

PRÉVISION DE LA CAPACITÉ PORTANTE ET DU TASSEMENT D'UN PIEU FORÉ ISP₅ – PRESSIO 2005

Jacky D. Razafindrabe¹, Voahanginirina. J. Ramasiarino², Lala Andrianaivo³

¹ Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment, Antananarivo 101

² Département Des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, BP 906, Antananarivo 101

³ Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101

Résumé

Le but de cette étude est la familiarisation des ingénieurs aux méthodes de calcul sur la prévision de la capacité portante et du tassement d'un pieu à partir des essais au pressiomètre, ainsi que le dépouillement des mesures pressiométriques.

Le travail a été abordé sous forme d'exercice. Des exemples pratiques d'application sont traités numériquement.

L'ingénieur a donc intérêt à mettre en évidence dans ses calculs de prévision la part prise respectivement par le terme de pointe et le frottement latéral mobilisable.

Les paramètres géomécaniques des sols sont fournis par les essais pressiométriques.

La pression limite permet le calcul du terme de pointe. Le module pressiométrique est utilisé dans la prévision des tassements.

Mots clés : Pressiomètre, capacité portante, pieu, ISP5, géomécanique, calcul, abaque, géotechnique.

Liste des notations principales

β : Coefficient réducteur

μ : Coefficient réducteur

$\Delta P (P_2 - P_1)$: Variation de la pression interne de la sonde

$\Delta V (V_2 - V_1)$: Variation de volume de la cellule de mesure

γ : Poids volumique du sol [kN/m³]

γ_w : Poids volumique de l'eau [kg/cm³]

CPV : Contrôleur pression volume

D : Diamètre du pieu [m]

ELS : Etat limite de service [kN]

ELU : Etat limite ultime [kN]

E_M : Module pressiométrique [MPa]

h : Hauteur manomètre de mesure [m]

H : Profondeur de l'essai [m]

h_o : Mesure de la moitié de la sonde, hauteur de référence égale à 0,35m

ISP 05 : International Symposium pressiometer 2005

k : Facteur de portance

P : Périmètre du pieu [m]

Pl : Pression limite [MPa]

Pl_{brute} : Pression limite brute à la fin de l'essai [MPa]

Pl_e : Pression limite équivalente [MPa]

P_{inertie 750} : Pression d'inertie obtenue lors de l'étalonnage, correspondant à 750cm³ de volume [MPa]

q_{si} : Frottement latéral unitaire [kN]

Q : Capacité portante des pieux [kN]

Q_p : Terme de pointe [kN]

Q_s : Frottement latéral total mobilisable [kN]

V'_o : Volume au repos de la cellule de mesure égal à 535cm³

V_m : Volume de sol déplacé par la cellule de mesure. Il correspond au milieu de la partie linéaire de la courbe pressiométrique [cm³]

V_s : Volume à vide de la sonde [cm³]

w : Tassement en [cm]

v : Coefficient de poisson égal à 0,33

λ : Coefficient de forme.

1. INTRODUCTION

La définition de la charge maximale qu'on peut appliquer à une fondation profonde sans risque de rupture ni de tassement excessif important avec l'ouvrage projeté, doit se dérouler en deux phases :

- D'abord, le calcul de la résistance du terrain ou « terme de pointe »
- Ensuite, le calcul de frottement des terrains latéraux sur le fût enterré de la fondation.

La somme de ces deux termes constitue la « capacité portante ».

Le calcul de la prévision de la capacité portante et du tassement du sol utilise les paramètres géomécaniques déterminés à partir des essais pressiométriques.

Le pressiomètre Ménard a été utilisé en Afrique sub-saharienne dès les années 50, puis par l'Entreprise SIF-Bachy pour les études géotechniques des sols destinés à des ouvrages importants ou en site maritime (Gambin, 1979).

