INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING

SIMSG ISSMGE

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.

La force portante des groupes de pieux

The Bearing Capacity of Pile Groups

par H. CAMBEFORT, ingénieur civil de l'Ecole des Ponts et Chaussées, professeur à l'Ecole Spéciale des Travaux Publics, 112ter, rue Marcadet, Paris XVIIIe, France

Sommaire

L'enfoncement dans un terrain naturel de tiges d'acier de 2,5 m de long et de 50,0 ou 33,5 mm de diamètre a permis de réaliser un modèle réduit de pieux qui ont été chargés statiquement, l'un après l'autre et en groupe (maximum du groupe 7 pieux).

L'espacement des pieux d'axe en axe a été de 2 et 3 diamètres et dans certains cas 5 et 9 diamètres.

Le rapprochement des pieux a pour effet de multiplier la somme de la résistance des pieux constitutifs du groupe par un coefficient qui peut atteindre 1,5. Ce coefficient dépend de l'écartement et peut être du diamètre des pieux.

Le pieu central d'un groupe a une très grande influence. Sa suppression diminue plus qu'elle le devrait la force portante de l'ensemble.

Summary

The driving of steel rods 8 feet long and from $1^5/_{16}$ to 2 inches in diameter in natural soils has served as a small scale model of piles. The model piles were loaded one after the other and also as a group of up to 7 piles. The distance between centers of the piles varied between 2 and 3 diameters (in some cases between 5 and 9 diameters). The effect of reducing the spacing of the piles is to increase the bearing capacity by as much as $1\frac{1}{2}$ times. The factor depends on the spacing and may be influenced by the diameter of the piles. The central pile of a group has a very great influence. Its omission reduces the bearing capacity of the group by more than is normally estimated.

Introduction

La tradition veut que la force portante d'un groupe de N pieux soit égale à N fois celle d'un pieu à condition que ceux-ci ne soient pas trop voisins (espacement d'axe en axe de trois diamètres par exemple). Pour des pieux plus rapprochés on doit prendre une force portante globale inférieure.

Cette pratique a sans doute des bases théoriques. Mais est-elle bien justifiée? Quelques essais sommaires semblent montrer qu'elle ne correspond pas à la réalité. Ces essais réalisés au moment de la mise au point de l'appareil de pénétration de la Société Solétanche ne peuvent pas être considérés comme des essais systématiques à partir desquels on peut déduire une loi.

Principe des essais

Les essais ont consisté à enfoncer dans un terrain naturel des tiges d'acier de 2,5 m de long environ et de 33,5 et 50,0 mm de diamètre. L'écartement des tiges figurant les pieux était de 2 ou 3 diamètres suivant les cas.

Chaque pieu a été chargé statiquement avec mesure des enfoncements correspondants. (Contrairement à ce qui se passe lors du chargement d'un pieu de gros diamètre (400 mm par exemple) on a obtenu pour ces petits diamètres une charge de poinçonnement pratiquement constante pour un enfoncement de 1 à 3 mm seulement.) Il en a été de même des groupes de 2 à 7 pieux (le numéro d'un pieu correspond à son ordre de fonçage; le pieu d'ordre n n'étant foncé qu'après l'essai du groupe d'ordre n-1).

L'interprétation se fait par comparaison des courbes des enfoncements en fonction des charges exercées sur un seul pieu (charge totale divisé par le nombre de pieux du groupe). Dans ces conditions si le mode de calcul rappelé ci-dessus est correct, toutes ces courbes seront identiques entre elles et superposables à celle d'un pieu chargé tout seul.

Le fait d'opérer dans un terrain naturel complique sans aucun doute l'interprétation des essais, mais présente par contre le gros avantage de donner des conditions aux limites réelles contrairement aux essais en chambre.

Sous-sol

Le sous-sol est constitué de la manière suivante:

0 –0,5 m: terre végétale

0,5–0,8 m: argile brune

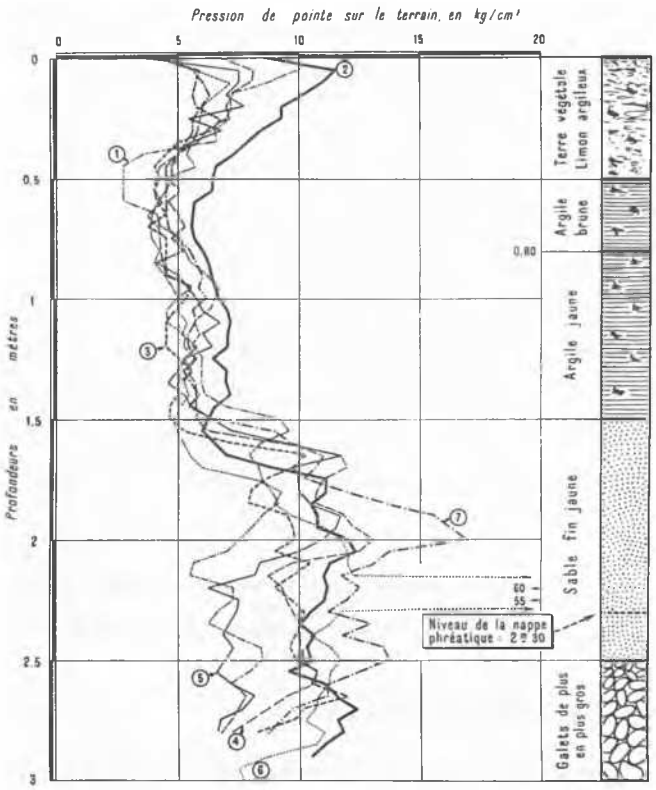


Fig. 1 Pression en pointe pendant le fonçage (⌀ 50 mm, 2 *d*)
Point Pressure During Driving

0,8–1,5 m: argile jaune
1,5–2,5 m: sable fin jaune
au-dessous de 2,5 m: graviers.

