

COMPORTEMENT DES PIEUX ISOLÉS SOUS CHARGE VERTICALE

ANALYSE D'UNE BASE DE DONNÉES LOCALE D'ESSAIS DE CHARGEMENT

BEHAVIOUR OF VERTICALLY LOADED PILES

ANALYSIS OF A LOCAL DATABASE OF PILE LOADING TESTS

A. BOUAFIA, A. HENNICHE, O. OULDENE, H. MAHDI

Université Saâd Dahleb de Blida, B.P: 270 R.P Blida 09000 Blida

RÉSUMÉ

L'article se propose d'interpréter une base de données locale d'essais de chargement vertical statique relative au nord algérien, d'une taille de 40 projets de fondations sur pieux.

L'interprétation des courbes de chargement a permis d'évaluer le rapport de la charge critique à la charge limite du pieu, variant dans une marge assez serrée de 0.45 à 0.50 pour les pieux étudiés.

Il a été constaté, qu'en termes de tassements, la charge critique correspond à un tassement assez proche de celui du tassement de référence défini comme étant le rapport de la charge limite et de la raideur initiale du pieu.

Le dernier volet comporte une étude comparative détaillée des méthodes courantes de dimensionnement à travers laquelle il a été constaté que les méthodes pressiométrique et pénétrométrique, bien qu'elles soient légèrement optimistes, donnent une bonne prévision de la capacité portante comparée à celle estimée à partir des essais de chargement de pieux.

Mots-Clefs : Pieu, Chargement vertical, Base de données, Essai de chargement, Transfert de charges, Tassement, Capacité portante.

ABSTRACT

The aim of the paper is to present the results of interpretation of a local database of static vertical pile loading tests located in the north of Algeria with a size of 40 projects of pile foundations.

The interpretation of the load-settlement curves allowed evaluating the ratio critical load to the ultimate load which was found varying in a narrow margin of 0.45-0.50 for the piles studied.

It was remarkably stated that the critical load corresponds to a pile settlement equal to the the reference settlement which is defined as the ratio of the ultimate load to the initial pile stiffness.

The last part concerns with a comparative study of the current pile design methods, and shows that with respect to the experimental overall pile bearing capacity the predictions of the pressuremeter method (PMT) and the cone penetrometer method (CPT) although slightly optimistic are in good agreement.

Key-Words : Pile, Vertical loading, Database, Loading test, Load transfert, Settlement, Bearing capacity.

1. INTRODUCTION

A partir de la deuxième moitié du 20^e siècle, suite à l'essor mondial considérable de la technologie des pieux et sa large application aux génies civil et maritime, la réponse d'un système de fondations sur pieux est devenue une préoccupation majeure des ingénieurs d'étude, des entrepreneurs, des bureaux de contrôle et des organismes de recherche.

La littérature mondiale relative aux pieux, en dépit de sa richesse en termes de méthodes de calcul, laisse des fois perplexe un utilisateur néophyte suite aux prévisions souvent disparates des méthodes de dimensionnement. Une des explications d'une telle divergence réside dans le caractère semi-empirique ou empirique de telles approches, calées sur des observations du comportement des pieux lors des essais de chargement en vraie grandeur dans les chantiers.

En cas d'incertitude dans les prévisions de la capacité portante et du tassement des fondations sur pieux, et dans la limite du budget alloué à l'étude, une démarche pragmatique consiste pour l'ingénieur à entreprendre un essai de chargement d'un pieu en vraie grandeur, en vue de vérifier les hypothèses de calcul ou de confronter les résultats de calcul aux observations sur site.

Cet article traite d'un thème important pour les acteurs de la construction en Algérie, particulièrement suite à l'épanouissement du secteur des travaux publics par le lancement des grands projets. Après une présentation générale de la base de données, l'article se focalise sur l'interprétation des résultats obtenus, plus précisément les courbes de chargement vertical, à partir desquelles des recommandations pratiques de dimensionnement des pieux sont proposées.

2. DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNÉES

S'inscrivant dans une logique pragmatique, l'essai de chargement d'un pieu en vraie grandeur est un outil pratique d'analyse in-situ de la capacité portante et du tassement d'un pieu isolé qui permet de s'affranchir des incertitudes liées au calcul. Il est systématiquement mené dans le cadre d'un important projet afin de confirmer les prévisions du comportement du pieu où chaque fois que les méthodes de calcul mènent à des résultats entachés d'incertitudes.

