

# L'utilisation du pressiomètre Ménard en Algérie pour la conception des ouvrages géotechniques

## The use of the Ménard pressuremeter in Algeria for the design of geotechnical structures

Ramdane Bahar<sup>1#</sup>, Amal Medjnoun<sup>1</sup>, Lynda Djerbal<sup>1</sup>, and Mohamed Khiatine<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Faculté de Génie Civil, LEEGO, BP 32 El-Alia 16111, Alger, Algérie

<sup>2</sup>Université Yahia Fares de Médéa, Département de Génie Civil, Médéa, Algérie

<sup>#</sup>Corresponding author: rbahar@usthb.dz

### RESUME

En Algérie, le pressiomètre Ménard est considéré comme une technique de reconnaissance pour le dimensionnement des fondations d'ouvrages (pieux, fondations superficielles,) et les constructions en terre, telles que les routes, les lignes ferroviaires, les barrages. Il peut être réalisé dans toutes sortes de sols, permet de mesurer in situ la réponse contrainte-déformation des sols et fournit à l'ingénieur géotechnicien un paramètre de rupture (la pression limite) et un paramètre de déformation (le module pressiométrique). Des corrélations directes entre les paramètres mesurés et les paramètres de conception sont utilisées pour estimer la capacité portante des sols et le tassement des ouvrages. Une autre tendance de l'interprétation de ces essais consiste également à identifier les paramètres habituels du sol requis par les modèles constitutifs simples pour les sols dans les calculs numériques. Cet article traite des prédictions de capacité portante et de tassement des pieux forés, basées sur l'interprétation numérique d'essais pressiométriques prenant en compte des modèles élastiques et élastoplastiques non linéaires. Des calculs numériques prenant en compte les paramètres rhéologiques issus de cette approche sont réalisés afin de prédire le comportement d'un pieu foré unique soumis à une charge axiale statique. Les résultats sont comparés à ceux obtenus lors d'essais de chargement instrumentés, et montrent l'applicabilité de l'approche proposée.

### ABSTRACT

In Algeria, the Ménard pressuremeter is considered a reconnaissance technique for the design of foundations of structures (piles, shallow foundations,) and earth constructions, such as roads, railway lines, dams. It can be carried out in all kinds of soils, allows in situ measurement of the stress-strain response of soils and provides the geotechnical engineer with a failure parameter (the ultimate pressure) and a deformation parameter (the pressuremeter modulus). Direct correlations between the measured parameters and the design parameters are used to estimate the bearing capacity of soils and the settlement of structures. Another trend in the interpretation of these tests also involves identifying the usual soil parameters required by simple constitutive models for soils in numerical calculations. This article deals with the predictions of bearing capacity and settlement of a bored pile, based on the numerical interpretation of pressuremeter tests taking into account nonlinear elastic and elastoplastic models. Numerical calculations taking into account the rheological parameters resulting from this approach are carried out in order to predict the behaviour of a single bored pile subjected to a static axial load. The results are compared with those obtained during instrumented loading tests, and show the applicability of the method used.

**Keywords:** Identification, Capacité portante; Prédiction; Pressiomètre; Sol; Pieu

### 1. Introduction

En Algérie, le pressiomètre Ménard (Ménard, 1957) est très utilisé dans tous les investigations géotechniques des projets de fondations d'ouvrages. Il peut être réalisé dans toutes sortes de sols, et permet de fournir à l'ingénieur géotechnicien à la fois une caractéristique de déformabilité, le module pressiométrique, et une caractéristique de résistance du sol, la pression limite. Ces caractéristiques sont usuellement utilisées directement pour déterminer la contrainte admissible et le tassement des fondations en utilisant des abaques ou

des règles empiriques. En complément des méthodes d'interprétation empiriques centrées sur des points caractéristiques de la courbe pressiométrique, une autre approche consiste à exploiter l'ensemble de cette courbe pour extraire davantage d'informations sur le comportement du sol. Elle repose sur l'analyse complète de la courbe pressiométrique afin d'identifier les paramètres géomécaniques usuels, indispensables pour l'élaboration de modèles de comportement dans le cadre de calculs numériques avancés. En considérant la courbe pressiométrique intégrale, cette méthode permet une meilleure prise en compte de la non-linéarité du sol et de

l'évolution progressive de sa rigidité sous contrainte. L'objectif principal de cet article est de valider une méthode d'identification des paramètres géotechniques à partir des essais pressiométriques, en s'appuyant sur l'analyse complète de la courbe pressiométrique.

De nombreuses méthodes empiriques, analytiques et numériques ont été proposées dans la littérature (Ménard, 1957; Gibson et Anderson, 1961 ; Salençon, 1966 ; Amar et Jézéquel, 1972; Baguelin et al, 1978; Briaud, 1992; Cambou et Bahar, 1993 ; Bahar et al., 2012; etc...). Cet article traite des prédictions de capacité portante et de tassement de pieux forés, basées sur l'interprétation numérique d'essais pressiométriques prenant en compte des modèles élastiques et élastoplastiques non linéaires. Des calculs numériques prenant en compte les paramètres rhéologiques issus de cette approche sont réalisés afin de prédire le comportement d'un pieu foré unique soumis à une charge axiale statique. Les résultats sont comparés aux mesures obtenues lors d'essais de chargement instrumentés.

