

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.

Coefficients de sécurité liés au calcul des pieux

Safety factors in piling design

M. BUSTAMANTE, Docteur-Ingénieur, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, France
L. GIANESSELLI, Technicien, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, France

RESUME L'observation du comportement d'un grand nombre de pieux d'essais, mais aussi le suivi de pieux sous charges réelles, intégrés à des ouvrages de franchissement, a conduit à s'interroger sur le bien-fondé des valeurs des coefficients de sécurité imposés jusqu'à maintenant lors du dimensionnement des fondations profondes par les règlements actuels. Il est apparu, au vu des données expérimentales, qu'il semblait opportun de proposer un premier système de coefficients utilisé pour le calcul de Q_N , mieux calé et justifié expérimentalement que les systèmes existants. On a été également conduit à élaborer un second système dont l'originalité réside dans le fait qu'il permet de coupler les différentes combinaisons de charges avec les différentes charges caractéristiques du pieu (nominale Q_N , de fluage Q_C , limite Q_L). En introduction, on rapporte brièvement les valeurs des coefficients de sécurité pris en compte lors du calcul des pieux dans une vingtaine de pays.

INTRODUCTION

Les auteurs ont pu réaliser en 1982, auprès de palistes de 22 pays (Belgique, Brésil, Chine, Grande-Bretagne, Grèce, Israël, Italie, Japon, Pologne, RFA, Suède, URSS, USA, etc.) une enquête portant sur les valeurs des coefficients de sécurité adoptés lors du calcul de la charge nominale Q_N (ou charge admissible) des pieux verticaux isolés, sollicités statiquement. L'examen des réponses a montré :

- que bon nombre de pays ne possèdent aucun texte réglementant les valeurs des coefficients de sécurité laissés alors à l'appréciation du projecteur,
- que certains pays préféreraient adopter un coefficient unique F_G dont on frappe la charge limite globale calculée : $Q_N = Q_L / F_G$
- d'autres pays, dont la France, optent pour 2 coefficients distincts, F_p et F_s , à appliquer respectivement à la résistance de pointe limite calculée (Q_L^P) et le frottement latéral limite calculé (Q_L^S) suivant le schéma : $Q_N = Q_L^P / F_p + Q_L^S / F_s$. Dans ce dernier cas, en fonction du type de structure, de la nature des pieux ou de la possibilité de réaliser des essais de chargement en vraie grandeur, les valeurs s'échelonnent de 1,7 à 6,0 pour F_p , et de 1,5 à 3 pour F_s . En France, les deux textes qui réglementent les valeurs des coefficients tant pour le bâtiment, DTU 13.2 [1], que pour les ouvrages d'art, FOND. 72 [2], imposent $F_p = 3$ et $F_s = 2$ pour les pieux battus et forés.

La disparité des approches (opposition d'un coefficient global F_G à des coefficients partiels F_p

et F_s) ou pour une même option, les différences sensibles de valeurs entre coefficients, ont incité à entreprendre une étude spécifique du problème. Une telle étude s'imposait d'autant plus que les auteurs du présent article, ayant élaboré une méthode de calcul de la portance, basée sur l'exploitation des essais pressiométriques (sonde Ménard) ou pénétrométriques statiques (CPT), il semblait opportun de l'associer à un système original de coefficients de sécurité, moins sommaire que celui en vigueur et, si possible, mieux calé et justifié expérimentalement. On rappellera qu'élaborée exclusivement à partir de données recueillies après interprétation de nombreux essais de chargement en vraie grandeur sur pieux instrumentés, cette méthode de calcul, décrite par ailleurs [3] [4] [5], permet de calculer la charge limite Q_L , ou plus précisément les composantes Q_L^P et Q_L^S de cette dernière. Les Figures 1 et 2 donnent une idée de sa validité en comparant les charges réellement mesurées Q_L et calculées pour des pieux forés et battus.

L'étude a finalement abouti à proposer deux systèmes de coefficients de sécurité interdépendants et constituant un tout avec la méthode de calcul élaborée.

