de cimentation variable* de granulométrie 0/150 mm voire 0/80 mm en lentilles de faible épaisseur (<0,5 m) mais d'extension pouvant atteindre une dizaine de mètres, *graves crues* 0/150 mm ou graviers 0/60 mm, généralement associés aux poudingues et constituant leur base. Ce faciès est également lenticulaire, *sables et graves ou graviers* alternant en petits bancs de 0,20 à 0,40 m d'épaisseur correspondant à des conditions de dépôts particulières, *sables gris homogènes* plus ou moins grossiers, présents localement en forte épaisseur.

Le substratum molassique se présente sous le faciès classique de sables jaunâtres plus ou moins cimentés, très monotones admettant localement de très fins joints d'argile beige (1 à 10 mm) ainsi que des niveaux lenticulaires franchement grésifiés épais de 0,15 à 0,20 m. Il n'a pas été observé de faille malgré la proximité des chaînons calcaires sub-alpins.

Pour l'hydrogéologie du site, on peut noter que les ravines visibles sur le versant correspondent à des venues d'eau ponctuelles lors de très fortes précipitations à la faveur de lentilles plus graveleuses et perméables au sein des dépôts fluvio-glaciaires. Les formations fluvio-glaciaires sont le siège de petites nappes perchées se vidangeant très rapidement.

2.3. LES RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

Les reconnaissances géotechniques se sont déroulées en plusieurs phases successives avec les moyens suivants, *sondages électriques et sismiques, sondages destructifs avec enregistrement des paramètres* et à la tarière, *sondages carottés, sondages pressiométriques standards et avec cycles de charge décharge*, notamment dans la mollasse, *sondages pelle araignée* et puits de reconnaissance afin de préciser la nature et les caractéristiques des sols.

Nous ne détaillerons pas ici l'ensemble des résultats des essais in situ et en laboratoire, et nous nous attacherons principalement à la problématique posée pour l'évaluation des caractéristiques de cisaillement des sols grossiers constitués par les dépôts fluvio-glaciaires. Il a été décidé de privilégier les essais pressiométriques pour les raisons suivantes, c'est un essai in situ qui respecte la structure du sol, réalisable même dans les sols à forte granulométrie, qui permet de déterminer le module élastique de cisaillement G , qui permet de déterminer l'angle de frottement interne Φ (ou C_u), réalisable à la fois dans le plan horizontal et vertical.

3. THEORIE PRESSIOMETRIQUE

3.1. HYPOTHÈSES

Le sol a un comportement élastique linéaire de module G avec une plasticité non standard d'angle de frottement interne Φ , d'un angle de dilatance Ψ lié au frottement intergranulaire Φ_μ par la relation (MONNET et GIELLY [4]):

$$\Psi = \Phi - \Phi_\mu. \quad (1)$$

Trois zones de comportements différents sont prises en compte depuis le forage:

- Au contact du pressiomètre, il apparaît une plasticité entre la contrainte circonférentielle σ_θ et la contrainte radiale σ_r , dans le plan horizontal, entre les rayons a (du forage) et b limite de cette première zone plastique. Ceci donne le rapport de proportionnalité entre les contraintes et les déformations plastiques:

$$N = \sigma_\theta / \sigma_r = (1 - \sin \Phi) / (1 + \sin \Phi), \quad (2)$$

$$n = -d\varepsilon_r^p / d\varepsilon_\theta^p = (1 - \sin \Psi) / (1 + \sin \Psi). \quad (3)$$

- Au-delà, il peut apparaître une nouvelle zone plastique entre la contrainte circonférentielle σ_θ et la contrainte verticale σ_z , dans le plan vertical, entre les rayons b et c limite des zones plastiques.

- Une zone élastique plus large entoure tout l'ensemble, au-delà du rayon c .

Les contraintes sont effectives et négatives en compression.

L'équilibre dans le plan horizontal est vertical est pris en compte.