## 2. Interprétation des résultats des essais pressiométriques

Les essais pressiométriques de Ménard sont analysés par la méthode numérique appelée "Pressident". Elle consiste en un programme numérique développé à l'École Centrale de Lyon (Boubanga, 1990 ; Soegiri, 1991, Bahar, 1992) pour analyser des essais pressiométriques par une méthode simple d'éléments finis plans axisymétriques, indépendante du modèle de comportement du sol utilisé. Les relations contraintes-déformations hyperboliques sont développées pour des analyses incrémentales des déformations du sol où le comportement non linéaire est modélisé par une série d'incrément linéaires. Ce programme permet d'identifier les paramètres du modèle en prenant en compte l'ensemble de la courbe pressiométrique. Il a été utilisé avec succès pour définir les paramètres du sol à l'aide de modèles de sol visqueux et non visqueux (Cambou and Bahar, 1993 ; Bahar et al., 1995; Olivari and Bahar, 1995).

Seul le modèle élastique non linéaire de Duncan (Duncan et Chang, 1970), décrit dans plusieurs articles est utilisé dans cet article. Ce modèle est simple avec quelques limitations mais, qui semble bien adapté à un certain nombre d'utilisations pratiques n'induisant pas de sollicitations trop complexes. Ce modèle fait apparaître sept paramètres : la cohésion  $c$ , l'angle de frottement  $\varphi$ , ainsi que les paramètres  $k_e$ ,  $k_b$ ,  $n$ ,  $m$  et  $R_f$ .  $k_e$  et  $n$  sont des paramètres décrivant le comportement en petites déformations, ils définissent le module tangent initial.  $k_b$  et  $m$  sont deux paramètres décrivant la variation de volume.  $R_f$ ,  $c$  et  $\varphi$  sont trois paramètres qui décrivent le comportement limite.

Une étude paramétrique menée sur ces sept constantes a permis de dégager les paramètres qui influent de façon importante sur les résultats d'un essai pressiométrique à savoir  $k_e$ ,  $c$  et  $\varphi$ . Dans le cadre d'une sollicitation pressiométrique, cette étude montre que les paramètres  $k_b$ ,  $n$ ,  $m$  et  $R_f$  sont peu influents car leur impact sur la réponse globale du sol, notamment sur la courbe contrainte-déformation, reste limité par rapport à

d'autres paramètres plus déterminants comme le module de déformation initial ( $k_e$ ), la cohésion ( $c$ ) ou l'angle de frottement interne ( $\varphi$ ). Le paramètre  $n$ , qui régit l'évolution du module avec la contrainte, a un effet modéré puisque les variations de contraintes sont relativement faibles et confinées. Les paramètres  $k_b$  et  $m$ , liés à l'évolution volumique, sont peu sollicités dans un essai pressiométrique où la déformation est essentiellement radiale et non triaxiale. Enfin,  $R_f$ , qui définit la condition de rupture, influence surtout la phase de rupture franche, rarement atteinte ou bien identifiée dans la courbe pressiométrique, surtout dans les sols cohérents. Les valeurs couramment rapportées dans la littérature pour le paramètre  $R_f$  du modèle de Duncan varient, selon le type de sol, entre 0.5 et 0.9 (Duncan and Chang, 1970). L'identification est donc réalisée essentiellement sur les trois paramètres  $k_e$ ,  $c$  et  $\varphi$ . Ces paramètres sont identifiés comme suit :

Pour les sols cohérents, les essais pressiométriques peuvent être considérés comme non drainés (Soegiri, 1991). Dans ce cas, l'angle de frottement interne peut être considéré comme nul. La procédure d'optimisation conduit alors uniquement à la définition du paramètre  $k_e$  et de la cohésion non drainée  $c_u$ . Pour les sols non cohérents, les essais pressiométriques peuvent être considérés comme des essais drainés (Soegiri, 1991). De plus, la cohésion de ces matériaux est nulle. La procédure d'optimisation de la procédure conduit uniquement à la définition de  $k_e$  et  $\varphi$ . Pour les sols frottants cohésifs (cas général), il ne sera pas possible de déterminer  $c$  et  $\varphi$  si un seul essai est disponible, il sera donc nécessaire de faire une hypothèse pour l'un des deux paramètres  $c$  ou  $\varphi$ . Si deux essais à deux profondeurs différentes peuvent être analysés, il serait possible de définir les trois paramètres  $k_e$ ,  $c$  et  $\varphi$ . Pour chaque profondeur, il est possible de calculer la valeur de  $c$  et  $k_e$  correspondant à différentes valeurs données de  $\varphi$  ( $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,...), il est donc possible de déterminer plusieurs couples de valeurs acceptables pour  $c$  et  $\varphi$ . Les valeurs de  $c$  et  $\varphi$  qui doivent être prises en compte sont les valeurs acceptables pour tous les essais (point d'intersection entre les différentes courbes correspondant à différentes profondeurs (Fig. 1).