Le premier système de coefficients permet, partant de la charge limite calculée Q_L , de chiffrer la charge nominale Q_N du pieu et la charge critique de fluage Q_C dont l'intérêt et les propriétés seront mis en évidence par la suite. Le second système de coefficients permet, lui, de coupler différentes combinaisons de charges avec les différentes charges caractéristiques du pieu, aussi bien calculées d'ailleurs que réelles (déduites de l'essai de chargement), à savoir Q_N , Q_C et Q_L .

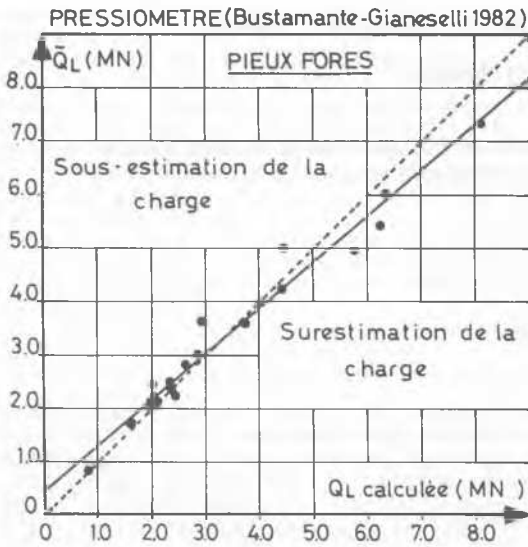


Fig. 1.

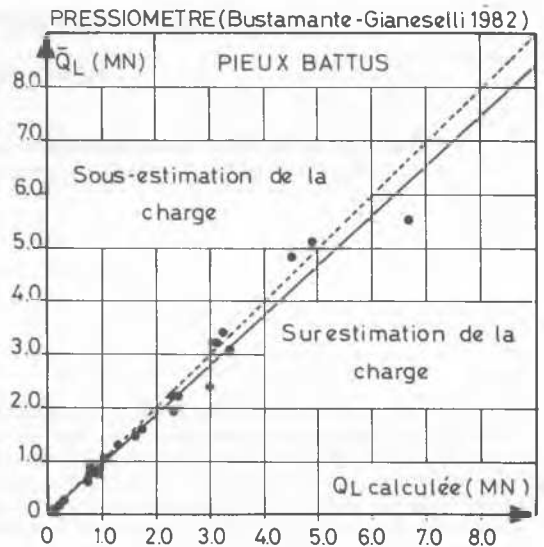


Fig. 2.

CHARGES CARACTERISTIQUES DE L'ESSAI EN VRAIE GRANDEUR.

IMPORTANCE DE LA CHARGE CRITIQUE DE FLUAGE Q_C

Pour la majorité des essais de pieux en vraie grandeur, indépendamment du type de pieu, battu ou foré, et de la nature ou compacité des sols d'encastrement, la relation expérimentale $Q_o - y_o$ qui traduit l'enfoncement de la tête (y_o) en fonction de la charge appliquée en tête (Q_o), a l'une des allures illustrées par la Figure 3. On peut distinguer sur chacune des relations indiquées (a, b, c) deux charges caractéristiques : Q_L et Q_C . La première, Q_L , est bien connue sous l'appellation de charge limite réelle, par opposition à la charge limite calculée que l'on désignera par \bar{Q}_L . La charge Q_L est repérable d'autant plus facilement que la verticalité de $Q_o - y_o$ est prononcée. Lorsque cette verticalité est moins évidente, on considère que \bar{Q}_L correspond à des enfoncements de la pointe au moins égaux au 1/10^e du diamètre ou des vitesses d'enfoncement de la tête de l'ordre de 1 à 5 mm/mn sous charge constante. La seconde charge caractéristique est la charge critique de fluage Q_C , qui peut être assez difficile à situer sur la relation $Q_o - y_o$ au premier abord, bien que correspondant à un changement de pente généralement net. Il est préférable toutefois de la déterminer dans tous les cas par la méthode graphique proposée par Cambefort-Chadeisson [6] et rappelée dans plusieurs textes à caractère réglementaire [7]. On a vérifié pour un total de 74 pieux :