3.2. EQUILIBRE ÉLASTO-PLASTIQUE GÉNÉRAL

Quand deux zones plastiques existent, la relation générale d'équilibre entre contrainte et déformation au niveau du forage qui représente l'expression théorique pressiométrique est la suivante (MONNET et KHLIF [6]):

$$\text{Ln} \left[\frac{u_a}{a} \cdot (1+n) - C_1 \right] = \alpha \cdot \text{Ln}(-p) - \alpha \cdot \text{Ln}(\gamma \cdot z) + \text{Ln} \left[(1 - K_0) \gamma \cdot z \cdot \frac{(1+n)}{2.G} - C_1 \right] \quad (4)$$

avec

$$\alpha = \frac{1+n}{1-N} \quad \text{et} \quad C_1 = \frac{n \cdot \left(\frac{u_a}{a} \right) \cdot (1+n) \left(\frac{-\gamma \cdot z}{p} \right)^\alpha + (1+n)(N - K_0) \frac{\gamma \cdot z}{2.G}}{1+n \left(\frac{-\gamma \cdot z}{p} \right)^\alpha} \quad (5)$$

La valeur de C_1 est très petite, et peut être négligée. Dans ces conditions, la relation (4) montre qu'il existe une linéarité entre les logarithmes de la pression appliquée au forage et de la déformation radiale au forage. Cette linéarité avait déjà été trouvée précédemment (HUGHES et al. [3]) mais sans définir totalement la courbe pressiométrique. La pente α de la relation linéaire est une fonction de l'angle de frottement interne Φ et de l'angle de frottement intergranulaire Φ_μ . La connaissance de Φ_μ et de α permet alors de déterminer directement l'angle de frottement interne. Pour une seule zone plastique, on a:

$$\text{Ln} \left[\frac{u_a}{a} \cdot (1+n) - C_1 \right] = \alpha \cdot \text{Ln}(-p) - \alpha \cdot \text{Ln} \left[\frac{2 \cdot K_0 \cdot \gamma \cdot z}{(1+N)} \right] + \text{Ln} \left[K_0 \cdot \gamma \cdot z \cdot \frac{(1-N)(1+n)}{2.G(1+N)} - C_1 \right] \quad (6)$$

avec:

$$C_1 = \frac{K_0 \cdot \gamma \cdot z + (1-N)(n-1)}{2.G(1+N)} \quad (7)$$

La proportionnalité entre les logarithmes des contraintes et des déformations au niveau du forage est également trouvée. La différence de comportement entre deux ou une zone plastique est liée à la valeur de la contrainte radiale pour le rayon c externe aux deux zones plastiques. Dans le second cas, la contrainte radiale doit être plus petite que la contrainte verticale $\sigma_{rc} < \sigma_z$ et ceci conduit à la condition trouvée précédemment par WOOD et WROTH [8]

$$K_0 \geq \frac{1}{(1 + \sin \phi)} \quad (8)$$

3.3. PRESSION LIMITE CONVENTIONNELLE

Lorsque l'on atteint la pression limite, la cavité double de volume, et la déformation radiale devient alors égale à $\sqrt{2} - 1$. Cette dernière valeur est introduite dans la formule (4) ce qui permet de trouver alors la pression limite conventionnelle Ménard:

pour deux zones lastiques:

$$P_l = \gamma \cdot z \cdot \alpha \sqrt{\frac{[(1+n) \cdot (\sqrt{2}-1) - C_1] \cdot 2 \cdot G}{[(1-K_0) \cdot (1+n) \cdot \gamma \cdot z - 2 \cdot G \cdot C_1]}} \quad (9)$$

pour une zone plastique

$$P_l = \frac{2 \cdot K_0 \cdot \gamma \cdot z}{(1+N)} \cdot \alpha \sqrt{\frac{[(1+n) \cdot (\sqrt{2}-1) - C_1] \cdot 2 \cdot G \cdot (1+N)}{K_0 \cdot \gamma \cdot z \cdot [(1-N) \cdot (1+n) - 2 \cdot G \cdot C_1 \cdot (1+N)]}} \quad (10)$$

Dans ces deux relations on trouve une proportionnalité entre la pression limite P_l et la valeur de la contrainte verticale, le module de cisaillement, et la variable n qui est liée à la fois à l'angle de frottement mais aussi la dilataance.

4. ETUDE EXPÉRIMENTALE

4.1. LE SOL DE TÈCHE

Le sol est une grave fluvio-glaciaire constitué de particules arrondies dont la granulométrie s'échelonne entre 0,1 et 150 mm. La distribution des grains est la suivante: $D_{60} = 30$ mm, $D_{10} = 0.2$ mm, $D_{60}/D_{10} = 15$, tamisat à 20 mm 43%, 2 mm 14%, 0,08 mm 6,5%.