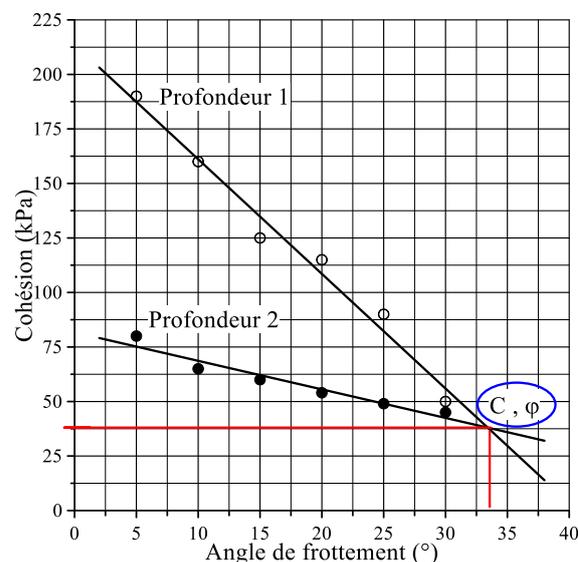


Figure 1. Procédure d'identification d'un sol cohésif et frottant

### 3. Investigation géotechnique

#### 3.1. Description succincte du projet

Le chantier de construction de la mosquée d'Alger s'étend sur plus de 20 hectares. L'ensemble architectural est situé dans l'axe central du célèbre golf d'Alger, face à la mer Méditerranée. Le minaret est un parallélépipède très élancé d'une hauteur totale de 265 m au-dessus du sol et d'un plan carré de 26,5 m de côté. En raison de cette finesse, de la particularité du système de raidissement et de la forte sismicité de la région, la conception structurelle du minaret a dû relever plusieurs défis techniques. Conformément à la philosophie de conception générale du minaret, le système de fondations présente une résistance sismique supérieure à celle de la tour elle-même. De plus, la résistance est progressivement augmentée de la base de la tour jusqu'au sol de fondation. Ce système comprend l'élargissement en caisson rigide du pied du minaret sur la hauteur des deux niveaux souterrains, de la dalle de fondation et des barrettes.

#### 3.2. Reconnaissance géotechnique

Des reconnaissances géotechniques ont été réalisées pour la conception des fondations du site de la mosquée. L'étude du minaret a nécessité quatre sondages pressiométriques jusqu'à 70 m de profondeur, trois sondages carottés à la même profondeur, et un sondage carotté de 90 m de profondeur. Des échantillons de sol ont été prélevés à différentes profondeurs, et 28 essais de pénétration standard (SPT) ont été réalisés. Des échantillons remaniés et intacts ont été utilisés pour réaliser des essais afin de déterminer les propriétés physiques, mécaniques et de compressibilité des sols rencontrés. Quelques résultats obtenus sont présentés sur les figures 2 et 3. La stratigraphie du sol rencontrée sur le site du minaret se compose d'une couche d'argile limoneuse de 10m d'épaisseur, reposant sur un sable limoneux s'étendant jusqu'à une profondeur d'environ 40 m, lui-même reposant sur une formation de marne sableuse jusqu'à la profondeur maximale explorée. La consistance de la marne augmente avec la profondeur. La nappe phréatique a été rencontrée à une profondeur d'environ 6,50 m. Les sols sont saturés. La teneur en eau naturelle mesurée  $w_n$  varie entre 10% et 35%. L'indice de plasticité varie entre 10% et 30%. Les paramètres de résistance au cisaillement, dérivés d'essais triaxiaux consolidés non drainés avec mesure de la pression interstitielle, varient de  $11^\circ$  à  $26^\circ$  pour l'angle de frottement et de 18 kPa à 212 kPa pour la cohésion. Les pressions limites conventionnelles varient entre 0,10 MPa et 10 MPa et les modules pressiométriques sont compris entre 3 MPa et 1 000 MPa. Les essais de consolidation indiquent que les sols rencontrés sont normalement consolidés à surconsolidés avec une compressibilité moyenne,  $C_c$  compris entre 0,10 et 0,14.

#### 3.3. Interprétation des essais pressiométriques

La méthode d'identification basée sur l'essai pressiométrique, décrite succinctement ci-dessus, est

utilisée pour déterminer les paramètres du sol des différentes couches rencontrées. Les sols rencontrés sur le site sont des sols cohésifs et frottants. Dans ce cas, pour chaque couche, il serait possible de définir les trois paramètres  $k_e$ ,  $c$  et  $\phi$  à l'aide de deux essais pressiométriques réalisés à deux profondeurs significativement différentes. Les paramètres du modèle qui présentent une influence faible sur les résultats ont été fixés arbitrairement à des valeurs moyennes. Les valeurs proposées pour ces paramètres sont  $n=0.5$ ,  $m=0.5$ , et  $R_f=0.70$ .  $k_b$  est le coefficient du module de déformation volumique  $K$  qui est relié au coefficient de Poisson. Il est fixé à partir d'une valeur du coefficient de Poisson de 0.33 pour les matériaux perméables et 0.49 pour les matériaux imperméables. La figure 4 présente un exemple d'identification des paramètres du modèle élastique non linéaire de Duncan. Le tableau 1 résume les valeurs moyennes des paramètres du modèle de Duncan obtenus pour chaque couche. Des simulations ont été réalisées en utilisant les valeurs moyennes obtenues pour chaque couche et comparés aux courbes expérimentales. Les résultats sont présentés sur les figures 5 et 6. Nous constatons que l'écart calculé entre la courbe expérimentale et la courbe théorique pour les différentes simulations ne dépasse pas 10%. La comparaison des angles de frottement et de de la cohésion montre que l'approche proposée et l'essai triaxial fournissent des angles de frottement et des cohésions de même ordre de grandeur.