Lorsque le pieu d'essai est seulement instrumenté par des comparateurs pour la mesure du tassement, l'évaluation séparée de la résistance en pointe et du frottement latéral n'est pas possible, mais on peut néanmoins interpréter la courbe de chargement obtenue pour une estimation globale de la capacité portante. La base de données analysée, localisée sur 11 wilayas au nord de l'Algérie, comporte 54 essais de chargement vertical statique de pieux simplement instrumentés, réalisés dans le cadre de 40 projets de fondations sur pieux s'étalant sur la période de 1980 à 2011 (Refs. [3,6,7]). Le tableau 1 résume le types d'ouvrages reposant sur les pieux étudiés.

Dans l'ensemble, on note que 50% des sites étudiés sont de nature argileuse, 30% de nature marneuse et 20% sableuse. En

outre, 52 pieux sont en béton armé réalisés par procédé de forage simple au tube plongeur, alors que 2 pieux sont réalisés par battage.

Notons que 53% des pieux ont un diamètre de 1.2 m, 30% un diamètre de 1.0 m et 17% ont des diamètres variant entre 0.17 et 0.80 m. Les élancements de pieux varient entre 9 et 43, avec une valeur exceptionnelle de 91 pour l'un des pieux battus.

Tableau 1. Répartition des essais de chargement selon le type d'ouvrage

Type d'ouvrage	Nombre d'essais
Pont	19
Usine	5
Aéroport	5
Centrale électrique	5
Stade	3
Logement, bibliothèque, imprimerie	10
Centre commercial	5
Station de dessalement d'eau	1
Parking	1

La quasi-totalité des essais ont été menés par le LCTP (Laboratoire Central des Travaux Publics), conformément à la norme française NF P 94-150. Selon la nomenclature de cette norme, il s'agit d'un essai de type préalable dont le programme de chargement est récapitulé à la figure 1. Notons que le premier cycle de chargement est composé de 5 incréments successifs égaux à $Q_N/10$, chacun durant 01 heure, suivi d'un déchargement puis d'un autre cycle de chargement. Q_N est la charge verticale nominale du pieu.

L'essai de chargement est couramment mené avec un massif de réaction constitué, soit d'un lest de dalles en béton, soit d'un système d'ancrages (Ref. [3]). Les pieux d'essai sont simplement instrumentés par des comparateurs pour la mesure du tassement en tête (voir Fig. 3 a) et par un capteur de force pour la mesure de la force appliquée par le vérin en tête (voir Fig 3.b).

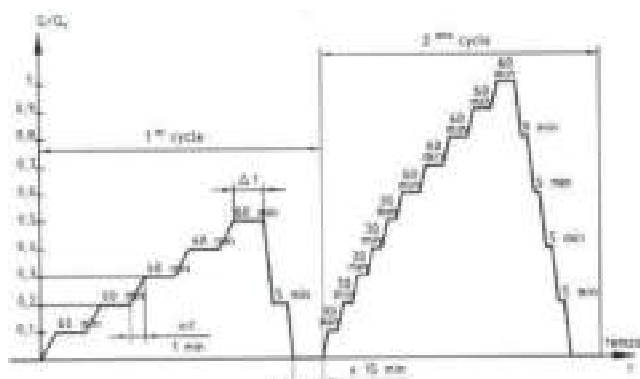


Figure 1. Programme d'essai de chargement préalable (Q_N est la charge verticale nominale du pieu)

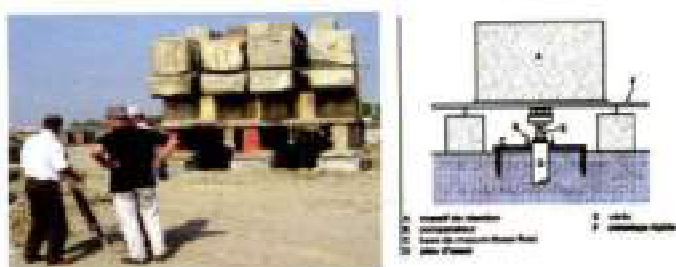


Figure 2. Dispositif de chargement du pieu avec massif de réaction



Fig. 3. Instrumentation du pieu

(a) : application de la charge par un vérin hydraulique
 (b) : mesure du tassement en tête)

3. INTERPRÉTATION DES COURBES DE CHARGEMENT

3.1. AJUSTEMENT DES COURBES DE CHARGEMENT

Dans l'ensemble, 87% des essais ont été menés jusqu'à des tassements en tête du pieu égaux à 1% du diamètre, alors que dans 13% des cas, le tassement maximal mesuré varie entre 1 et 9% du diamètre, ce qui ne permet pas une appréciation rigoureuse du comportement du pieu en grands déplacements ainsi qu'une évaluation de la capacité portante. Les critères 2 à 4 du tableau 2 n'étant d'ailleurs pas applicables, un tel constat pousse à analyser la courbe de chargement par ajustement et extrapolation.