Actuellement, partout dans le monde, l'essai pressiométrique constitue l'un des essais in-situ les plus couramment utilisés, on peut citer entre autres : le Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment de Madagascar (LNTPB) depuis les années 1970, le Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes pour l'Équipement (CEREEQ) au Sénégal depuis 1999, le Centre National d'Étude et de Recherche pour les Travaux Publics (CNERTP) de Cotonou au Bénin et le LABOGENIE de Yaoundé (Gambin, 1984).

Dans le cadre de la célébration du 50^e anniversaire du premier brevet sur le pressiomètre Ménard, lors d'un symposium International ISP 05 qui s'est tenu à l'École Nationale des Ponts et Chaussées dans les nouveaux locaux de Marne la Vallée du 22 au 24 août 2005, des exercices sur le calcul de la prévision de la capacité portante et du tassement d'un pieu ont été proposés.

Des informations ont été fournies par les géotechniciens membres du Comité Transnational des Géotechniciens d'Afrique (CTGA). Ce Comité comprend des membres

originaires des pays suivants : l'Angola, le Bénin, le Burkina-Faso, le Burundi, le Cameroun, le Congo (Brazzaville), la Côte d'Ivoire, le Gabon, la Guinée, Madagascar, le Mali, l'île Maurice, la Mauritanie, la République Démocratique du Congo (Kinshasa), la République Centrafricaine, la République de Djibouti, le Rwanda, le Sénégal, le Tchad et le Togo (Société Internationale de la Mécanique des sols et de la Géotechnique, 2005).

2. PLAN DE CETTE ETUDE

Comme l'annonce le titre, notre but est le calcul de la capacité portante d'un pieu d'une part et du tassement d'autre part. Pour cela, nous procédons en trois étapes :

- Dans un premier temps, à partir du dépouillement des résultats des essais pressiométriques, nous calculons la pression limite pressiométrique P_L et le module pressiométrique E_M .
- Dans un deuxième temps, en s'appuyant sur les résultats précédents, nous établissons des relations permettant de calculer la capacité portante.
- Enfin dans le troisième temps, nous procédons au calcul du tassement

Ces résultats sont présentés de façon à être facilement utilisables par les ingénieurs.

3. DEFINITION DES PARAMETRES PRESSIOMETRIQUES

3.1. Mesure pression/volume

On exerce un champ de contraintes sur la paroi d'un forage à l'aide d'une pression produite par une simple bouteille d'air comprimé (azote), et on contrôle le volume d'eau injectée dans la cellule gonflable.

Le champ de déformation du sol entourant la cellule centrale de la sonde est rendu cylindrique grâce aux deux cellules de garde qui s'opposent à l'écoulement plastique du sol de part et d'autre de la zone centrale soumise au champ des contraintes contrôlées.

Les mesures de la variation de volume correspondant à la pression exercée au cours de l'essai permettent de définir les caractéristiques mécaniques du sol par la construction de la courbe pressiométrique.

Le système de mise en pression de la sonde doit permettre de réguler l'application des pressions par pas de 0,5MPa en moins de 10 secondes.

Le volume d'eau injecté dans la sonde pressiométrique, selon des plages de pression est mesuré à partir du CPV de l'appareil pressiométrique. La définition de la résistance propre de la sonde placée à proximité du CPV, hors sol et à l'air libre, par expansion selon les mêmes conditions que celles de l'essai, donne la courbe pression volume appelée courbe d'étalonnage, et dont la résistance propre sera l'inertie (Ménard, 1971).

La pression maximale correspond à un volume de liquide injecté au moins égal à $1,2V_s$.

$$P_{\text{inertie } 750} = 1,2 V_s$$

L'appareil doit être étalonné avant l'exploitation (Figure 1).