4.2. LES ESSAIS TRIAXIAUX

Les essais sont faits sur des échantillons remaniés, reconstitués, de diamètre 7 cm et de hauteur 14 cm. Les particules de diamètre supérieur à 5 mm ont été tamisées, et le sol a été compacté jusqu'à la densité de 1,80. Le sol a été saturé et la pression latérale appliquée. Quatre heures plus tard, la consolidation est obtenue et le cisaillement peut commencer à la vitesse de 0,11 mm par minute. Le drainage est laissé libre pendant le cisaillement et la mesure du volume se fait par l'intérieur de l'échantillon. Les caractéristiques mécaniques triaxiales sont indiquées sur le tableau 1.

Tableau 1

Les caractéristiques mécaniques déduites des essais triaxiaux

Pression latérale	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa	Moyenne
Module de Young (kPa)	2840	16040	15390	19540	13220
Coefficient de Poisson	0,406	0,284	0,340	0,317	0,344
Angle de frottement intergranulaire	29,4°	30,0°	30,0°	27,6°	29,2°
Cohésion (kPa)					0
Angle de frottement					38,9°

4.3. ESSAIS PRESSIOMÉTRIQUES

4.3.1. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Le pressiomètre est lanterné battu, avec un tube de 800 mm de fente, de 60 mm de diamètre externe et de 49 mm de diamètre interne. La sonde possède deux cellules de garde de 110 mm de long gonflées à l'air et une cellule de mesure de 420 mm gonflée à l'eau. Deux essais de calibrations ont été faits pour chaque forage, le premier en dilatation d'appareillage par insertion de la sonde lanternée dans un tube d'étalonnage, le second en pression de membrane par mesure de l'expansion libre de la sonde selon la Norme Française [7]. Une correction est réalisée sur la pression pour tenir compte de la différence entre le rayon où la pression s'applique (à l'intérieur du tube fendu) et celui où le sol réagit (à l'extérieur du tube fendu). Une correction additionnelle est faite sur les volumes pour tenir compte de la déformée en poutre encastree de la lanterne (GAIA TECH [2]).

4.3.2. ANALYSE PRESSIOMÉTRIQUE

Les formules (4), (6) montrent que les courbes pressiométriques dépendent à la fois du module élastique G et de l'angle de frottement interne Φ . Pour séparer l'influence de ces deux variables, il a été réalisé des essais à cycle qui permettent de déterminer indépendamment le module G (figure 2). L'angle de frottement interne Φ est mesuré par la pente de la relation linéaire (voir figure 1) entre les logarithmes des pressions et déformations radiales mesurées au forage. Cette linéarité dépend du frottement intergranulaire Φ_μ mesuré sur les essais triaxiaux remaniés reconsolidés. Le contrôle des caractéristiques mécaniques est fait par la superposition des courbes expérimentales et théoriques (figure 2), mais aussi par la comparaison des pressions limites expérimentales et théoriques (tableau 2).

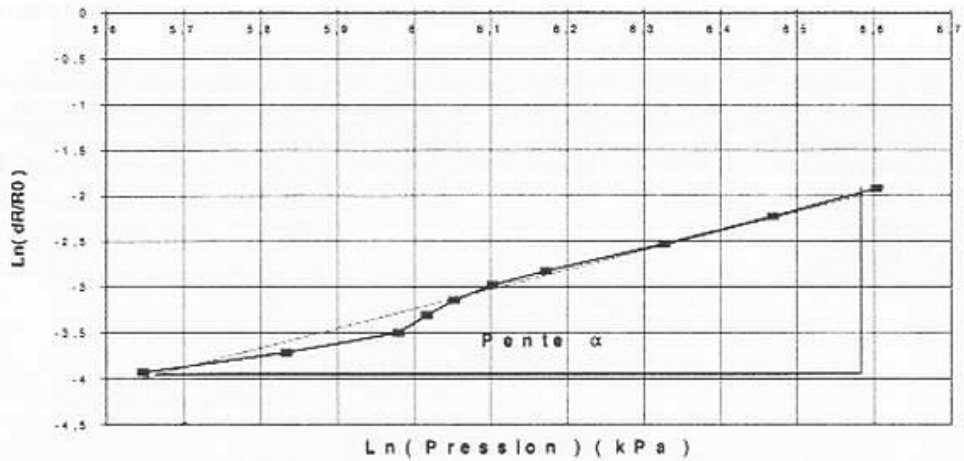


Fig. 1. Mesure de l'angle de frottement interne par la pente de la relation logarithmique entre les pressions et les déformations radiales au forage à 9 m de profondeur