Une nappe d'eau a sa surface libre à 2,3 m de profondeur.

Les essais indiquent une certaine hétérogénéité dans les caractéristiques mécaniques du terrain. Cependant comme on le verra, celle-ci n'est pas gênante pour l'étude qualitative du phénomène.

Pieux espacés de deux diamètres

Seuls des pieux de 50 mm de diamètre ont été utilisés dans ce cas. La résistance en pointe pendant le fonçage est donnée par la Fig. 1. Elle n'est pas rigoureusement la même pour tous les pieux, malgré leur proximité. Seul l'ordre de grandeur est conservé.

L'essai de charge des pieux isolés est donné par la Fig. 2. Il semble y avoir une amélioration de la force portante, due au resserrement du terrain par le fonçage des trois premiers pieux. Mais brusquement le cinquième et le sixième sont à peine meilleurs que le troisième et le septième est comparable au quatrième. Les différences constatées sont donc probablement dues à l'hétérogénéité du terrain.

Le résultat du chargement des groupes fait l'objet des Fig. 3 et 4. On remarque que les groupes 1–2, 1–2–3 et 1–2–3–4 se comportent de la même manière et quelquefois mieux (groupes 1–2–3) que le meilleur de leurs pieux. L'insuffisance de certains pieux est largement compensée par le travail en groupe.

L'adjonction du cinquième pieu (groupe 1–2–3–4–5) n'améliore pas beaucoup la résistance unitaire du groupe 1–2–3–4. Il en est de même avec le sixième et le septième. Mais dans ces trois cas (groupes à 5–6 et 7 pieux) on a une très forte augmentation des tassements pour les faibles charges. Ce fait ne peut être rapproché que de l'augmentation des dimensions en plan du groupe.

Le rapport de la force portante d'un groupe à la somme de forces portantes des pieux constitutifs essayés isolément, est le suivant:

Groupe	*1 à 2*	*1 à 3*	*1 à 4*	*1 à 5*	*1 à 6*	*1 à 7*
Groupe n / *n* pieux	1,23	1,55	1,31	1,45	1,45	1,35

Ces essais ont été complétés par la mesure de la force en pointe du pieu n° 5 englobé dans différents groupes. La Fig. 5

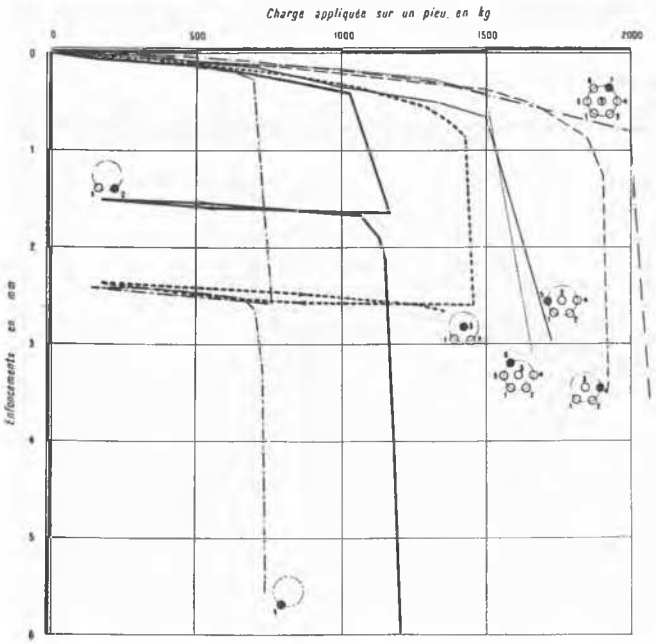


Fig. 2 Essai de charge des pieux isolés (⌀ 50 mm, 2 *d*)
Load Test of Single Piles

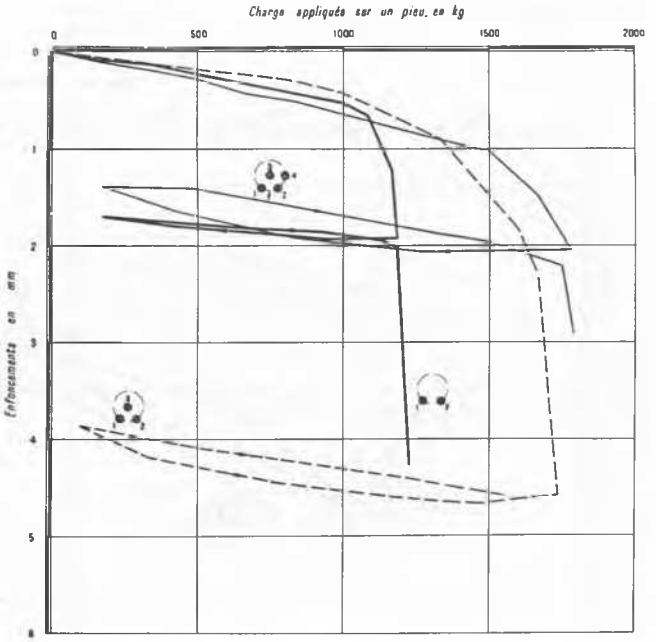


Fig. 3 Essai de charge des groupes comprenant 2, 3 et 4 pieux (⌀ 50 mm, 2 *d*)
Load Test of Pile Groups of 2, 3 and 4 Piles