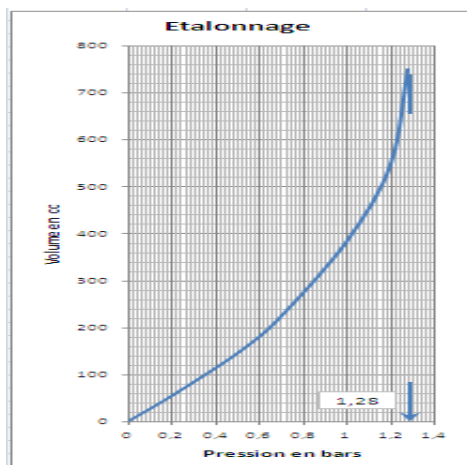


Figure 1 : courbe d'étalonnage de la sonde

3.2. Propriétés des sols déduites d'essais in-situ

Le dépouillement des résultats des essais au pressiomètre par Menard a été effectué à partir de la méthode classique, exploitant les courbes de chargement pression volume.

Pour chaque niveau de profondeur d'essai, on doit pouvoir construire la courbe pressiométrique brute, la courbe de fluage et aussi la courbe d'étalonnage de la sonde.

La courbe pressiométrique est construite en portant en abscisse la pression et en ordonnée le volume injecté correspondant à la fin de palier de mise en pression à 60s (Figure 2).

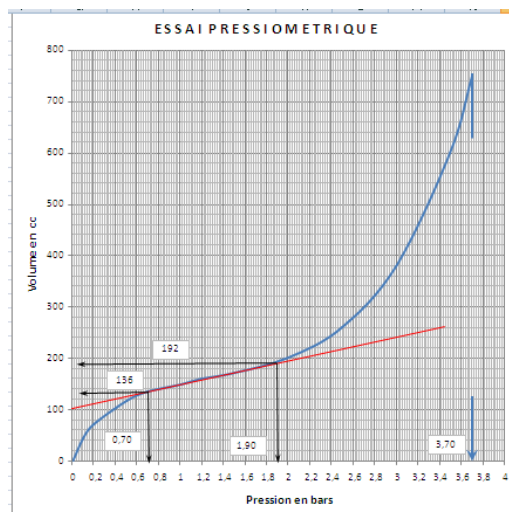


Figure 2 : courbe pressiométrique brute

La pression limite PL_M est définie par :

$$PI = (PL_{\text{brute}} - P_{\text{inertie } 750}) + (H + h - h_0) * \gamma_w$$

Le module pressiométrique E_M

$$E_M = k \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

Avec $\Delta P = P_1 - P_2$

$$\Delta V = V_1 - V_2$$

$$V_M = \frac{V_1 + V_0}{2}$$

$$k = 2(1 + \nu)(V'_o + V_m)$$

Exemple de calcul obtenu par dépouillement des mesures pressiométriques :

$$PI = (3,70 - 1,28) 0.1 + (1,00 + 0,80 - 0,35) \times 10^{-3}$$

$$PI = 0,26 \text{ MPa}$$

Pour la définition du module pressiométrique E_M

Nature des sols	qs [KPa]	Qs [KPa]	PI [KPa]	kp	Type de sol
Limons 1,40m	17,73	38,99	0,31	-	A bis
Argile 9,60m	33	497,64	1,22	1,60	A

$$\Delta P = 1,90 - 0,70 \quad \Delta P = 1,20 \text{bars}$$

$$\Delta V = 192 - 136 \quad \Delta V = 56 \text{cm}^3$$

$$V_M = \frac{192+136}{2} \quad V_M = 164 \text{cm}^3$$

$$k = 2 (1+0,33) (535+164)$$

$$k = 1859,34$$

$$E_M = 1859,34 \times \frac{1,20}{56}$$

$$E_M = 3,98 \text{MPa}$$

Les résultats obtenus des essais au pressiomètre sont récapitulés dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Paramètres pressiométriques

Profondeur (m)	Module E_M (Mpa)	Pression limite PI (Mpa)
1	3.98	0.26
2	5.40	0.35
3	8.02	0.55
4	11.58	0.72
5	18.07	0.85
6	11.98	0.93
7	27.44	1.05
8	13.63	0.99
9	24.91	1.20
10	23.53	1.31
11	25.56	1.32
12	27.98	1.45
13	49.08	1.57
14	38.50	1.55

Ces résultats représentés sous forme de graphique ont permis d'établir la coupe pressiométrique suivant une échelle logarithmique en abscisse (Figure 3 en annexe).