Les courbes de chargement, décrivant la variation de la charge verticale appliquée Q en fonction du tassement mesuré en tête du pieu, soit v_0 , ont en quasi-totalité une allure typiquement hyperbolique décrite par l'équation suivante:

$$Q = \frac{v_0}{\frac{1}{K_v^0} + \frac{v_0}{Q_l}} \quad (1)$$

K_v^0 et Q_l correspondent respectivement à la pente initiale de la courbe (ou raideur verticale du pieu) et à la capacité portante verticale du pieu.

L'ajustement au sens des moindres carrés des courbes par l'équation (1) a permis de déterminer les paramètres précédents, le coefficient de régression étant dans presque tous les cas supérieur à 98%, ce qui est le signe d'une excellente qualité d'ajustement.

3.2. ANALYSE DE LA CAPACITÉ PORTANTE

La charge verticale limite Q_l (ou capacité portante verticale) d'un pieu résulte de la mobilisation d'une pression verticale limite q_l en pointe et des contraintes de frottement latéral limite $q_s(z)$ le long du fût du pieu, comme le schématise la figure 4 :

$$Q_l = Q_p + Q_s = S q_l + P \int_0^l q_s(z) dz \quad (2)$$

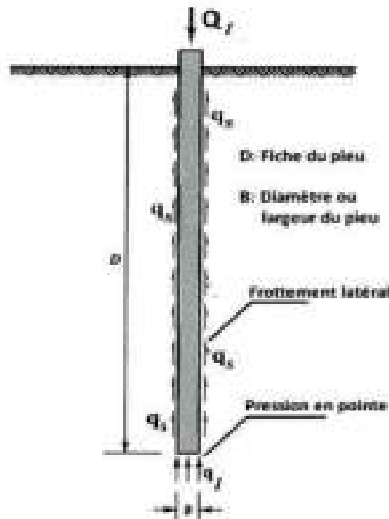


Fig. 4. Schéma d'équilibre limite du pieu sous une force verticale

P et S sont respectivement le périmètre du fût et l'aire de la section de la pointe du pieu.

Si le pieu est instrumenté par des extensomètres (jauges de déformation, extensomètre amovible, etc.), on peut mesurer les efforts le long du fût, déterminer ainsi les efforts Q_s et Q_p et en déduire la capacité portante, conformément à l'équation (2).

Si le pieu d'essai est simplement instrumenté par des comparateurs pour la mesure du tassement, on peut interpréter la courbe de chargement obtenue pour une estimation globale de la capacité portante à partir d'une des méthodes empiriques ou semi-empiriques résumées au tableau 2 Refs.[1,3].

La capacité portante Q_f , déduite de l'ajustement hyperbolique des courbes de chargement et correspondant théoriquement à des tassements infinis, a été comparée à la charge verticale Q correspondant à un tassement égal à 10% du diamètre B du pieu. Il est remarquable, d'après la figure 5 que le rapport $Q(0.1B)/Q_f$ est en moyenne égal à 0.98, avec un très faible coefficient de variation, ce qui laisse conclure que la capacité portante Q_f , ainsi déduite par la formulation hyperbolique, n'est autre pratiquement que la capacité portante conventionnelle correspondant à un tassement de 10% de B. Un tel constat justifie le recours à l'ajustement par la formulation hyperbolique de la courbe de chargement en vue de l'extrapoler, particulièrement lorsque les grands tassements n'ont pas été atteints, ce qui est le cas des essais analysés ici.

3.3. ANALYSE DE LA CHARGE CRITIQUE Q_c

L'étude de l'évolution des tassements dans le temps, pour une charge donnée, montre qu'ils varient linéairement avec le logarithme du temps selon une pente β pour chaque effort

Q. Au niveau de la courbe de la variation de la pente β en fonction de Q, la charge critique (ou de fluage) correspond au point de brisure de cette courbe. Mécaniquement parlant, au-delà de la charge critique, la vitesse des tassements augmente brusquement, ce qui correspond au domaine d'instabilité des tassements dans le temps et à la convergence vers la rupture du sol. Comme le montre la figure 6, le rapport Q_c/Q_f est pratiquement constant et fluctue autour de 0.45, alors que selon les recommandations de dimensionnement des pieux, telles que le fascicule 62, ce rapport dépend plutôt de la contribution des efforts limites en pointe et en frottement latéral.