- que Q_C peut être toujours déterminé sans ambiguïté (à l'exception des pieux pour lesquels la part de frottement latéral restait inférieure à 10 % de l'effort total) pour tous les types de sols et la totalité des

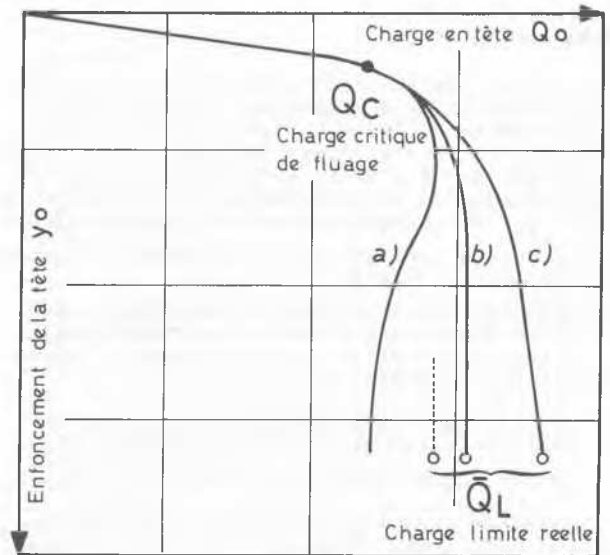


Fig. 3.

techniques de mise en oeuvre de pieux,

- que Q_C restait pratiquement indépendant de la durée des paliers d'application de la charge en tête, pour peu que ceux-ci restent dans des limites acceptables.

Hormis ces propriétés déjà soulignées, et dont les conséquences sont évidentes pour le praticien chargé de réaliser un essai de chargement, on a pu établir que Q_C constitue un seuil critique annonçant le début des grands enfoncements,

Cela s'explique par des taux de mobilisation des composantes de la portance déjà élevée sous la charge Q_C . C'est ainsi que lorsque l'on atteint cette dernière :

- le taux moyen de mobilisation du frottement latéral limite Q_L^S est de l'ordre de 77 % pour les pieux forés et 85 % pour les pieux battus,
- le taux de mobilisation moyen de la résistance de pointe limite Q_L^P varie de 52 % pour les pieux forés à 63 % pour les pieux battus.

On a pu aussi vérifier que les marges moyennes de sécurité séparant Q_C de Q_L , exprimées par le rapport \bar{Q}_L/Q_C valent :

- . 1,40 pour l'ensemble des pieux étudiés,
- . 1,34 pour les pieux battus,
- . 1,45 pour les pieux forés.

L'ensemble des propriétés que présente la charge Q_C fait bien de cette dernière une charge caractéristique, au même titre que \bar{Q}_L . Il est donc intéressant de savoir la calculer pour la prendre comme seuil de référence dans un système de coefficients de sécurité.

VALEURS DES COEFFICIENTS DE SECURITE POUR LE CALCUL DE Q_N ET Q_C

Disposant d'une méthode de calcul permettant d'évaluer avec une approximation satisfaisante les composantes Q_L^P et Q_L^S de la charge limite Q_L , on s'est attaché à chiffrer les valeurs des coefficients F_{PC} et F_{SC} afin de pouvoir calculer directement Q_C dont on a montré la signification et l'importance plus haut, soit :