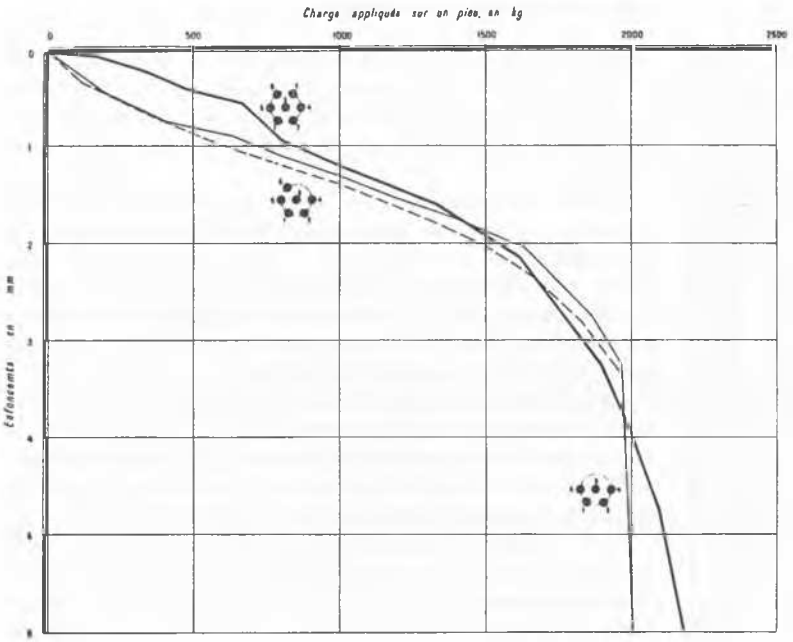


Fig. 4 Essai de charge des groupes comprenant 5, 6 et 7 pieux (⌀ 50 mm, 2 *d*)
Load Test of Pile Groups of 5, 6 and 7 Piles

donne le rapport de cette force à celle exercée sur le pieu unitaire (surcharge totale divisée par le nombre de pieux du groupe). Ce rapport, sensiblement constant au cours d'un même chargement (premières charges mises à part) recommence à croître lorsque la charge maximum est atteinte (le frottement latéral et la charge en pointe croissent toujours). Ceci montre que la fraction de l'effort prise par la pointe en cours de pénétration, n'est pas la même que celle supportée normalement sous charge statique. Il y a là une petite difficulté pour l'interprétation correcte des essais de pénétration.

Par ailleurs ce rapport varie d'une manière désordonnée avec le nombre de pieux du groupe et n'est pas le même pour le pieu 5 chargé tout seul, avant et après les groupes comprenant 2 à 5 pieux. Pour une charge donnée, le frottement latéral est donc loin de rester constant.

Pieux espacés de trois diamètres

Deux sortes de pieux ont été utilisés, les uns de 50,0 mm de diamètre, les autres de 33,5 mm.

Pieux de 50 mm. La Fig. 6 donne la résistance en pointe au moment du fonçage (ordre des numéros). Les résultats (Fig. 7, 8 et 9) sont comparables aux précédents:

- augmentation de la force portante des pieux isolés 1–2–3 et 4, maintien pour le 5, chute pour le 6 (comparable au 2) et très grande force portante pour le 7 (environ 2,5 fois celle du 1);
- la force portante d'un groupe de *n* pieux est toujours supérieure à *n* fois la force portante du meilleur pieu, même pour le dernier groupe dont le pieu 7 est 2,5 fois plus résistant que le 1. A l'exception du groupe 1–2, cette force portante est sensiblement proportionnelle au nombre de pieux, ce qui