Tableau 1. Paramètres utilisés dans les calculs

Sol	Prof (m)	$k_e$	$k_b$	$c$ (kPa)	$\phi$ ( $^\circ$ )
Argile limoneuse	0 - 10	1104	1076	133	12
Sable limoneux	10 - 40	2297	2252	165	27
Marne sableuse	40 - 70	5317	5213	200	35

#### 3.4. Essais de chargement des pieux

Deux essais de chargement statique vertical, PV-01 et PV-02, ont été réalisés sur des pieux forés non fonctionnels de 1 000 mm de diamètre et de 51,5 m de longueur. L'essai de chargement PV-01 a été réalisé le 19 décembre 2012, de 8 h à 17 h 30. L'essai de chargement PV-02 a débuté le 15 décembre 2012 à 13 h et s'est terminé le 16 décembre 2012 à 2 h.

Pour la construction des pieux forés, un forage rotatif a été utilisé pour l'excavation sous bentonite. Le pieu est instrumenté par 27 extensomètres sur toute sa longueur (Butsmante et Jézéquel 1989), définissant un total de 9 sections de mesure (3 extensomètres par section à  $120^\circ$ ) conformément au cahier des charges du projet. Le système de réaction des pieux d'essai est illustré dans le montage d'essai de la figure 7. La charge a été appliquée à l'aide de quatre vérins hydrauliques, d'une capacité de 6 MN chacun, placés entre la tête du pieu et la tête d'essai ancrée. Les pieux sont chargés jusqu'à 21,8 MN, soit 1,5 fois la charge de travail nominale (14,50 MN) des pieux de fondation. Les incréments de cycle de chargement adoptés pour les pieux d'essai sont conformes aux spécifications du projet. La figure 8 présente les courbes chargement-enfoncement des pieux.

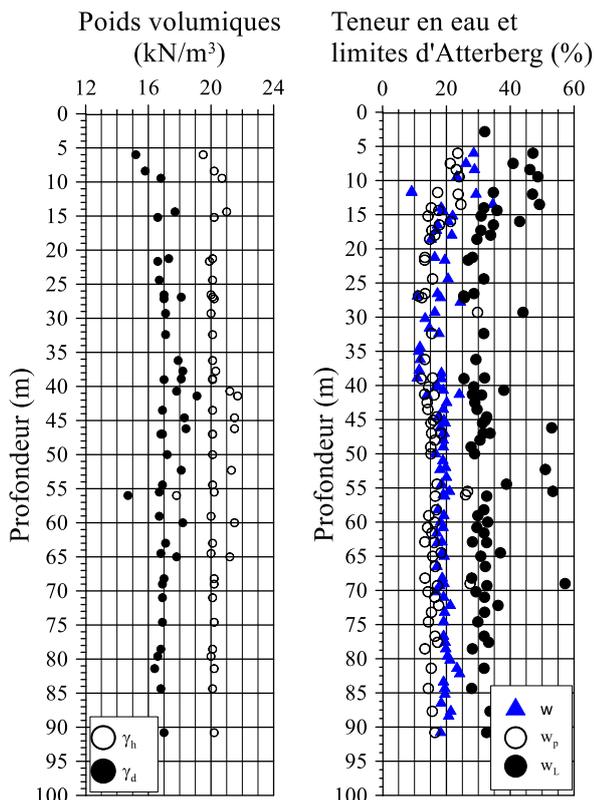


Figure 2. Caractéristiques physiques.

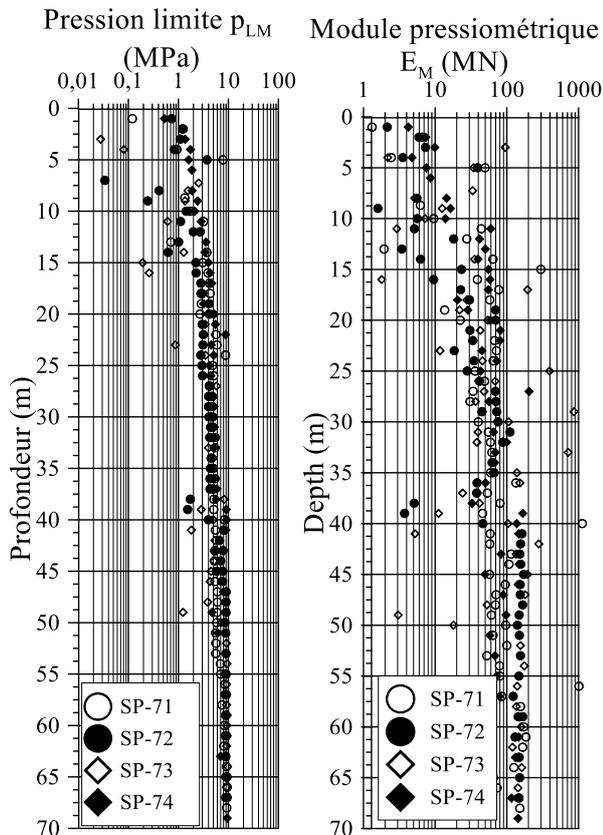


Figure 3. Caractéristiques pressiométriques.