$$Q_C = \frac{Q_L^P}{F_{PC}} + \frac{Q_L^S}{F_{SC}}$$

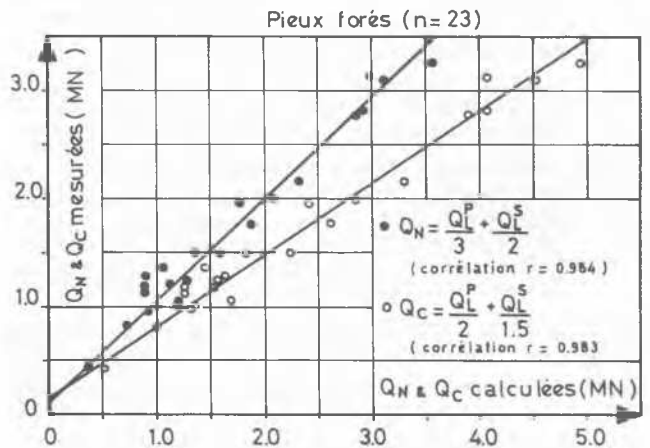
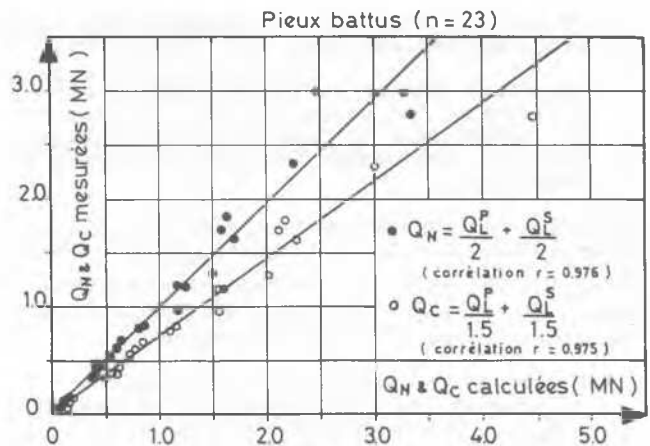
Une étude comparative des valeurs mesurées et calculées, effectuée séparément pour des pieux battus et forés, a conduit aux couples de valeurs ci-après (Figures 4 et 5) :

- . $F_{SC} = F_{PC} = 1,5$ pour les pieux battus,
- . $F_{SC} = 1,5$ et $F_{PC} = 2,0$ pour les pieux forés.

On a vérifié, pour plus de 70 pieux, que la prise en compte de ces couples de coefficients donnait les rapports Q_L/Q_N suivants :

- . 1,97 tous pieux confondus,
- . 1,87 pour les pieux battus,
- . 2,08 pour les pieux forés.

Ces valeurs ne sont rien d'autre que les valeurs de coefficients globaux F_G que garantit l'adoption des valeurs F_{PN} et F_{SN} proposées.



COMBINAISONS D'ACTION

Le comportement du pieu sous charge statique étant bien connu, et le calcul offrant la possibilité de chiffrer les seuils caractéristiques de la portance (Q_N , Q_C , Q_L), on peut établir un lien, par le biais d'un nouveau jeu de coefficients spécifiques, avec les différentes combinaisons d'action agissant sur la structure.

Les directives ou documents réglementaires de certains pays, notamment la France, introduisent aujourd'hui pour le bâtiment et les ouvrages d'art des notions d'états limites qui correspondent à des régimes de sollicitations définis en intensité et degré d'occurrence. On distingue ainsi :

- les états limites ultimes (ELU), lesquels, sans correspondre nécessairement à des ruptures, peuvent induire de grandes déformations irréversibles entraînant la mise hors

service de l'ensemble ou partie de la structure et impliquent des réparations,

- les états limites de service (ELS) ou d'utilisation, qui ne peuvent pas, en principe, occasionner de déformations irréversibles, ou même amener une mise hors service temporaire.

On désignera respectivement les sollicitations liées à chacun de ces états par Q_{max} (pour ELU) et Q_{min} (pour ELS). On distinguera aussi pour chacun de ces états des combinaisons d'action caractéristiques qui sont les suivantes :

- Combinaison fondamentale induisant à l'ouvrage une sollicitation d'intensité $Q_{max,0}$ dont le degré d'occurrence est rarissime (1000 ans) ;
- Combinaison accidentelle, laquelle implique des sollicitations difficilement prévisibles et d'intensité $Q_{max,1}$ extrêmement élevées (par exemple : chocs et séismes) ;
- Combinaison rare, d'intensité $Q_{min,0}$ pouvant se produire tous les 50 ou 200 ans, c'est-à-dire, à coup sûr, au moins une fois au cours de la durée de l'ouvrage ;
- Combinaison quasi-permanente $Q_{min,1}$ qui correspond aux conditions d'exploitation habituelles des ouvrages sous trafic relativement intense (par exemple, cas des ouvrages d'art d'une grande métropole soumis au trafic des heures de pointe).