La coupe pressiométrique a mis en évidence deux catégories de sols :

- ✓ une couverture de limons d'épaisseur variable 1,40m
- ✓ une couche d'argiles reconnue jusqu'à 14 m de profondeur (Figure 3).

Le tableau 2 synthétise les différentes caractéristiques géotechniques.

Tableau 2 : Caractéristiques géotechniques des couches

4. PRÉVISION DE LA CAPACITÉ PORTANTE D'UN PIEU FORÉ

4.1. Calcul du terme de pointe

Le terme de pointe sera déduit de la relation :

$$Q_p = (kp/3) PI S$$

Avec : kp facteur de portance déduit de l'abaque de Bustamante et Gianeselli à partir de la valeur de H_e/R (Figure 4) :

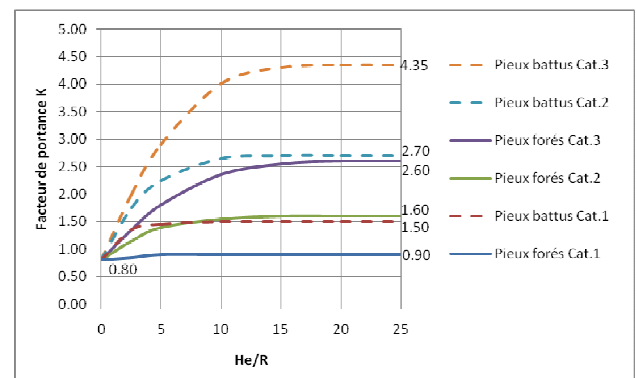


Figure 4 : Abaque pour la détermination du facteur de portance k

PI : est la pression limite de la couche d'assise au niveau de la pointe

S : section droite du pieu égal à 0.20 m^2

3 : valeur du coefficient de sécurité adopté pour le terme de pointe

D'où :

$$Q_p = (1.6/3) * 1220 * 0.20$$

$$Q_p = 130 \text{kN}$$

4.2. Calcul du frottement latéral

Le terme de frottement latéral au niveau de chaque couche i (Figure 5) est donné par :

$$Q_{si} = p h_{si} \cdot q_{si}$$

Le frottement latéral total mobilisable à la rupture sera donc:

$$Q_s = p \sum_1^n h_{si} q_{si}$$

q_{si} : est le frottement latéral unitaire obtenu à partir de l'abaque de Bustamente suivant la pression limite P_l et la nature du sol (Tableau 3 en annexe) ;

h_{si} est la hauteur du fût ;

p est le périmètre du pieu, avec $p = \pi D$

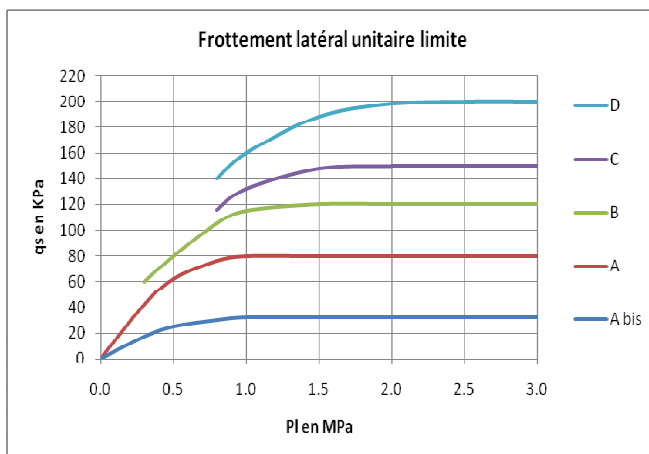


Figure 5 : Abaque q_s – frottement latéral unitaire

Le diamètre du pieu est de 0.50m.