Tableau 2. Méthodes d'interprétation d'un pieu non instrumenté

Méthode	Principe	Références
1. Ajustement hyperbolique	Ajuster la courbe $Q(s)$ par la fonction hyperbolique : $Q = \frac{Q_f \cdot s}{s + S_0}$; S_0 (cm) : Paramètre de la courbe (voir Fig. 2) (10% tassement)	Denigès et Chenu (1970)
2. Courbe de la pente	Traquer la tangente à la courbe à l'origine ; Traquer la tangente de pente de 5 kN/cm ; S_0 (cm) : Paramètre des deux tangentes	Heller et Levy (1977)
3. Courbe de 90%	Traquer la courbe $Q(s)$ à $s = 0.9 S_0$; Ajuster l'allure finale par une droite et lire : L'effort vertical limite en : $Q_f = 0.9 S_0 \cdot \beta$	Boussin (1963)
4. Courbe de la "Valeur limite"	Utiliser les tables avec et sans ce paramètre ; Traquer la courbe $Q(s)$ et la droite de compression (droite) de pente dont le paramètre est $0.1 S_0$; Traquer une droite parallèle à la précédente et passant par le point $(0.1 S_0, 0.45 Q_f)$; L'intersection avec la courbe $Q(s)$ donne S_0	Denigès (1972)
5. Courbe conventionnelle	Elle correspond à un tassement de 10% de B	

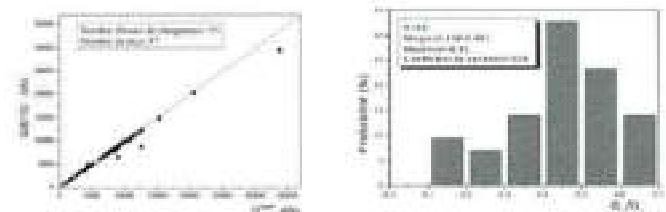


Fig. 5. Comparaison de l'effort Q_f et $Q(0.1B)$

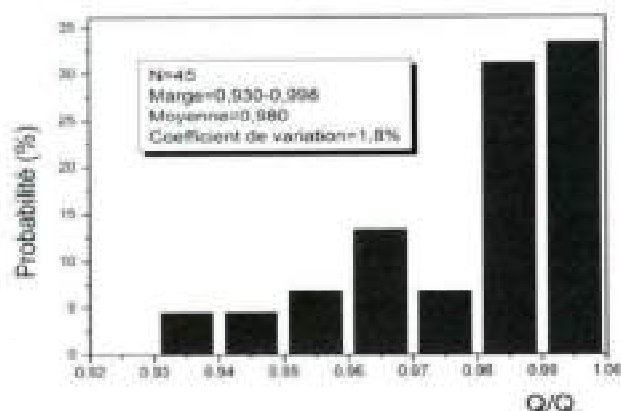


Figure 6. Histogramme d'analyse statistique du rapport Q_c/Q_f .

3.4. CONCEPT DU TASSEMENT DE RÉFÉRENCE

L'équation (1) peut se réécrire comme suit en introduisant la notion du tassement de référence v_r :

$$\frac{Q}{Q_c} = \frac{v_0}{1 + \frac{v_0}{v_r}} \quad (3)$$

Les termes Q/Q_c et v_0/v_r sont appelés respectivement niveau de chargement du pieu et niveau de tassement du pieu et le paramètre v_r défini par l'équation suivante est appelé tassement de référence :

$$v_r = \frac{Q_c}{K_p^0} \quad (4)$$

En outre, dans le cadre d'une formulation élastoplastique de la courbe de chargement, comme le montre la figure 8-a, on remarque que v_r correspond plutôt à la limite du comportement linéaire du système pieu/sol et donc au seuil de la capacité portante, soit Q_f .

D'après l'équation (3), en remplaçant le tassement v_0 par v_r , la charge verticale correspondant au tassement de référence est égale à la moitié de la capacité portante, soit un niveau de chargement de 50%. Il est remarquable que ce niveau de chargement corresponde approximativement, d'après le paragraphe 3.3, à la charge critique. Ce qui laisse conclure que le tassement de référence peut être interprété comme étant un tassement critique, c'est-à-dire le seuil d'instabilité des tassements dans le temps.