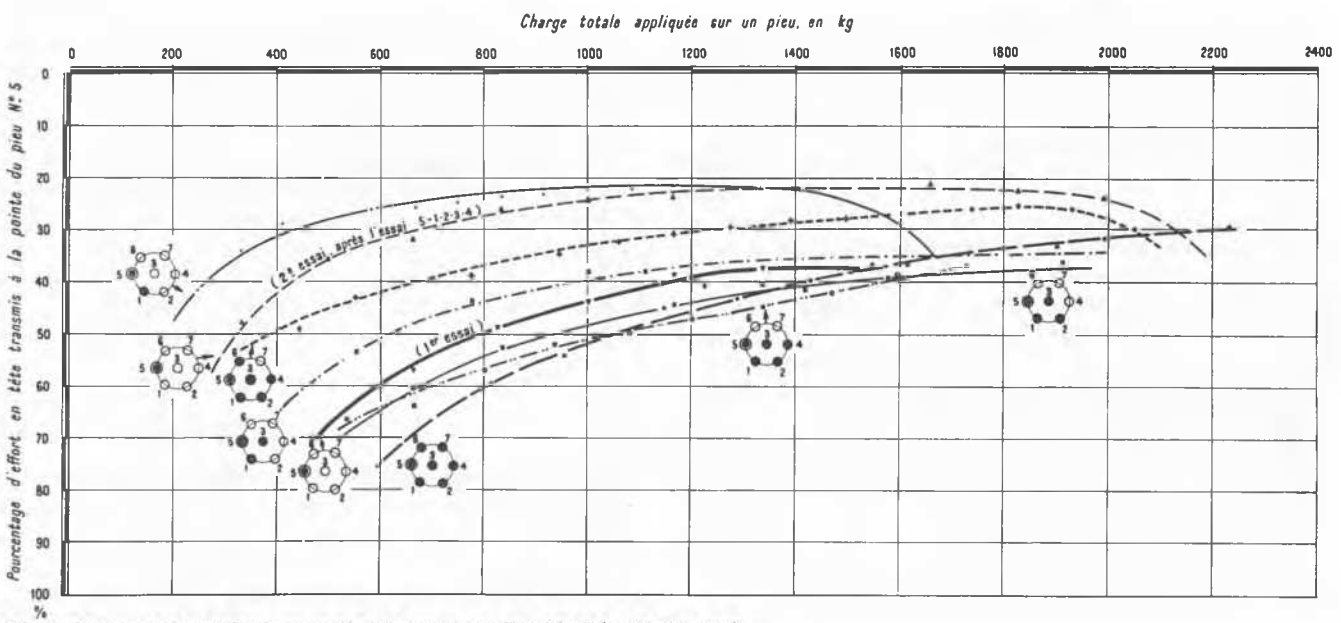


Fig. 5 Pourcentage d'efforts transmis à la pointe du pieu No 5 (⌀ 50 mm, 2 *d*)
Percentage of the Force Transmitted to the Point of Pile No. 5

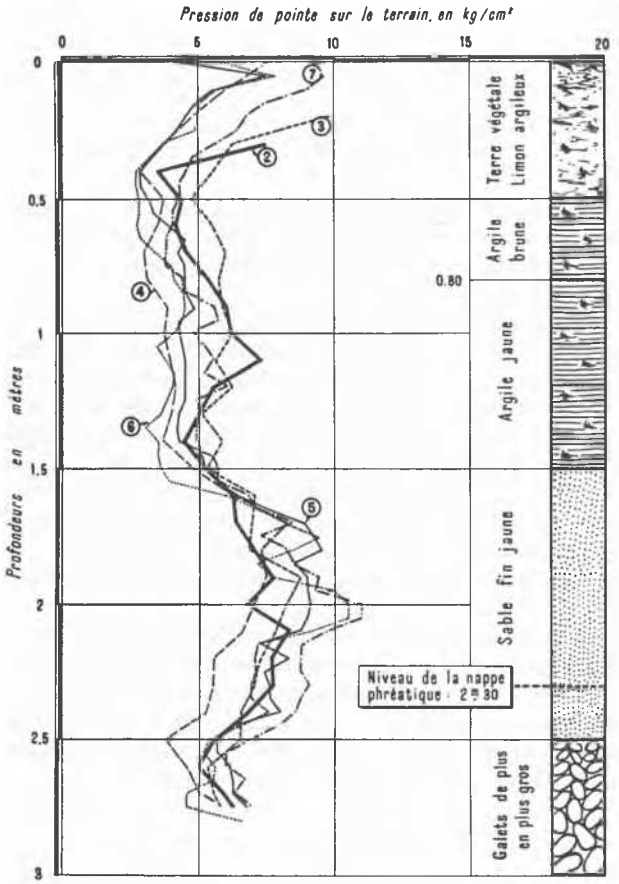


Fig. 6 Pression en pointe pendant le fonçage (⌀ 50 mm, 3 *d*)
Point Pressure During Driving

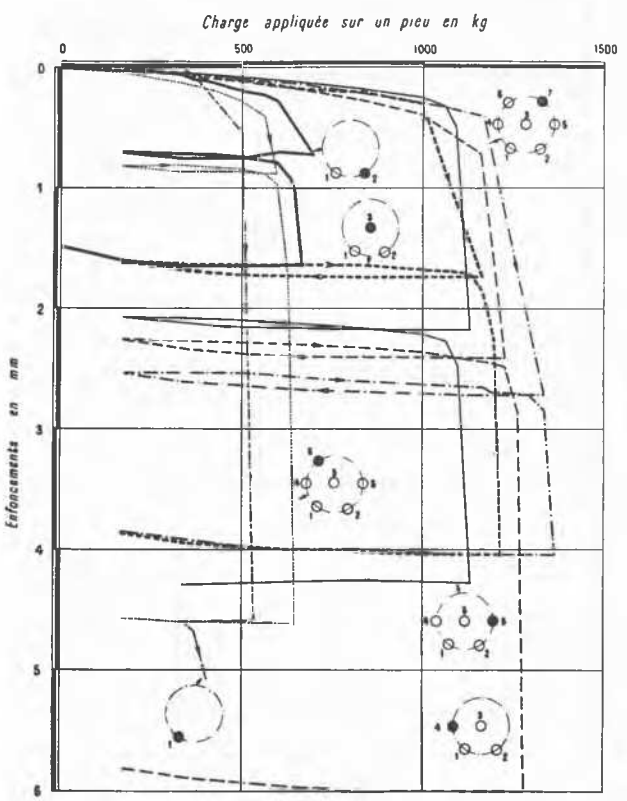


Fig. 7 Essai de charge des pieux isolés (⌀ 50 mm, 3 *d*)
Load Test of Single Piles

