

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Réajustement des Paramètres de Calcul des Pieux

Adjustment of Pile Design Parameters

M.G. BUSTAMANTE Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France
L. GIANESSELLI

RESUME On traite du problème de la prévision de la capacité portante des pieux isolés sous charge statique. Les conclusions rapportées reposent sur l'interprétation d'essais en vraie grandeur effectués sur pieux forés, battus ou injectés. Les essais ont intéressé une gamme très étendue de sols dont les caractéristiques ont été déterminées à partir d'essais pressiométriques, pénétrométriques ou de laboratoire. Le fait d'avoir pu éprouver des pieux équipés a permis de mesurer les valeurs du frottement latéral ainsi que la résistance de pointe. La comparaison de ces termes avec les valeurs calculées à partir des méthodes pressiométriques et pénétrométriques a conduit à réajuster l'ensemble des paramètres prescrits par ces deux méthodes. On donne les valeurs réajustées des nouveaux paramètres en tenant compte du mode de mise en oeuvre et du type de pieux, de la nature des sols et de leur compacité.

INTRODUCTION

En dépit de nombreuses méthodes de calcul existantes, déterminer la capacité portante d'un pieu de manière à ce que celle-ci soit proche de la portance réelle reste toujours très difficile. Cela s'explique par le fait que les méthodes de calcul actuelles ont été élaborées sans tenir compte d'un élément aussi essentiel que l'incidence de la mise en oeuvre sur la portance mais surtout parce que les valeurs des différents paramètres de calcul (frottement latéral unitaire q_s et facteurs de portance de pointe k) proposées, n'ont été étalonnées qu'à partir d'un trop faible nombre de pieux instrumentés.

La réalisation par les Laboratoires des Ponts et Chaussées d'un nombre important d'essais de chargement en vraie grandeur a fourni les données expérimentales nécessaires à la vérification de la validité des méthodes de prévision de la portance des pieux reposant sur l'interprétation des essais de laboratoires (paramètres c et ψ) ou des essais en place (pressiomètre et pénétromètre statique ou dynamique). La comparaison entre portances réelles et calculées a donné l'occasion d'apprécier les mérites ou insuffisances de chacune des méthodes. Les limites de la présente communication obligent à ne rapporter que les résultats essentiels relatifs aux méthodes pressiométriques et pénétrométriques statiques parce que celles-ci, en dépit de leurs lacunes, présentent le plus d'avantages et méritent, à ce titre, d'être améliorées par un réajustement de leurs paramètres. Les principes de ces deux méthodes sont exposés dans le document FONDATIONS COURANTES D'OUVRAGES D'ART des Laboratoires des Ponts et Chaussées relatif au calcul des pieux (FOND. 72). La méthode pressiométrique relève des règles établies par MENARD (1963). Quant à la méthode pénétrométrique statique, celle-ci reprend les propositions de DINESH MOHAN (1963) pour le calcul du frottement latéral et de BEGEMANN (1965) pour la résistance

de pointe. On notera aussi, que lors du calcul de la charge nominale (ou charge admissible) Q_N , on a appliqué un coefficient de sécurité égal à 3 pour le terme de pointe et 2 pour le terme de frottement latéral.

De 1964 à 1979, les Laboratoires des Ponts et Chaussées ont réalisé 156 essais de chargement ou d'arrachement, sur un total de 59 pieux dont plus de la moitié, soit 37, étaient équipés d'extensomètres amovibles (Baguelin et al, 1978) pour la mesure du frottement latéral et de la résistance de pointe. Le Tableau I récapitule quelques données relatives aux pieux essayés.

TABLEAU I

Type de pieu	Nature du fût	Nombre de pieux	Nombre d'essais	Pieux instrumentés
foré	béton	34	38	18
	métal	1	2	1
foré injecté	coulis	6	19	6
battu	béton	6	14	3
	métal	6	14	3
battu injecté	coulis	2	2	2
vériné	métal	4	67	4

Les pieux forés regroupaient des pieux forés simples, tubés ou forés à la boue, avec utilisation suivant le cas, de tarière, bucket, hammer-grab, trépan, soupape. Les pieux battus concernaient des pieux métalliques H et tubulaires à base fermée. Les essais ont également intéressé des pieux lancés-battus.