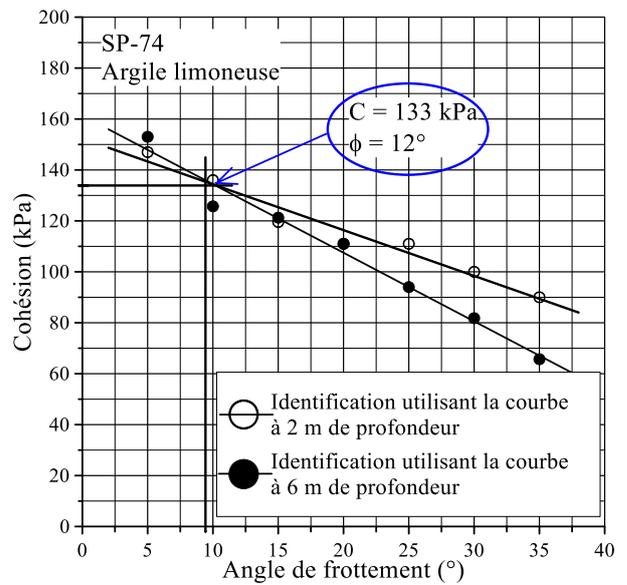


Figure 4. Identification des paramètres  $c$  et  $\phi$  pour la formation d'argile limoneuse.

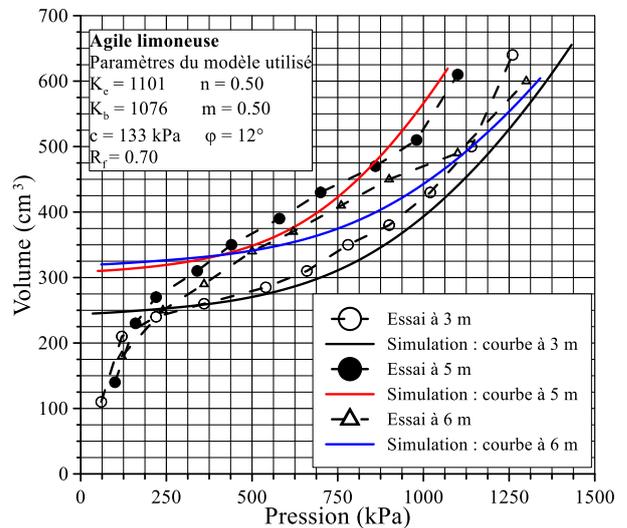


Figure 5. Courbes pressiométriques simulées pour différentes profondeurs : argile limoneuse.

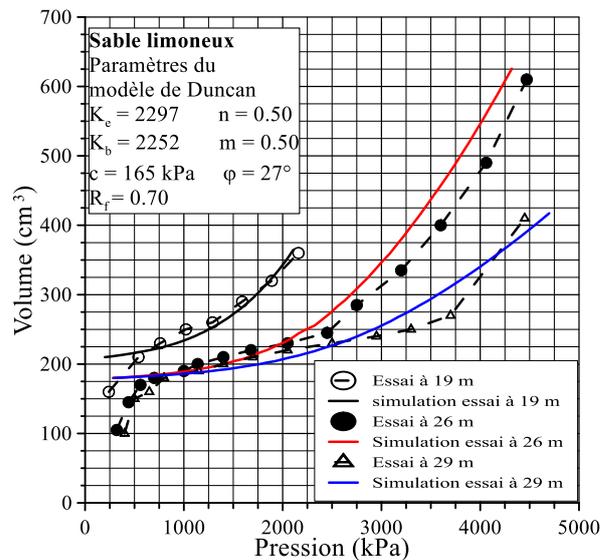


Figure 6. Courbes pressiométriques simulées pour différentes profondeurs : sable limoneux.

Avec une valeur de tassement  $S_0$  égale à 100 mm, en utilisant un critère de rupture de  $1/10^{\text{ème}}$  du diamètre du pieu comme tassement total (MELT, 1993), la résistance ultime  $Q_{ult}$  du pieu n'a pas été atteinte sous la charge maximale de 21,8 MN (2180 t). À cette charge, le tassement moyen était d'environ 19,2 mm pour les deux pieux. Après avoir relâché la charge d'essai à 0,65 MN, les tassements résiduels mesurés étaient de 5 et 6 mm.

Différentes méthodes ont été utilisées pour évaluer la capacité ultime du pieu, notamment la méthode Chin (Chin, 1970). Cette méthode permet de tracer un graphique entre le tassement divisé par la charge appliquée correspondante et le tassement lui-même, comme illustré sur la figure 9. La pente du meilleur ajustement linéaire donne la charge ultime, qui est de 34,4 MN et 31,4 MN pour PV-01 et PV-02 respectivement. Selon l'EUROCODE 7, partie 2 (CEN 2006), la charge ultime  $Q_{ult}$  peut être calculée à partir des essais pressiométriques Ménard à l'aide de l'équation :