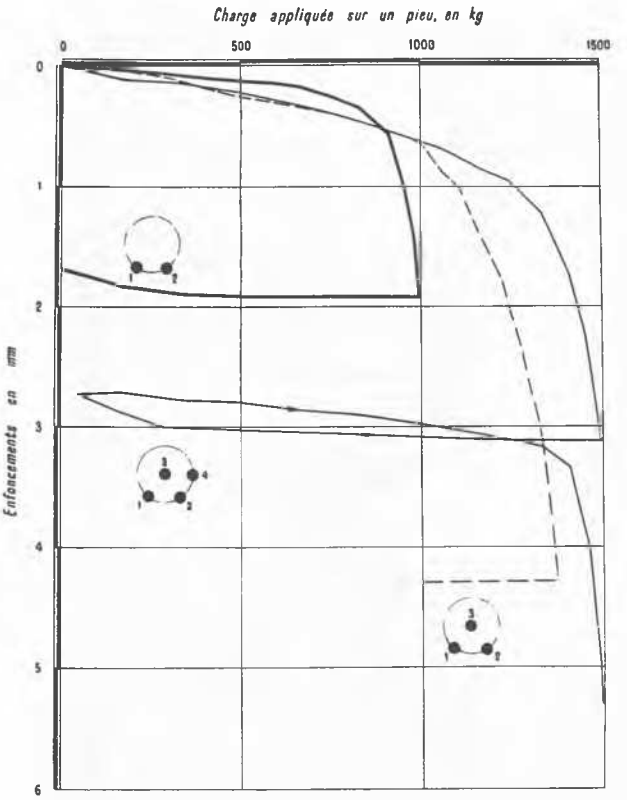


Fig. 8 Essai de charge des groupes comprenant 2, 3 et 4 pieux (⌀ 50 mm, 3 *d*)
Load Test of Pile Groups of 2, 3 and 4 Piles

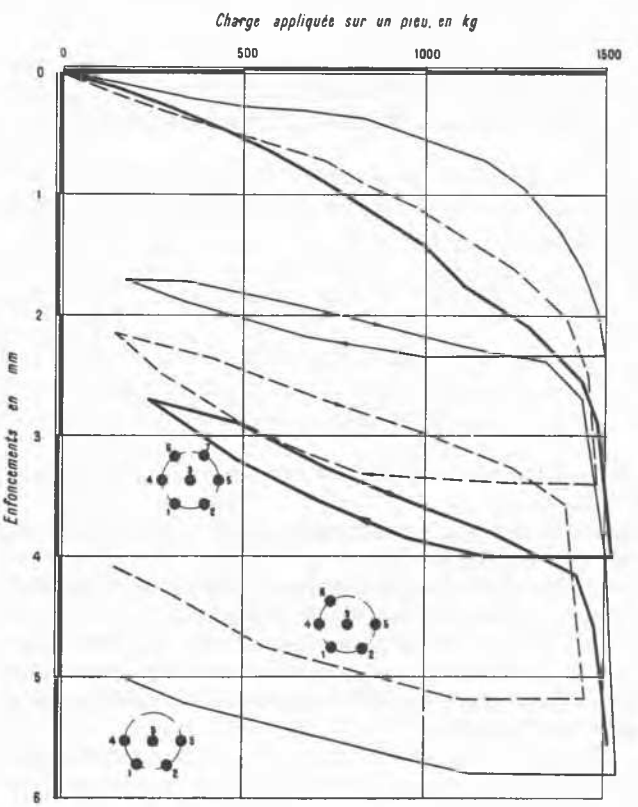


Fig. 9 Essai de charge des groupes comprenant 5, 6 et 7 pieux (⌀ 50 mm, 3 *d*)
Load Test of Pile Groups of 5, 6 and 7 Piles

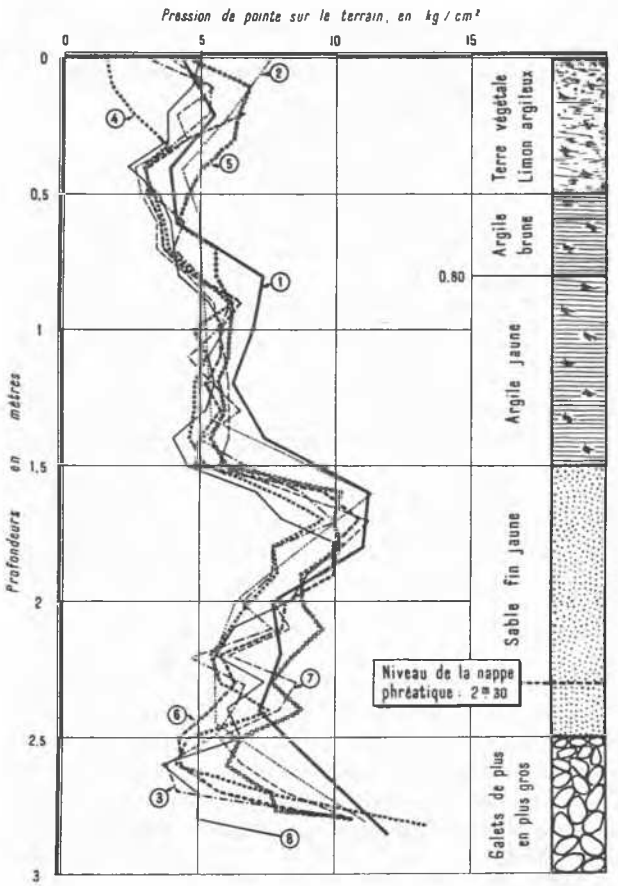


Fig. 10 Pression en pointe pendant le fonçage (⌀ 33,5 mm, 3 *d*)
Point Pressure During Driving

était beaucoup moins net dans le cas précédent. Mais le pieu unitaire fictif à envisager a une force portante égale à environ 1,5 fois la moyenne des forces portantes de *tous* les pieux réels.

Le rapport de la force portante d'un groupe à la somme des forces portantes des pieux isolés ne donne pas tout à fait le même résultat:

Groupe	*1 à 2*	*1 à 3*	*1 à 4*	*1 à 5*	*1 à 6*	*1 à 7*
Groupe n / *n* pieux	1,72	1,73	1,65	1,58	1,56	1,58

Il est légèrement plus fort que dans le cas des pieux espacés de 2 diamètres:

- la forte augmentation des tassements pour les faibles charges se retrouve pour les groupes de 5 à 7 pieux, mais, semble-t-il, avec une augmentation légèrement moins forte que dans le groupe de pieux espacés à deux diamètres.