GEOTECHNIQUE DES SOLS

Les essais de chargement ont été effectués sur un total de 32 sites, intéressant les sols les plus divers. Chaque site a fait l'objet d'une campagne de reconnaissance comprenant la réalisation d'essais en place, et dans la mesure du possible, d'essais de laboratoire. On a observé

qu'en raison de la compacité de certains sols, les essais pénétrométriques tant statiques que dynamiques, n'étaient réalisables sur toute la hauteur du pieu que sur 14 sites. Les essais de laboratoire réalisables certes pour tous les sites, conduisaient souvent, en raison de la nature des sols (altération, présence de gros éléments), à des résultats peu représentatifs. L'essai pressiométrique, par contre, s'est avéré non seulement toujours réalisable mais restait exploitable dans la totalité des cas. On a bien pu vérifier la supériorité de ce type d'investigation sur les autres essais (Baquelin et al, 1978). Le Tableau II donne, pour l'ensemble des sites et pour les sols intéressant la pointe du pieu, le nombre des différents essais réalisés à proximité des pieux essayés.

TABLEAU II

Nature du sol	Nb. de sites	Essais géotechniques réalisés			
		Pressiomètre MENARD	Pénétromètre statique	Dynamique	Essai laboratoire
Argile	11	8	5	1	5
Limon	8	8	6	1	3
Marne	5	5	0	0	3
Craie	4	4	3	3	3
Roche altérée	4	4	0	1	0

METHODOLOGIE D'ESSAI, DEFINITION DES CHARGES CARACTERISTIQUES

Tous les essais de chargement ont été réalisés en respectant le Mode Opératoire des Laboratoires des Ponts et Chaussées (1972). Selon ce dernier, le programme de chargement consiste à charger le pieu par paliers progressifs, d'égales intensité et durée (90 minutes), sans déchargements intermédiaires. La charge nominale (ou charge admissible) réelle \bar{Q}_N du pieu est ensuite obtenue en frappant d'un coefficient réducteur égal à 1,4, la charge de fluage Q_F (méthode CAMBEFORT-CHADEISSON, 1961). On a considéré que la charge limite \bar{Q} du pieu correspondait à la charge pour laquelle l'enfoncement de la tête était égal au 1/10^e du diamètre du pieu.

REAJUSTEMENT DES PARAMETRES DE CALCUL

Méthode pressiométrique - Le réajustement des règles pressiométriques a consisté :

- à redéfinir en la complétant, la classification des sols basée sur la notion de pression limite (p_1),
- à réduire pour les pieux battus de 25 % et pour les pieux forés de 50 %, les valeurs du facteur de portance k,
- à réduire ou augmenter suivant la nature du sol ou la mise en oeuvre du pieu, les valeurs du frottement latéral unitaire limite q_s .

Les nouvelles règles comportent à l'instar des règles Ménard, une série d'abaques et de tableaux permettant, en fonction de la nature du terrain et de sa compacité, du type de pieu, de sa mise en oeuvre et de son encastrement (H_e/R), de choisir les valeurs :

- du facteur de portance k pour le calcul de la résistance de pointe (Tableau III et

Fig. 1).

TABLEAU III

Pression limite p_1 ($10^5 Pa$) ⁺	Nature des sols	Catégorie
< 7	Argile molle	1
< 8	Limon et craie molle	
< 7	Sable argileux à limoneux ou vasard lâche	
10 à 18	Sable et grave moyennement compacts	2
12 à 30	Argile et limon compacts	
15 à 40	Marne	
10 à 25	Craie altérée	
25 à 40	Roche altérée	
> 30	Craie fragmentée	
> 45	Marne très compacte	3
> 25	Sable et gravier compacts à très compacts	
> 45	Roche fragmentée	

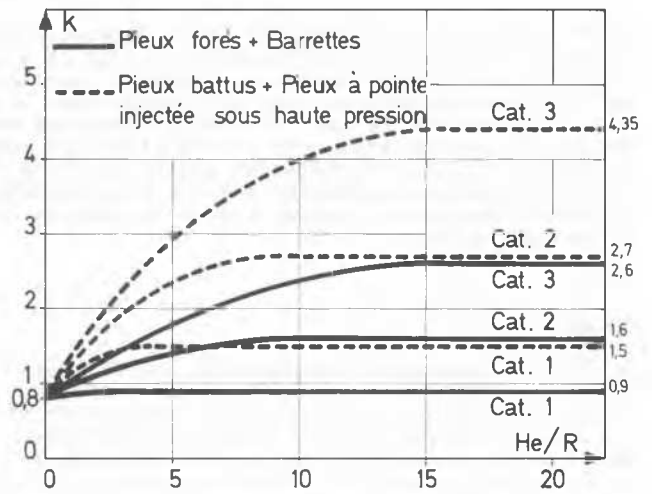


Fig. 1

- du frottement latéral unitaire limite q_s pour le calcul du frottement le long du fût (Fig. 2 et Tableau IV).