$$Q_{ult} = Q_{pu} + Q_{su} = Ak_p(p_{LM} - p_0) + P \sum q_{si}z_i \quad (1)$$

$Q_{pu}$  et  $Q_{su}$  représentent respectivement la charge ultime en pointe et le frottement latéral ultime,  $A$  est la section du pieu,  $k_p$  est un coefficient de portance basé sur le type de sol et le type de pieu,  $p_{LM}$  est la pression limite,  $p_0$  est la pression horizontale des terres au repos (Gambin & Frank 2009),  $P$  est le périmètre du pieu et  $q_{si}$  est la résistance unitaire du fût à une profondeur  $z_i$ . En utilisant ces équations et les résultats des essais pressiométriques PMT (Fig. 3), il est possible de prédire la valeur  $Q_{ult}$  donnée dans le tableau 2 pour les quatre profils de pression limite. Les valeurs de capacité portante calculées à l'aide de la méthode pressiométrique varient entre 0,65 et 0,84 fois celles déduites des essais de chargement axiale statique par extrapolation de la méthode de Chin. Selon le code de conception français (MELT, 1993), la capacité portante au fluage  $Q_c$ , correspondant à la fin de la résistance pseudo-élastique du pieu, peut être obtenue par  $Q_c = 0,5Q_{pu} + 0,7Q_{su}$ . Les valeurs de  $Q_c$  obtenues sont comprises entre 14,25 MN et 16,27 MN, ce qui est prudent par rapport aux résultats des essais de pieux verticaux.

**Tableau 2.** Résistance ultime obtenue en utilisant le code français (MELT, 1993).

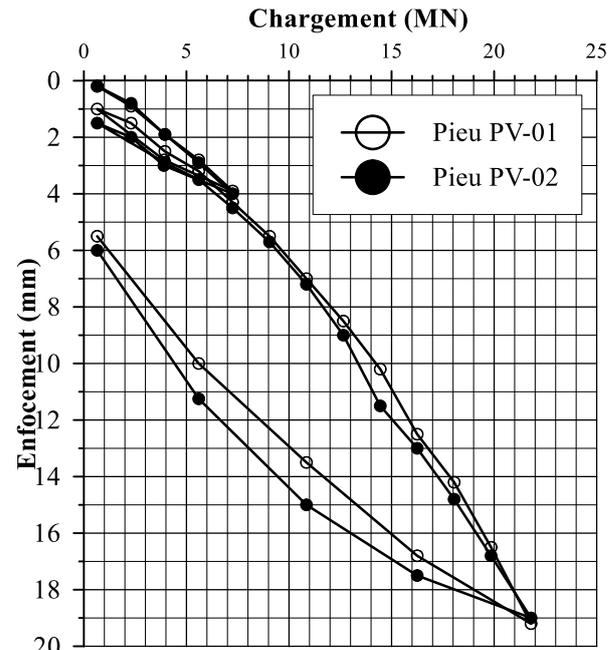
Profil de sol	$Q_{pu}$ (MN)	$Q_{su}$ (MN)	$Q_{ult}$ (MN)	$Q_c$ (MN)	$\frac{Q_{ult}(PMT)}{Q_{ult}(Chin)}$ (%)
SP71	6.80	15.50	22.30	14.25	65
SP72	11.10	15.10	26.20	16.12	76
SP73	10.70	15.60	26.30	16.27	84
SP74	8.83	15.90	24.73	15.54	79

#### 4. Calculs numériques

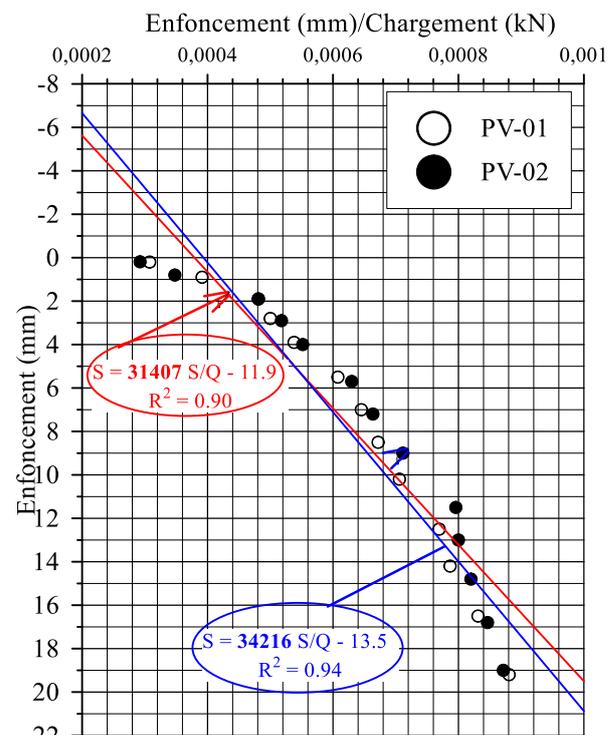
Le fascicule 62-V (MELT, 1993) propose deux méthodes pour prédire le tassement des pieux statiques sous charge verticale. La première méthode définit arbitrairement le tassement en pourcentage du diamètre du pieu. La seconde méthode consiste à déterminer les courbes de transfert de charge  $q-z$  en fonction du module pressiométrique de Ménard, comme proposé par Frank et Zhao en 1982. Des méthodes numériques sont également utilisées pour prédire le tassement des pieux.



**Figure 7.** Vue du système de charment des pieux.



**Figure 8.** Résultats d'essai de chargement des pieux.



**Figure 9.** Résistance ultime en utilisant la méthode Chin

#### 4.1. Modélisation numérique

La réponse axiale des pieux forés verticaux statiques est étudiée à l'aide du logiciel de calcul PLAXIS<sup>3D</sup> (Brinkgreve et al., 2007), méthode basée sur la méthode des éléments finis. Un comportement élastique linéaire est supposé pour le pieu et le critère de Mohr-Coloumb est pris en compte pour les sols. Le modèle tridimensionnel par éléments finis et les conditions aux limites utilisés pour l'analyse sont présentés sur la figure 10. Le maillage 3D est constitué de 26 176 éléments tétraédriques à 10 nœuds. La simulation 3D par éléments finis a été réalisée en tenant compte des contraintes géostatistiques caractérisant l'état initial, générées automatiquement. Les contraintes initiales dans la masse de sol sont établies en supposant qu'elles sont caractérisées par une condition de coefficient de pression des terres au repos  $K_0$ , en fonction de l'état de consolidation des couches de sol.