Pieux de 33,5 mm. Alors que la force de poinçonnement en pointe est pratiquement la même pour tous (Fig. 10) les pieux se classent en deux catégories de force portante isolée comparable (Fig. 11 et 12):

- d'une part, les pieux 1–2 et 6 de résistance minimum, et
- d'autre part, les pieux 3–4–5 et 7 environ une fois et demie plus résistants.

Le rapport de la force portante d'un groupe (Fig. 13 et 14) à la somme des forces portantes des pieux isolés est:

Groupe	*1 à 2*	*1 à 3*	*1 à 4*	*1 à 5*	*1 à 6*	*1 à 7*	*1 à 2* *4 à 5* *6 à 7*
Groupe n / *n* pieux	1,28	1,36	1,30	1,23	1,27	1,30	1,13

Si l'on excepte le premier et le dernier groupe, la force portante des autres est proportionnelle à celle d'un pieu fictif 1,25 fois plus résistant que la moyenne des forces portantes de tous les pieux réels.

Ainsi le seul fait d'avoir changé le diamètre des pieux (⌀ 50 et ⌀ 33,5 – espacement 3 *d*) ne donne pas les mêmes résultats. Les emplacements correspondants étant légèrement espacés (50 cm environ), il peut y avoir une différence dans le comportement du sol, mais ce n'est pas évident à priori. Si cette différence provient uniquement du changement de diamètre, comme il convient de le vérifier par d'autres essais, il est inutile d'étudier une fondation sur pieux au moyen de modèles réduits tant qu'on ne connaît pas la loi de similitude à appliquer. Ceci est particulièrement grave pour l'extrapolation des essais de pénétration.

La comparaison des deux derniers groupes, qui ne diffèrent que par la présence du pieu 3 situé au centre du groupe, montre que celui-ci a une très grande importance. La force portante du groupe ne le possédant pas n'est plus que les 5/7 environ de celle du groupe 1 à 7 au lieu d'en être sensiblement les 6/7 comme celle du groupe 1 à 6 de 6 pieux lui aussi.

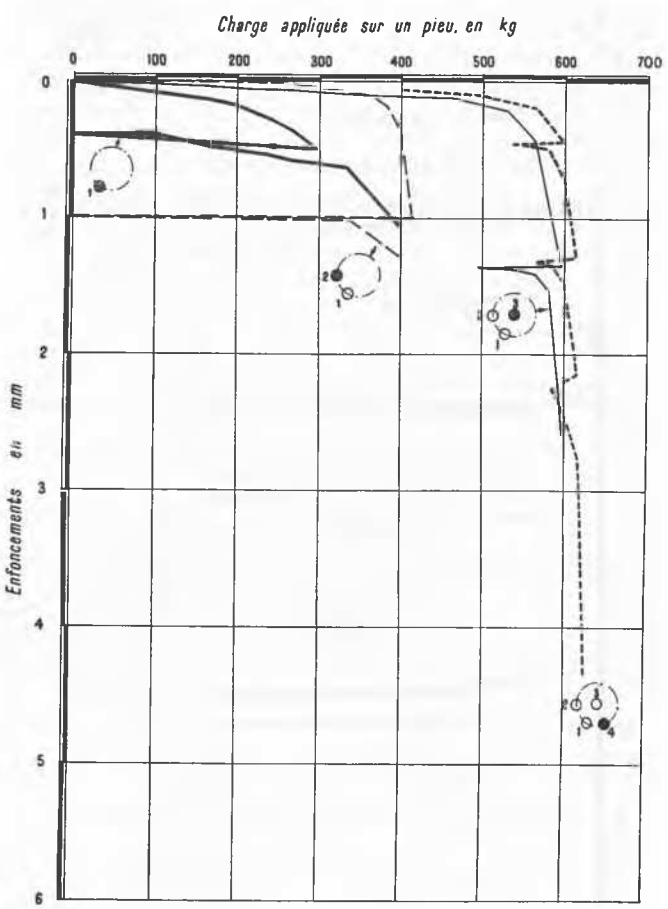


Fig. 11 Essai de charge des pieux isolés, 1, 2, 3 et 4 pieux (⌀ 33,5 mm, 3 *d*)
Load Test of Single Piles Nos. 1, 2, 3 and 4