Si l'on se reporte à présent à une relation type $Q_0 - y_0$ sur laquelle figurent les 3 charges caractéristiques de la portance (très proches, en fait, des charges mesurées Q_N , Q_C et Q_L , compte tenu de la représentativité de la méthode de calcul proposée par les auteurs), à savoir : Q_N , Q_C et Q_L , on peut faire correspondre à chaque régime de sollicitations, ELS ou ELU, un domaine bien particulier des enfoncements (Figure 6). La frontière entre ceux-ci passant par Q_C , on détermine ainsi un premier domaine caractérisé par les très faibles enfoncements : n'excédant pas en moyenne le 1 % du diamètre, comme le montre l'examen des nombreuses mesures. Le second domaine est réservé aux grands enfoncements, croissant d'autant plus vite que l'on s'éloigne de Q_C . On peut ensuite distinguer au sein d'un même domaine des plages correspondant aux différentes combinaisons d'action. On établit ainsi un couplage réel entre les combinaisons d'action et les différents stades de la portance du pieu. Enfin, moyennant l'adoption de coefficients réducteurs bien définis, on a la possibilité, pour une combinaison d'actions imposée, de limiter la charge calculée Q par des seuils caractéristiques. Ces coefficients réducteurs, équivalents de coefficients de sécurité, peuvent prendre les valeurs ci-après, suivant les combinaisons :

- quasi-permanente : $Q < 0,7 Q_C$
- rare : $Q < Q_C$

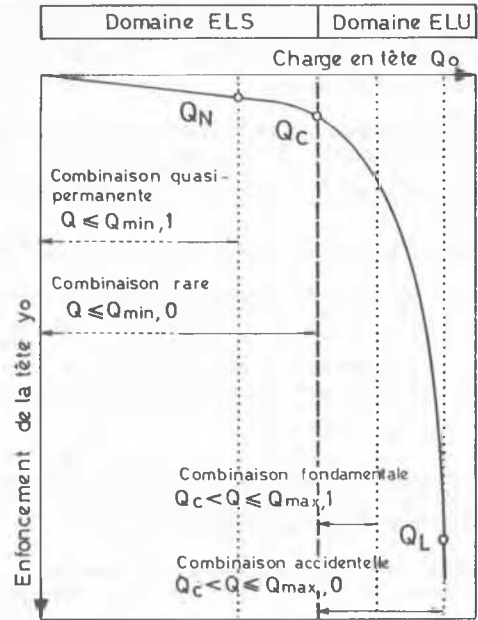


Fig. 6.

- fondamentale (ELU) : $Q < 0,85 Q_L$
- accidentelle (ELU) : $Q < Q_L$

Les valeurs proposées constituent des valeurs de principe. Il est possible d'envisager de légères fluctuations, de l'ordre de 10 % par exemple, de part et d'autre des bornes proposées. Cela peut être le cas, par exemple, lorsque sur un projet donné, on dispose de la possibilité de réaliser des essais de chargements en vraie grandeur. Dans de pareilles circonstances, on peut envisager de réduire les marges de sécurité pour certaines combinaisons d'action.

REFERENCES

- [1] DTU 13.2 - Fondations profondes, sept. 1963.
- [2] Document FOND. 72, Fondations courantes d'ouvrages d'art. LCPC-SETRA, févr. 1972.
- [3] Bustamante, M. et Gianeselli, L. (1981). Prédiction de la capacité portante des pieux isolés sous charge verticale. Règles pressiométriques et pénétrométriques. Bull. Liaison LPC, N° 113, mai-juin.
- [4] Bustamante, M. et Gianeselli, L., Pile Bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT. Proceedings of II ES, Amsterdam, 1982.
- [5] Bustamante, M. et Gianeselli, L., Réajustement des paramètres de calcul des pieux. Xè Cong. int. Méc. Sols, Stockholm, juin 1981.
- [6] Cambefort et Chadeisson. Critère pour l'évaluation de la force portante d'un pieu. Vè Conf. int. Méc. Sols, Londres, 1961.
- [7] Axial Pile Loading Test, Part. 1 : Static loading. ISSMFE (1983).