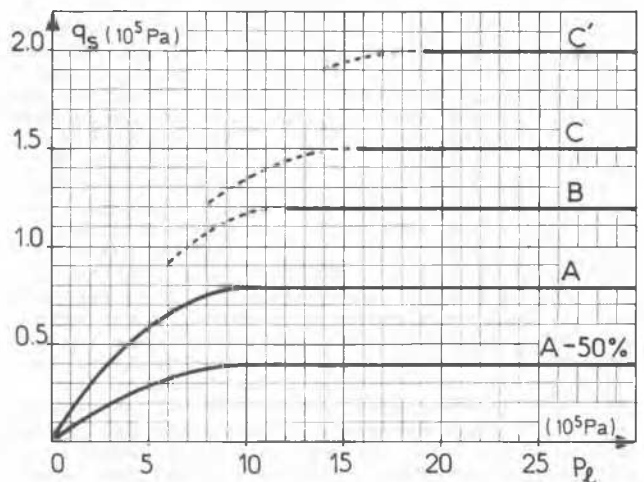


Fig. 2

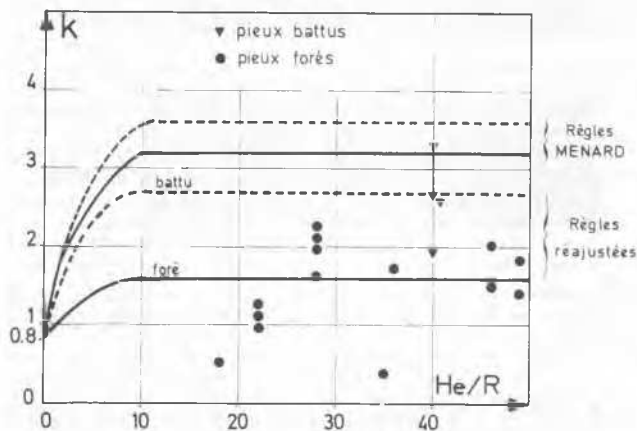
Il y a lieu, pour le choix des facteurs k, correspondant à des valeurs de p_1 situées entre catégories, d'interpoler.

TABLEAU IV

Nature du sol	P_1 (10^5 Pa)	Mise en oeuvre et nature du fût							
		foré (1)		foré tubé		battu (2)		injecté	
		fût béton	fût béton	fût métal	fût béton	fût métal	faible pression	haute pression	
Argile molle à compacte	≤ 30	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A	-	
Limon à limon compact	≤ 30	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A	-	
Argile et limon compacts	15 à 30	-	-	-	-	-	-	$\geq C$	
Sable argileux à limoneux ou vasard	< 7	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A	-	
Sable et grave moyennement compacts	10 à 18	A	A - 50%	A - 50%	A	A	B	$\geq C$	
Sable et grave compacts à très compacts	> 25	B	A	A	B	B	C	$\geq C'$	
Craie molle	< 8	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A - 50%	A	-	
Craie altérée à fragmentée	> 10	B	B	B	B	B	C	$\geq C'$	
Rocher altéré	25 à 40	C	C	C	-	-	$\geq C$	$> C'$	
Marne	15 à 40	C	C	C	-	-	$\geq C$	$> C'$	
Marne très compacte	> 45	$P_1/20$	$P_1/20$	$P_1/20$	-	-	$> P_1/20$	$> P_1/20$	
Rocher fragmenté	> 45	$P_1/12$	$P_1/12$	$P_1/12$	-	-	$> P_1/12$	$> P_1/12$	

(1) foré simple + foré boue

(2) préfabriqué + moulé

Fig. 3 - Valeurs de k pour les sols de la catégorie 2.