$$Q_s (\text{limon}) = 3.14 * 0.50 * 1.40 * 17.73$$

$$Q_s (\text{limon}) = 38.99 \text{ kN}$$

$$Q_s (\text{argile}) = 3.14 * 0.50 * 9.60 * 33$$

$$Q_s (\text{argile}) = 497.64 \text{ kN}$$

D'où :

$$Q_s = 537 \text{ kN}$$

La force portante des pieux sera donnée, d'après la norme en vigueur du DTU 1.3.2, par :

$$Q = Q_p \mu + Q_s \beta$$

$$\text{Avec : } \beta = 0,5 \quad \mu = 0,33 \text{ ELS}$$

$$\beta = 0,75 \quad \mu = 0,5 \text{ ELU}$$

• A l'état limite ultime (ELU)

$$Q_{ELU} = 0.5 Q_p + 0.75 Q_s$$

• A l'état limite de service (ELS)

$$Q_{ELS} = 0.33 Q_p + 0.5 Q_s$$

Les charges de calcul sont :

$$Q_{ELS} = 312 \text{ kN}$$

$$Q_{ELU} = 468 \text{ kN}$$

5. CALCUL DU TASSEMENT

La prévision des tassements (Van Wambeke, 2005) est donnée par la relation :

$$w = (P/2E_M) * \lambda * R$$

P sera la contrainte de la charge, soit à 1/3 de la charge limite, soit sous une charge de 500kN.

λ : coefficient de forme égal à 1

La prévision des tassements est de :

Cas du 1/3 de la charge limite

$$w = 104 / (2 * 25560) * 25$$

$$w = 0,05 \text{ cm}$$

Cas de charge égale à 500kN

$$w = 500 / (2 * 25560) * 25$$

$$w = 0,25 \text{ cm}$$

6. CONCLUSION

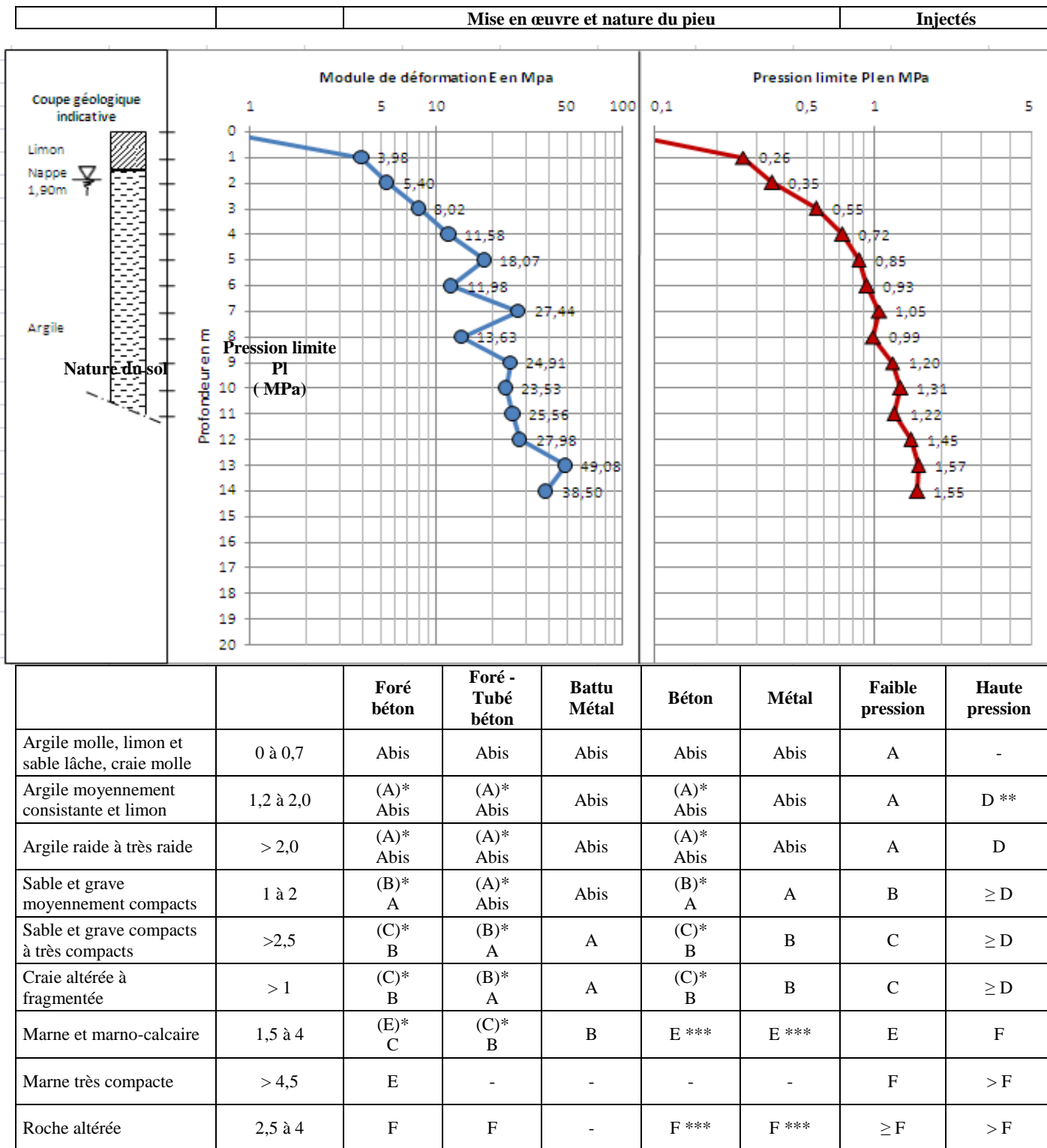
Dans le cadre impliquant la vulgarisation de leurs prestations, les laboratoires ont pu développer l'usage des essais pressiométriques dans le calcul de la prévision de la portance et du tassement d'un pieu sous une charge verticale statique.