L'étude statistique du tassement de référence, comme l'illustre la figure 7, montre qu'il varie dans une marge de 0.01 à 1% de

B, avec une moyenne de 0.24% de B. Le caractère dispersé des valeurs analysées montre que le tassement de référence dépend d'autres paramètres de l'interaction pieu/sol, tels que la compressibilité relative pieu/sol et éventuellement de l'élançement du pieu.

Reprenons l'équation (3) et écrivons que pour un tassement de 0.1B, la charge verticale est égale en moyenne à $0.98Q_f$, conformément au paragraphe 3.2. On en déduit que :

$$\frac{v_r}{B} = 0.2\% \quad (5)$$

Cette valeur correspond d'ailleurs à la valeur moyenne de ce paramètre et peut être utilisée à titre indicatif comme un ordre de grandeur du tassement de référence.

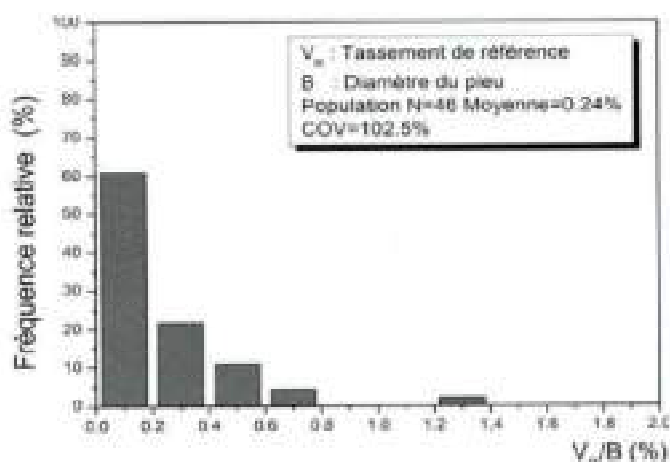


Figure 7 - Histogramme du tassement de référence du pieu

3.5. NOTION DE TASSEMENT ADMISSIBLE D'UN PIEU ISOLÉ

Le tassement d'un pieu isolé se calcule couramment sous une force verticale, la plus grande des deux combinaisons de charge des états limites de service, en l'occurrence les combinaisons rares et quasi permanentes [4], [10]. Selon le Fascicule 62, cette force verticale est limitée à $0.7Q_c$, soit environ $0.35Q_f$ [4]. On voit qu'à partir de l'équation (3), le tassement correspondant à une force égale à $0.7Q_c$ est égal à $0.54v_r$, soit de 0.1% de B, si on adopte une valeur 0.2% de B pour V_r . Cette valeur peut donc être recommandée comme étant une estimation de la valeur admissible du tassement d'un pieu.

À titre comparatif, Frank (1995) a recommandé d'estimer le tassement en tête d'un pieu foré isolé sous une charge verticale égale à $0.7Q_c$, par 0.6% de B [11].

Vesic (1977) a recommandé d'estimer le tassement en tête du pieu isolé dans un sol pulvérulent comme étant la somme de 1% de B et du raccourcissement élastique ΔL du pieu [12].

$$v_0 = B/100 + DL \quad (6)$$

$$DL = QD/SE_p \quad (7)$$

E_p , D et S sont respectivement le module d'Young du matériau du pieu, sa fiche et l'aire d'une section transversale.

Enfin, Meyerhof (1956) a proposé d'estimer empiriquement le tassement d'un pieu isolé, sous une force admissible, quel que soit le type de sol, à 1.1% de B [5].

Il se dégage que la valeur suggérée de 0.1% de B pour la tassement admissible, sous une charge verticale égale à $0.7Q_c$, est la plus petite de ces recommandations, ce qui permet une évaluation pessimiste allant dans le sens de la sécurité.

3.6. COURBE DE CHARGEMENT NORMALISÉE

En vue de recommander une approche simplifiée d'estimation du tassement d'un pieu isolé sous les charges de service, en phase préliminaire d'un projet de fondations sur pieux, la courbe de chargement a été normalisée et simplifiée, comme le schématise la figure 8-b, en une courbe tri-linéaire. La première portion correspond au domaine des petits déplacements du pieu, limité au tassement de référence, soit de $0.2\%B$. Remarquons que la pente K_v' de cette portion correspond à une raideur sécante plus petite que la raideur initiale K_v^0 de la courbe de chargement. Ainsi, le tassement v_0 sera estimé par excès à partir de cette portion, ce qui est du côté de la sécurité.

La deuxième portion correspond au domaine des déplacements moyens du pieu, variant entre 0.2% à 10% de B et qui correspond au dépassement de la charge critique. Et enfin, la dernière portion correspondant au domaine des grands déplacements du pieu, correspond à la mobilisation de la capacité portante du sol autour du pieu.