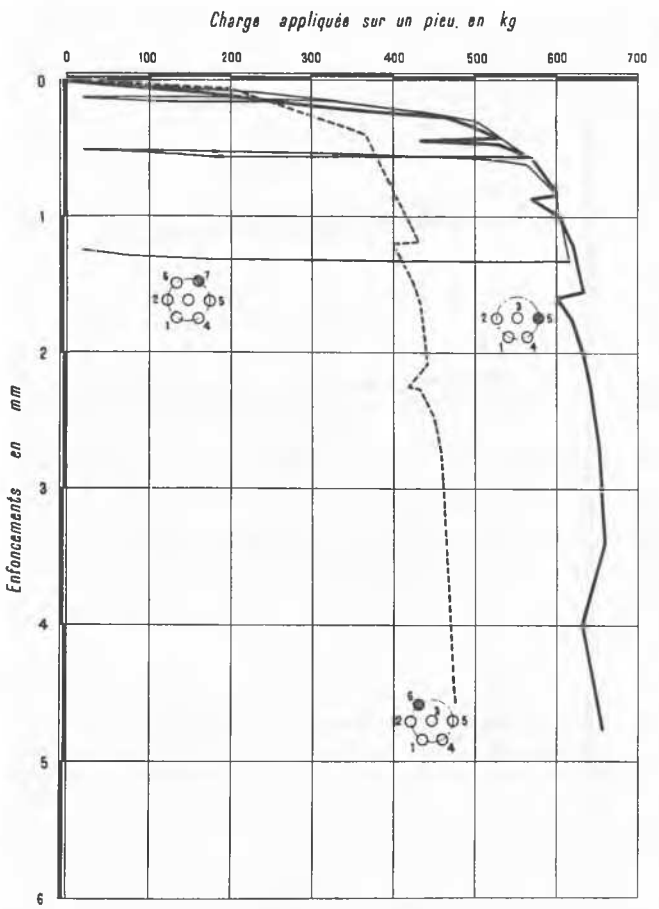
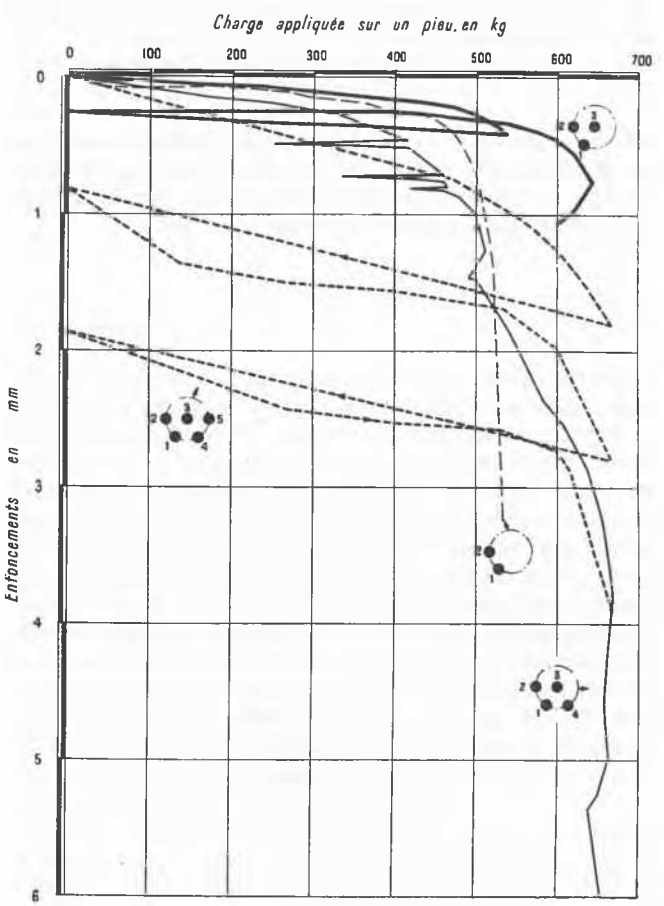


Fig. 12 Essai de charge des pieux isolés, 5, 6 et 7 pieux (⌀ 33,5 mm, 3 *d*)
← Load Test of Single Piles Nos. 5, 6 and 7



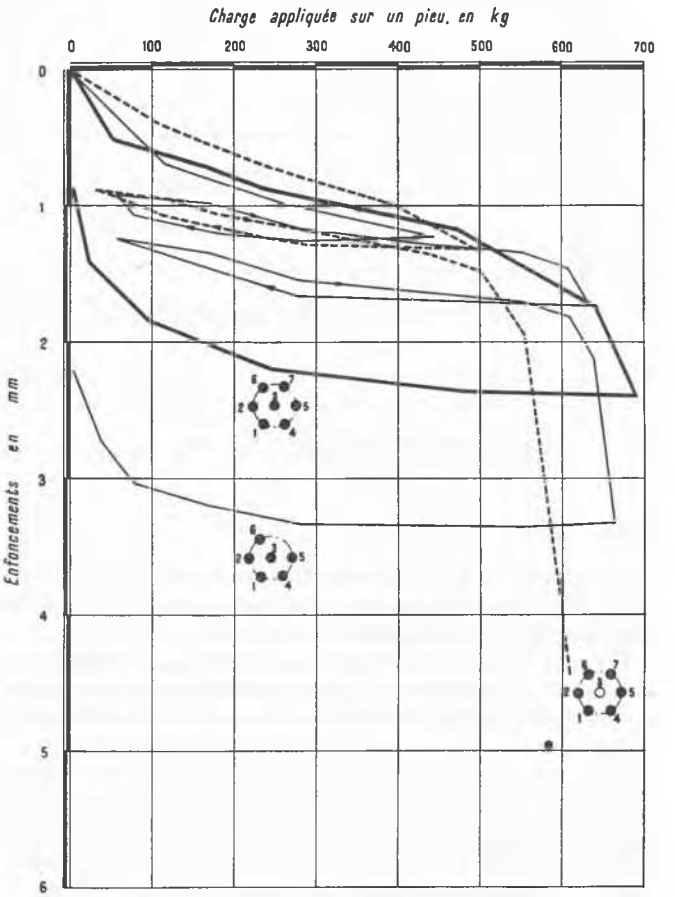


Fig. 14 Essai de charge des groupes comprenant 6 et 7 pieux (⌀ 33,5 mm, 3 *d*)
Load Test of Pile Groups of 6 and 7 Piles

Autres espacements de pieux

Les essais précédents (⌀ 33,5 mm) ont été complétés par le fonçage d'un huitième pieu (Fig. 15) et par l'essai des groupes 2–7 et 2–4–7 (espacement 5 *d*), 4–8 (espacement 9 *d*) et 2–8–7–4 (Fig. 16).