En ce qui concerne la détermination de la valeur de q_s , on notera toutefois que pour les pieux lancés et battus dans les formations sableuses, il y a lieu de considérer que le frottement latéral est nul sur toute la partie lancée. Pour ce qui est des pieux injectés sous haute ou faible pression, on tiendra compte, lors du calcul de la résistance latérale totale du pieu, de la surface latérale du fût correspondant au diamètre du forage avant injection.

La Fig. 3 permet pour la catégorie de sol la plus courante (catégorie 2), de comparer les valeurs du facteur de portance k déduites des essais, à celles proposées par MENARD et aux valeurs réajustées. On constate que ces dernières sont plus réalistes. On a pu établir que les valeurs expérimentales les plus faibles ($k < 0,8$), correspondaient à des pieux dont le sol sous la pointe avait été très remanié lors du forage.

La Fig. 4 permet de comparer les valeurs mesurées de q_s aux valeurs réajustées.

Les histogrammes de la Fig. 5 présentent pour

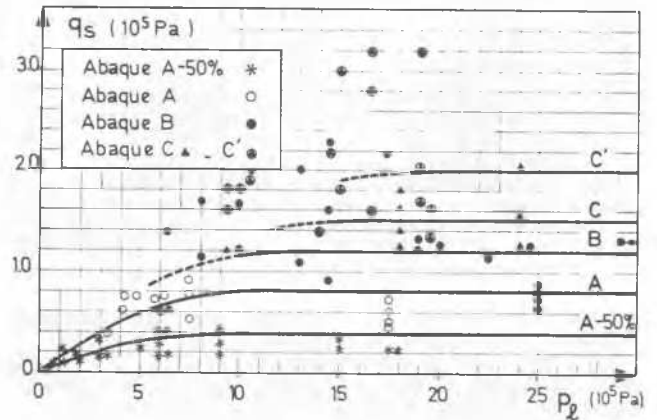


Fig. 4

un nombre de pieux réduit les rapports charges nominales Q_N ou charges en pointe limite Q_{pl} réelles, sur charges correspondantes calculées à partir des règles Ménard ou des nouveaux paramètres. Ces histogrammes montrent que le réajustement de k et q_s permet de réduire sensiblement le sous-dimensionnement des pieux, et au niveau de l'estimation de la résistance de pointe, de se situer beaucoup plus près de la réalité.

Méthode pénétrométrique (statique) - Le réajustement de celle-ci a consisté à :

- établir une classification originale des sols en fonction de q_c ,
- proposer suivant le type de pieu et la nature des sols les valeurs appropriées des coefficients k et α , pour le calcul de la résistance de pointe et du frottement latéral unitaire.

Le Tableau V présente les nouveaux paramètres de calcul k et α .

La Fig. 6 permet de situer les valeurs de k dé-

TABLEAU V

Nature du sol	q_c (10^5 Pa)	Facteur de portance k		Coefficient α				Valeur maximale de q_s (10^5 Pa)			
		pieu foré	pieu battu (1)	pieu foré		pieu battu		fût béton	fût métal	pieu injecté	
				fût béton	fût métal	fût béton	fût métal			faible pression	haute pression
Argile molle et vase	< 10	0,4	0,5	20	30	20	30	0,4	0,4	0,5	-
Argile moyennement compacte	10 à 50	0,35	0,45	40	80	40	80	0,4	0,4	0,8	$\geq 1,2$
Argile compacte à raide et limon compact	> 50	0,45	0,55	60	120	60	120	0,4	0,4	1,2	$\geq 1,5$
Limon et sable lâche	≤ 50	0,4	0,5	60	150	60	120	0,4	0,4	0,8	-
Sable et grave moyennement compacts	50 à 120	0,4	0,5	100	200	100	200	0,8	0,4	1,2	$\geq 1,5$
Sable et grave compacts à très compacts	> 120	0,3	0,4	150	300	150	200	1,2	1,2	1,5	$\geq 2,0$
Craie molle	≤ 50	0,2	0,3	100	120	100	120	0,4	0,4	0,8	-
Craie altérée à fragmentée	> 50	0,2	0,4	60	80	60	80	1,2	1,2	1,5	$\geq 2,0$

(1) y compris les pieux à pointe injectée.