L'utilité d'une telle courbe est d'estimer rapidement et manuellement le tassement d'un pieu en phase préliminaire des calculs sans avoir recours aux méthodes traditionnelles de calcul des pieux. En phase de petits déplacements, correspondant d'ailleurs au domaine des charges de service transmises aux pieux, on peut estimer le tassement en tête du pieu de la figure 8-b, comme suit :

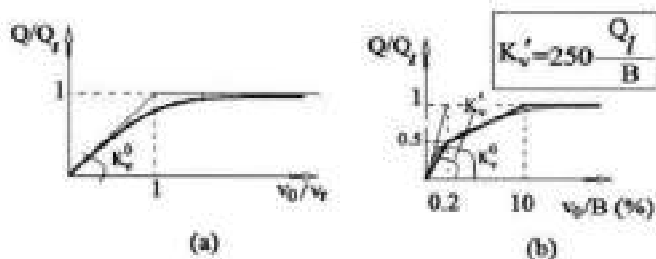


Figure 8 - Courbes normalisées de chargement
(a: schéma élasto-plastique, b: courbe tri-linéaire simplifiée)

$$v_0 = \frac{Q}{Q_c} \frac{B}{250} \quad (6)$$

Il faut noter qu'une telle formulation n'est valable que pour des charges verticales transmises au pieu correspondant à un niveau de chargement Q/Q_c inférieur à 0.5, comme le schématise la figure 8-b, autrement dit à des charges Q inférieures à la charge critique Q_c .

A titre d'application, considérons un essai de chargement rentrant dans le cadre du projet de la centrale thermique de Jijel. Le calcul de la capacité portante à partir de la méthode pénétrométrique selon le Fascicule 62 a donné une valeur moyenne de Q_f égale à 6291 kN, avec un coefficient de variation de 17.7% pour tout le terrain. Le pieu d'essai est en béton armé, ayant un diamètre de 1.00 m, une fiche de 23 m, et battu dans un sol argileux. Les deux premiers incréments correspondent à des charges de 1600 et 3200 kN, auxquels correspondent respectivement les niveaux de chargement de $1600/6291=0.254$, et $3200/6291=0.508$. Les tassements mesurés en tête sont respectivement de 0.90 et 5.10 mm.

Le tassement calculé par interpolation linéaire à partir de la courbe tri-linéaire de la figure 8-b est égal à $0.254 \times 1000/250 = 1.02$ mm pour la première charge, et de $0.356 \times 1000/100 = 3.6$ mm pour la deuxième.

La charge verticale critique Q_c , obtenue à partir de l'essai de chargement étant de 3835 kN, se trouve en bonne concordance avec l'estimation de Q_c par la moitié de Q_f , soit de $6192/2 = 3096$ kN.

Malgré la bonne prévision des résultats de cet essai de chargement par la méthode proposée, il faut garder à l'esprit qu'il s'agit d'une approche simplifiée limitée aux prévisions préliminaires du comportement du pieu et qu'elle doit être suivie, dans un stade avancé du projet, par une analyse rigoureuse des déplacements du pieu.

3.7. VALIDATION DU MODÈLE DE LA COURBE DE CHARGEMENT NORMALISÉE

Une comparaison directe a été faite entre les tassements mesurés au cours des essais de chargement de pieux et ceux calculés à partir de la courbe de charge normalisée (figure 8-b). La figure 9 illustre le calcul du tassement pour des charges plus petites que Q_c , à partir de l'équation (6), comparé à celui mesuré dans 8 essais de chargement de pieux dans 6 sites, la capacité portante Q_f étant calculée par la méthode pressiométrique. On constate que le tassement calculé dans la quasi-totalité des cas est plus grand que le tassement mesuré. En outre, selon la figure 10, l'histogramme du rapport tassement calculé sur tassement mesuré peut être ajusté par une loi normale de Gauss, caractérisée par une valeur moyenne de 1.78 et une variance de 1.01.

Il se dégage que la courbe de chargement normalisée offre la possibilité d'une évaluation pessimiste du tassement sous des

forces inférieures à la force critique, ce qui justifie la recommandation de son utilisation en pratique, en phase préliminaire d'un projet de fondations sur pieux.