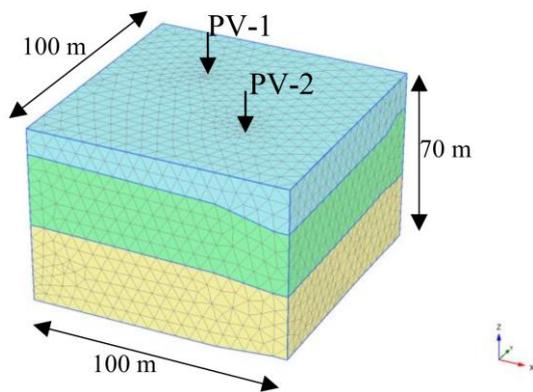


Figure 10. Maillage 3D.

#### 4.2. Paramètres du modèle

Les propriétés du sol sont déterminées à partir des résultats d'essais en laboratoire et d'essais pressiométriques. Les valeurs moyennes des paramètres du modèle pour chaque couche de sol sont résumées dans les tableaux 3a et 3b.

Tableau 3a. Paramètres utilisés dans les calculs

Sol	Prof. (m)	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	E (MPa)	
				Laboratoire	Pressident
Argile limoneuse	0 - 10	20	0.33	29	106
Sable limoneux	10 - 40	20	0.33	100	510
Marne sableuse	40 - 70	20	0.33	278	1758

Tableau 3b. Paramètres utilisés dans les calculs (suite)

Sol	c (kPa)		$\phi$ (°)	
	Laboratoire	Pressident	Laboratoire	Pressident
Argile limoneuse	83.50	133	11	12
Sable limoneux	118	165	22	27
Marne sableuse	212	200	25	35

#### 4.3. Résultats

Des calculs numériques ont été effectués pour deux pieux axiaux statiques, de 51,5 m de profondeur et 1 m de diamètre, soumis à une charge de service maximale. La méthode de Frank et Zhao (1982) a également été utilisée pour calculer la contrainte verticale mobilisée en fonction du déplacement de la pointe. La figure 11 compare les résultats obtenus par les différentes approches. La méthode de Frank et Zhao (1982) et le calcul 3D utilisant des paramètres issus d'essais en laboratoire donnent des résultats assez similaires et fournissent une résistance ultime inférieure à celles obtenues par la méthode "Pressident" et expérimentalement. Plusieurs raisons techniques et méthodologiques peuvent expliquer la sous-estimation de la méthode de Frank et Zhao (1982) de la résistance ultime obtenue par rapport à la méthode "Pressident". Elle est conçue pour une application rapide et pratique, ce qui implique des simplifications empiriques. Ces simplifications peuvent entraîner une sous-estimation conservatrice de la résistance, ce qui est parfois intentionnel pour des raisons de sécurité. D'autres hypothèses plausibles peuvent sous estimer cette résistance à savoir l'utilisation partielle de la courbe pressiométrique, l'hypothèse de sol homogène et isotrope, et méthode d'identification paramétrique différente.

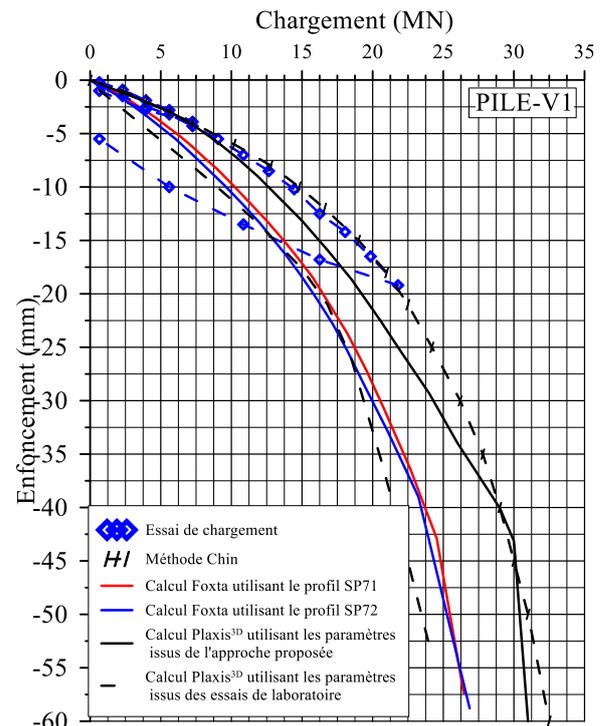


Figure 11. Comparaison des calculs aux mesures.

#### 5. Conclusions

Le pressiomètre PMT est largement utilisé en Algérie dans les reconnaissances géotechniques pour le dimensionnement des fondations d'ouvrages. Pour la conception des fondations du projet de la mosquée d'Alger, Le dimensionnement des fondations du minaret mince de 265 m de hauteur a nécessité quatre sondages pressiométriques allant jusqu'à 70 m de profondeur.