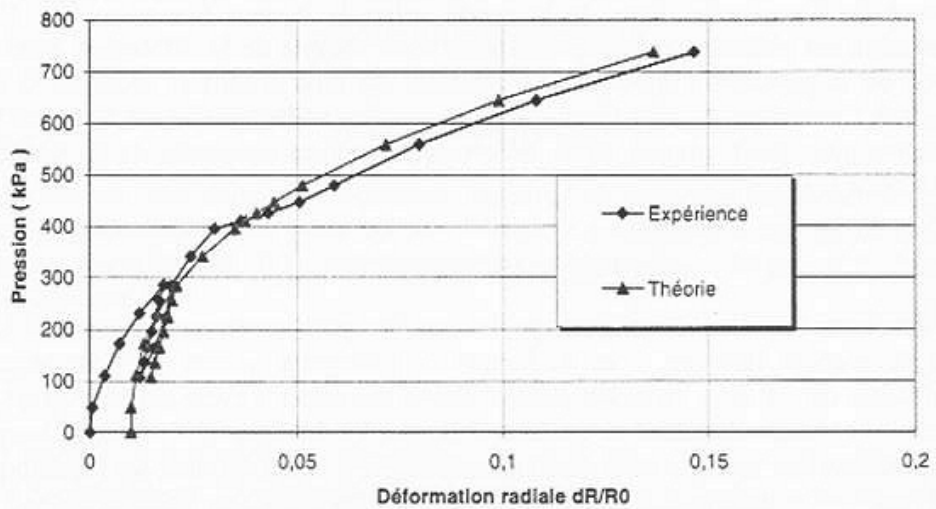


Fig. 2. Contrôle des caractéristiques mécaniques par comparaison des courbes expérimentales et théoriques à 9 m de profondeur

Tableau 2

Résultats de l'analyse pressiométrique

Forage	Profondeur (m)	Module pressiométrique (MPa)	Module élastique (MPa)	Pression limite expérimentale (kPa)	Pression limite théorique (kPa)	Angle de frottement
P214	2	6,3	21,4	1230	1200	52°
	12	39,6	134,6	4440	4235	42°
	14	25,8	87,6	3525	3515	41°
	16	22,8	77,7	3980	4145	44°
	17	29,7	101	3375	3360	37°
	19	46,0	156,4	4580	4850	39°
P214 bis	9	16,8	57,2	2150	2170	42°
	14	19,7	67	2945	2865	43°
	15	9,2	31,2	1090	1135	31°
P211	2	19,6	67,5	2470	2470	52°
	4	22,4	76	4220	4400	56°
	6	32,2	109,6	3870	3725	47°
	8	23,6	80,2	3865	4000	49°
	10	8,8	30,1	1945	2030	44°
	14	13,6	46,2	2865	2980	44°

5. CONCEPTION GEOTECHNIQUE DES OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

La forte pente transversale du terrain naturel impose la réalisation de chaussées dénivelées pour optimiser la hauteur des déblais et des remblais permettant ainsi un meilleur équilibre des masses dans le versant. En conséquence, les déblais amont sont réalisés sub-verticalement et stabilisés par des murs ancrés. Les soutènements intermédiaires aux deux chaussées sont réalisés par des murs verticaux en terre armée. A l'aval, des murs en terre armée permettent également de réaliser un soutènement vertical. Localement la stabilité générale de ces murs doit être renforcée par une poutre ancrée. La longueur totale de l'ouvrage est de 1150 m.