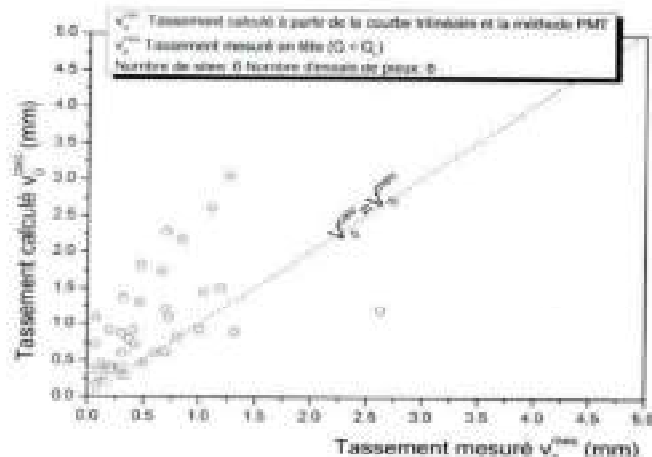


Figure 9 - Comparaison des tassements calculés et mesurés en tête du pieu

4. ÉTUDE COMPARATIVE DES MÉTHODES DE CALCUL DE LA CAPACITÉ PORTANTE

4.1. CHARGE VERTICALE CRITIQUE

La charge verticale critique peut être estimée selon les règlements algériens DTR-BC 2.33.2 (Réf. [10]) et français CCTG-93 Fascicule 62 (réf. [4]) par calcul à partir des termes Q_p de résistance en pointe et Q_s du frottement latéral d'un pieu ne roulant pas le sol, comme suit:

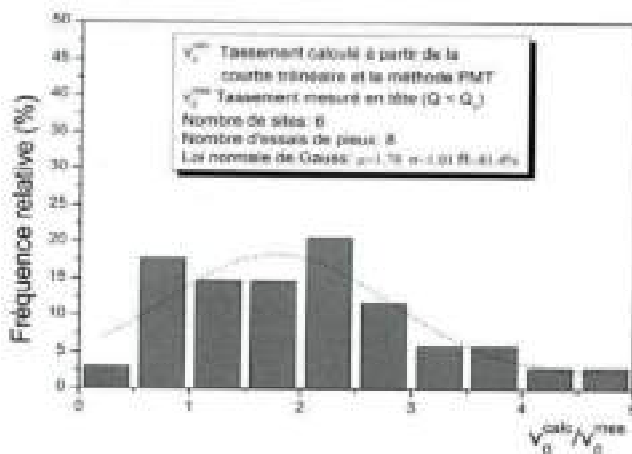


Figure 10. Histogramme de comparaison des tassements calculés et mesurés

$$Q_c = 0,5Q_p + 0,7Q_s \quad (8)$$

Une comparaison de la charge critique calculée et mesurée a eu lieu sur l'ensemble de 9 sites (essai PMT) et 12 sites (essai CPT). Notons que le calcul a été mené au droit de chaque sondage d'essai in-situ du fait que dans la majorité des projets de cette base de données, la position exacte du pieu d'essai par rapport aux sondages d'essais in-situ n'est pas précisée.

Il se dégage de la figure 11 que l'équation (8) mène, selon la méthode pressiométrique, à une importante surestimation de la charge critique avec un excès moyen de 76% et un coefficient de variation de 52%. Les prévisions de Q_c sont par contre meilleures avec la méthode pénétrométrique qui donne en moyenne des valeurs de 14% de moins que les valeurs expérimentales. Du fait de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques des sols étudiés, une telle prévision par la méthode pénétrométrique paraît bonne.

4.2. CHARGE VERTICALE LIMITE (OU CAPACITÉ PORTANTE)

Un calcul prévisionnel de la capacité portante a été mené sur la base des méthodes de calcul à partir des essais pressiométrique (PMT) et pénétrostatique (CPT), conformément au règlement français CCTG-93, fascicule 62, titre 5 (Ref. [4, 5]).

Comme le montre la figure 12, l'application de la méthode pressiométrique à 8 pieux a permis d'estimer la capacité portante à environ 0,90 fois celle déduite de l'essai de chargement avec un coefficient de variation de 65%.

La méthode pénétrométrique a été appliquée à 12 pieux et a permis de prédire, selon la figure 12, la capacité portante en moyenne de 0,86 fois la valeur expérimentale et un écart-type de 0,29.

Il se dégage de cette étude comparative la bonne qualité prédictive des méthodes pressiométrique et pénétrométrique, en dépit de leur caractère légèrement optimiste, vue l'incertitude entachant la caractérisation géotechnique de certains sites d'essai, à cause de la variabilité spatiale prononcée des paramètres géotechniques mesurés. Ces deux méthodes sont d'ailleurs largement utilisées en Algérie dans les projets de fondations sur pieux.