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant:

Groupe	*2 à 7*	*2 à 4 à 7*	*4 à 8*	*2,8 à 7,4*
Groupe n / *n* pieux	1,18	1,16	1,03	1,09

Un espacement de 5 *d* donne encore une amélioration par rapport aux pieux essayés isolément. Par contre avec l'espacement de 9 *d* on peut estimer que les pieux travaillent effectivement comme s'ils étaient seuls.

Ces essais ne sont pas assez nombreux pour pouvoir être généralisés. Il faut encore les considérer comme des essais qualitatifs.

Fig. 13 Essai de charge des groupes comprenant 2, 3, 4 et 5 pieux
← (⌀ 33,5 mm, 3 *d*)
Load Test of Pile Groups of 2, 3, 4 and 5 Piles

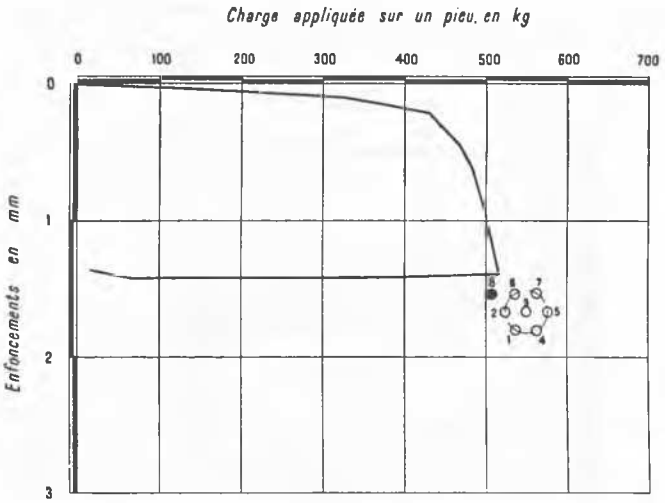


Fig. 15 Essai de charge du pieu No 8 (⌀ 33,5 mm)
Load Test of Pile No. 8

Conclusions

Le calcul de la force portante d'un groupe de pieux, tel qu'il est pratiqué actuellement, ne correspond à rien de réel. Il est simplement fait dans le sens de la sécurité.

Le rapprochement des pieux a pour effet de multiplier la somme de la résistance des pieux constitutifs du groupe, par un coefficient qui peut atteindre 1,5 dans le cadre des essais entrepris.

Ce coefficient caractérisant l'effet de groupe augmente quand les pieux se rapprochent. Il semble passer par un maximum pour un écartement de pieux de trois diamètres d'axe en axe et il est possible qu'il dépende du diamètre des pieux auquel cas l'extrapolation des essais de pénétration serait difficile.

Contrairement à ce que l'on pourrait croire à priori le pieu central d'un groupe a une très grande influence. Sa suppression diminue plus qu'elle le devrait la force portante de l'ensemble.

Les théories actuelles sont impuissantes pour expliquer les phénomènes constatés et malheureusement les essais entrepris ne sont pas suffisamment nombreux et ne concernent pas des terrains suffisamment variés pour qu'on puisse en déduire une loi. Il est probable qu'une théorie faisant intervenir les déformations du terrain donnerait des points de repères permettant de conduire judicieusement les essais ultérieurs.

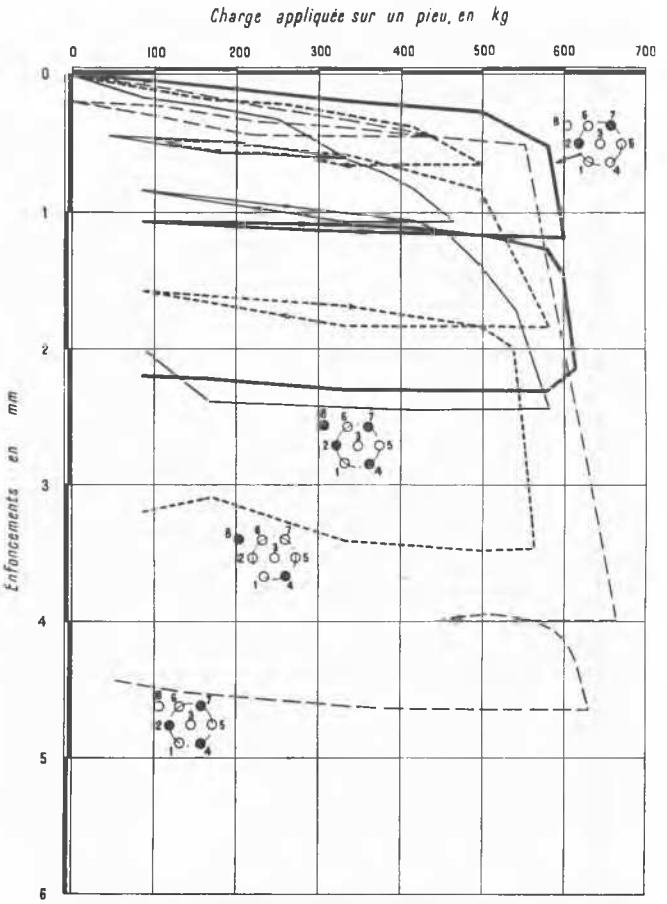


Fig. 16 Essai de charge des groupes de pieux à espacements variables (⌀ 33,5 mm)
Load Test of Pile Groups with Variable Spacing