Leur intérêt réside dans le fait que quelle que soit la nature des sols rencontrés, la méthode pressiométrique est pratiquement toujours réalisable, exploitable qu'elle restait globalement la plus fiable pour ce qui est de la

prévision des charges caractéristiques et des tassements du sol.

Figure 3 : Courbes pres

Cet article peut servir d'outil d'aide facilement utilisable pour les utilisateurs-initiateurs et les ingénieurs œuvrant dans le domaine du génie civil.



Roche fragmentée	> 4,5	F	-	-	-	-	≥ F	> F
<p>* Les valeurs entre parenthèses () correspondent, pour les pieux forés, à une exécution soignée du pieux et une technologie de mise en œuvre susceptible de remanier au minimum le sol au contact du fût. Pour les pieux battus. par contre, à un terrassement du sol sur le pieu après battage.</p> <p>** Préconisé pour des sols dont $PI \geq 1,5$ MPa.</p> <p>*** Seulement pour les cas où le battage est possible.</p>								

Tableau 3 : Abaque de Bustamente - $q_s = f(PI, \text{nature du sol})$

RÉFÉRENCES

Gambin, M., (1979) : L'usage du pressiomètre. Actes du 7ème Congrès Régional Européen de la SIMSTF, « Les paramètres de conception en géotechnique » A. A. Balkema, Rotterdam

Gambin, M., (1984) : Ten years of Dynamic Consolidation, Proc.8th ISSMFE Regional Conference for Africa, Harare, Zimbabwe, A. A. Balkema, Rotterdam

Ménard, L., (1978) : The use of dynamic consolidation for off-shore and near-shore structures, 7ème Congrès International des Ports, KVIV, Anvers

Ménard, L., (1971) : Le tassement des fondations et les techniques pressiométriques, bilan après dix ans de résultats expérimentaux, Annales de l'ITBTP, N°288, décembre, Paris

Société Internationale de la Mécanique des sols et de la Géotechnique, (2005) : La lettre de la géotechnique N°40 et 44

Van Wambeke, A., (2005) : Communication personnelle

.