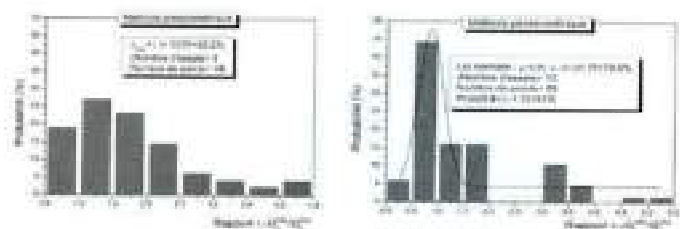


Fig. 11. Comparaison des charges critiques calculées et mesurées

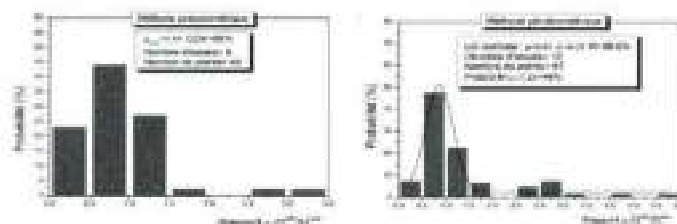


Fig. 12. Comparaison des charges limites calculées et mesurées

5. CONCLUSIONS

Les résultats d'analyse d'une base de données locale, relative aux essais de chargement de pieux, ont été présentés. L'interprétation des essais de chargement des pieux s'est focalisée sur la capacité portante, la charge critique et le tassement de référence. En deuxième partie, une étude comparative des méthodes courantes de dimensionnement à la base des essais in-situ a été menée, en l'occurrence les méthodes pressiométrique et pénétrostatique. Il a été constaté que ces deux méthodes permettent une prévision de la capacité portante en bonne concordance avec celle de l'ajustement hyperbolique des courbes de chargement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. M. Cassin (1988) *Les essais in-situ en mécanique des sols, Tome 1: Réalisation et interprétation*, Eyrolles, Paris.
2. US Army Corps of Engineers (1993) *Bearing capacity of soils, Technical Engineering and Design Guides as adapted from the US Army corps of Engineers*, No. 7, ASCE Press, Reston, Virginia.
3. A. Henniche (2010) *Contribution à l'analyse du comportement des pieux sous chargement vertical, Analyse d'une base de données locale*, Thèse de Magistère en Génie Civil soutenue le 26 mai 2010 à l'ENPA (École Nationale Polytechnique d'Alger), 148 p.
4. Ministère de l'équipement, du logement et du transport (1999), *Règles techniques de conception et de calcul des fondations d'ouvrages de génie civil*, Fascicule 62, titre V, Eyrolles, Paris, France, 188 p.
5. A. Bouafia (2011) *Les essais in-situ dans les projets de fondations*, Office des Publications Universitaires OPU, Alger, ISBN : 978-9961-0-0612-4, 3^e édition, 299 p.
6. H. Mahdi et O-A. Ouldine (2011) *Dimensionnement des pieux sous charges axiales, Etude comparative à partir d'une base de données locale d'essais de chargement de pieux*, Thèse de Master en Géotechnique, soutenue en juillet 2011 à l'Université de Blida.
7. A. Bouguerrouché et A. Bourdoir (1993) *Etude du comportement d'un pieu isolé chargé axialement*, Mémoire de fin d'études d'ingénieur soutenu en juillet 1993 à l'ENTP (École Nationale des Travaux Publics).
8. K. Goutal et S-A. Benkada (1994) *Contribution à l'étude du comportement d'un pieu chargé axialement*, Mémoire de fin d'études d'ingénieur en Génie Civil soutenu en juin 1994 à l'Université de Blida.
9. Bouafia, A, Henniche, A (2011) *Contribution à l'analyse du comportement des pieux sous chargement vertical, Analyse d'une base de données locale*, Comptes rendus de la 15^e Conférence Régionale Africaine de géotechnique, 18-21 juillet 2011, Maputo, Mozambique.
10. Ministère de l'Habitat (1994) *Méthodes de calcul des fondations profondes*, document technique réglementaire DTR-BC 2.33.2, ISBN 9961-923-00-6, 56 p.
11. Frank R (1995) *Fondations profondes*, Enseignement T6-T9, ENPC, extrait de la collection *Techniques de l'Ingénieur* C-248, 43 pages.
12. Fellentus B (1989) *Geotechnical guidelines. Pile design*, Recommandations des travaux publics de Canada, 72 p.