Les nombreux sondages réalisés sur le site de Tèche ont permis de classer les dépôts fluvioglaciers en sept catégories. Toutefois, ces formations se présentent en général sous forme lenticulaire et il n'est pas rationnel de distinguer ces différents matériaux par leurs caractéristiques de cisaillement. Ils peuvent être représentés globalement par les graves sableuses légèrement polluées. En outre, le prélèvement d'échantillons intacts dans ce type de matériaux est pratiquement impossible compte tenu de leur caractère pulvérulent. Aussi, les caractéristiques de cisaillement des matériaux graveleux ont été estimées par des essais triaxiaux spéciaux et l'analyse des essais pressiométriques selon la méthodologie présentée précédemment. Cette interprétation conduit, compte tenu de la dispersion attendue

des résultats, à retenir un angle de frottement interne correspondant à la moyenne des valeurs trouvées au pressiomètre ($44,2^\circ$) moins un écart type ($6,1^\circ$) soit 38° . En définitive, tous les calculs de stabilité générale à la rupture ont été conduits avec un angle de frottement de 35° et sans cohésion. La valeur de 35° tient compte de la présence de niveaux plus argileux ou moins compacts, sous forme de lentilles, pour lesquels il n'est pas possible de déterminer à priori d'extension géométrique précise. D'autre part ces calculs ne considèrent pas de niveau phréatique établi ; un drainage systématique à caractère préventif, sur drains sub-horizontaux, est prévu dans toute l'emprise des déblais. L'analyse de la stabilité des murs ancrés amonts est réalisée par la méthode de Bishop en considérant une zone d'influence de l'ouvrage égale à trois fois la hauteur de l'excavation à renforcer et en recherchant un coefficient de sécurité global à long terme de 1,5 tout en ajustant les efforts de précontrainte induits dans les tirants.

Pour le suivi à long terme de ces ouvrages de soutènement, une instrumentation particulière a été mise en place. Elle est constituée de, *cales dynamométriques* sur 10% des tirants pour suivre l'évolution des efforts de précontrainte, *mesures inclinométriques* en forage à l'amont du versant (4 tubes), *suivi de la verticalité des murs en terre armée*, *contrôles topographiques*, *suivi de l'activité du système de drainage*, *visites annuelles*.

Toutes ces mesures sont réalisées dans le cadre d'un plan de surveillance définissant les fréquences des contrôles et les seuils à vérifier. A ce jour, après 10 années de suivis, aucune évolution significative n'a été relevée.

6. CONCLUSION

L'essai pressiométrique a permis de caractériser des sols en terme de frottement, dans un matériau sur lequel aucun prélèvement intact n'était possible. De par son origine géologique, le site de Tèche est hétérogène, ce qui se traduit pour l'essai pressiométrique par une variabilité sur le module et sur l'angle de frottement. Pour se prémunir vis à vis du risque de ruine, il a été diminué de la valeur de l'écart type, ce qui a permis de dimensionner l'ouvrage dans des conditions optimales.

REFERENCES

- [1] CLARK B.G., GAMBIN M., *Pressuremeter testing in onshore ground investigations*, ISSMGE Committee TC16, 1st Int. Cong. on Site Characterisation, Atlanta, 1998, Ed. Balkema.
- [2] GALATECH, *Procédé d'essai de forage*, Brevet Français n° 89 09674, Lyon, 1989, INPI.
- [3] HUGHES J.M.O., WROTH C.P., WINDLE D., *Pressuremeter tests in sand*, *Geotechnique*, 1997, Vol. 27, N°4, pp. 455-477.
- [4] MONNET J., GIELLY J., *Détermination d'une loi de comportement pour le cisaillement des sols pulvérulents*, *Revue Franç.Géotechnique*, 1978, N° 7, pp. 45-66.

- [5] MONNET J., *Theoretical study of elasto-plastic equilibrium around pressuremeter in sands*, 3rd International Symposium on Pressuremeters, Oxford, 1990, 137-148.
- [6] MONNET J., KHLIF J., *Etude théorique et expérimentale de l'équilibre élasto-plastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre*, Revue Franç.Géotechnique, 1994, 67, 3-12.
- [7] Norme Française NF P 94-110, *Essai pressiométrique Ménard*, 1991, AFNOR.
- [8] WOOD D.M., WROTH P.C., *Some laboratory experiments related to the results of pressuremeter tests*, Geotechnique, 1977, 27, N° 2, pp. 181-201.