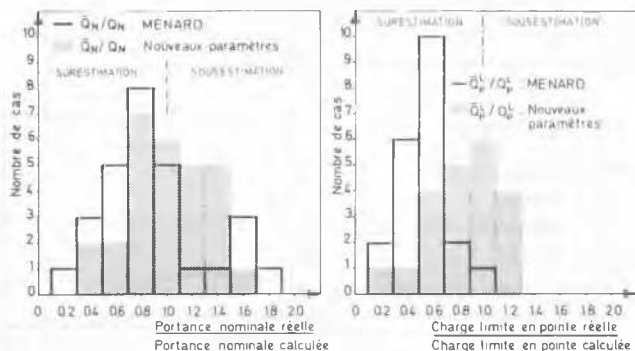


Fig. 5

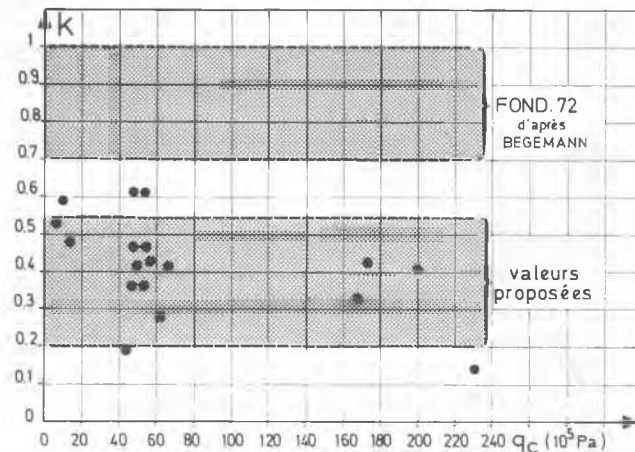


Fig. 6

duites des essais, par rapport aux domaines des valeurs réajustées ou proposées par BEGEMANN (FOND 72). Les histogrammes de la Fig. 7 donnent pour quelques pieux seulement les valeurs des rapports charges nominales \bar{Q}_N ou charges en pointe limites \bar{Q}_p^L réelles, sur charges correspondantes calculées à partir des paramètres proposés par DINESH MOHAN et BEGEMANN ou des nouveaux paramètres. On constate là aussi que les paramètres réajustés sont plus proches de la réalité (Philipponnat, 1980).

CONCLUSION

La réalisation d'un nombre important d'essais de chargement en vraie grandeur, avec mesure de la résistance de pointe et du frottement latéral, a fourni les données expérimentales permettant d'apprécier la validité des méthodes actuelles de prévision de la portance d'un pieu sous charge verticale. Il est apparu, en ce qui concerne la méthode pressiométrique :

- que celle-ci restait la plus fiable pour ce qui est de l'évaluation de la charge nominale (ou admissible) d'un pieu,
- qu'il y avait lieu toutefois, dans le but d'obtenir une répartition des efforts le long du pieu plus réaliste et dans certains cas aussi, pour éviter tout sous-dimensionnement possible, de réajuster les valeurs des paramètres de calcul et tout particulièrement celles du facteur de portance k pour les pieux forés.

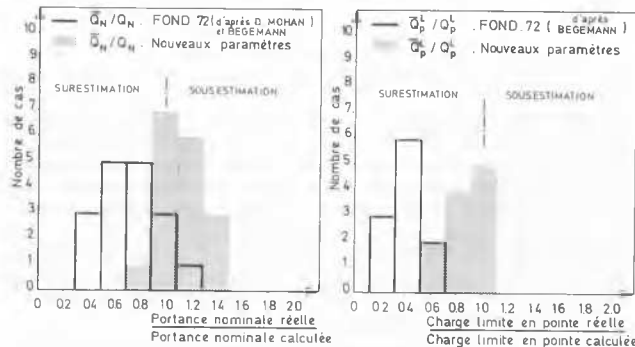


Fig. 7

REFERENCES

Baguelin, F., Jézéquel, J.-F., Shields, D. The Pressuremeter and foundation engineering, Trans Tech. Publications, 1978.

LCPC-SETRA (1972), Fondations courantes d'ouvrages d'art (FOND. 72).

PHILIPPONNAT, G., Méthode pratique de calcul d'un pieu isolé à l'aide du pénétromètre statique. Revue Française de Géotechnique, n° 10, 1980.