Deux essais de chargement statique vertical ont été réalisés sur des pieux forés non fonctionnels de 1 m de diamètre et de 51,5 m de longueur. Les résultats des essais pressiométriques ont été utilisés pour identifier les paramètres usuels des sols en utilisant l'approche numérique d'identification à partir des résultats des essais pressiométriques. Ces paramètres ont été par la suite pris en compte pour prédire le comportement des pieux dans l'objectif de valider l'approche d'identification. Les résultats des calculs numériques de la capacité portante et du tassement d'un pieu foré unique soumis à une charge axiale statique, comparés aux mesures in situ, montrent l'applicabilité de l'approche proposée.

Afin de consolider les résultats obtenus et d'élargir le champ d'application de l'approche proposée, plusieurs pistes de recherches complémentaires peuvent être envisagées. Il serait notamment pertinent de valider l'approche sur d'autres types de sols. Par ailleurs, l'intégration explicite de conditions de chargement transitoires ou cycliques, via un couplage avec des modèles dynamiques, offrirait une perspective d'application aux problèmes liés aux charges sismiques ou aux chargements répétitifs.

## 6. Références

- Amar, S., Jézéquel, J. F. "Essais en place et en laboratoire sur sols cohérents : comparaison des résultats", Bull. Liaison Labo P. et Ch., 58, pp. 97-108. 1972.
- Baguelin F., Jezequel J.F., Shields D.H., "The pressuremeter and foundation engineering", Switzerland, Trans Tech Publications, 1978.
- Bahar, R. "Analyse numérique de l'essai pressiométrique : application à l'identification de paramètres de comportement des sols", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 1992.
- Bahar, R., Cambou, B., Fry, J. J. "Forecast of creep settlements of heavy structures using pressuremeter tests", Computers and Geotechnics, 17, pp. 507-521. 1995. [https://doi.org/10.1016/0266-352X\(95\)94917-F](https://doi.org/10.1016/0266-352X(95)94917-F).
- Bahar, R., Baidi, F., Belhassani, O., Vincens, E. "Undrained strength of clays derived from pressuremeter tests", European J. of Environmental and Civil Engineering, 16(10), pp. 1238-1260, 2012. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.701930>.
- Boubanga, A. "Identification de paramètres de comportement des sols à partir de l'essai pressiométrique", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon. France. 1990.
- Briaud, J. L. "The pressuremeter". Taylor & Francis. London, Great Britain, 1992
- Brinkgreve, R.B.J., Swolfs, W.M. "Plaxis 3D Foundation. Finite element code for soil and rock analyses", Users manual, Netherlands, 2007.
- Bustamante, M., Jézéquel, J. F. (1989). Essai statique de pieu isolé sous charge axiale, Méthode d'essai LPC n°31, LCPC Paris, 1989.
- Cambou, B., Bahar, R. "Utilisation de l'essai pressiométrique pour l'identification de paramètres intrinsèques du comportement d'un sol", Rev. Fr. Geotech, 63, pp. 39-50, 1993. <https://doi.org/10.1051/geotech/1993063039>.
- CEN "Eurocode 7 Geotechnical design – Part 2: Ground investigation and testing", Brussels, pp. 123-124, 2006.
- Chin F. K. "Estimation of the ultimate load of piles not carried to failure", Proc. 2nd Southeast Asian Conf. on Soil Engineering, pp. 81–90, 1970.
- Duncan J. M., Chang C. Y. "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", J. of Geotechnical Engineering Div., 96(5), pp. 1629-1653, 1970. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.00014>.
- Frank, R., Zhao S. R. "Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale des pieux forés dans les sols fins", Bull. Liaison Labo P. et Ch., n° 119, pp. 17-24, 1982.
- Gambin M., Frank R. "Direct Design Rules for Piles Using Ménard Pressuremeter", Proc. Inter. Foundation Congress and Equipement Expo'09, ASCE Geotechnical Special Publication 186 pp.111-118, 2009. [https://doi.org/10.1061/41022\(336\)15](https://doi.org/10.1061/41022(336)15).
- Gibson, R. E., Anderson, W. F. "In situ measurement of soils properties with the pressuremeter", Civil Engineering Public Works Review, 56, pp. 615-618. 1961. <https://doi.org/10.6013/jbrewsocjapan1915.56.618>
- MELT "Règles techniques de calcul et de conception des fondations des ouvrages de génie civil, CCTG Fascicule 62 Titre V", Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, Paris, Texte officiel N° 93-3, 182 p, 1993.
- Ménard, L. "Mesures in situ des propriétés physiques des sols", Annales des Ponts et Chaussées, 1(3) ; pp. 357-376. 1957.
- Olivari, G., Bahar, R. "Response of generalized Prager's model on pressuremeter path", Proc. 4th Int. Sym. on pressuremeter. A.A Balkema, pp. 207-213, Sherbrooke, Canada. 1995.
- Salençon, J. "Expansion quasi-statique d'une cavité à symétrie sphérique ou cylindrique dans un milieu élastoplastique", Annales des Ponts et Chaussées, 3, 175-187. 1966.
- Soegiri, S. "Modélisation de l'essai pressiométrique avec prise en compte de l'interaction Fluide-solide. Application à l'identification du comportement des sols" "Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon. France. 1991.