

Portance d'un pieu De Waal, vissé moulé dans un sable sous nappe

Michel BUSTAMANTE
Directeur de recherche DR2

Luigi GIANESELLI
Technicien supérieur

Section Mécanique des sols et fondations
Division Mécanique des sols et géologie de l'ingénieur
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

L'article présente les résultats d'un essai de chargement vertical statique en vraie grandeur, réalisé sur un pieu vissé moulé De Waal, instrumenté sur toute la longueur du fût à l'aide d'un train d'extensomètre amovible. Ce pieu a été exécuté sur le site de Lomme, près de Lille, dans le cadre de la construction d'un complexe de salles de cinéma, fondé sur 920 pieux. Le site a été retenu en raison de la présence d'un horizon de sables fins très compacts sous nappe.

Le pieu De Waal se range dans la catégorie des pieux refoulants. Il s'agit d'une fondation profonde pouvant reprendre des charges utiles conséquentes, de l'ordre de 0,75 à 2 MN, bien adaptée à la construction de bâtiments civils de moyenne importance ou à caractère industriel.

L'essai réalisé sur le site de Lomme a montré que :

- le pieu essayé indiquait une portance utile élevée pour un encastrement relativement modeste dans les sables fins compacts,
- les termes caractéristiques de portance (résistance de pointe et frottement latéral) mesurés le long du pieu correspondaient bien aux valeurs prévisionnelles proposées par les auteurs en 1994, pour un autre type de pieu vissé moulé qu'est le pieu Atlas.

MOTS CLÉS : 42 - Portance - Pieu - Essai - Charge - Vraie grandeur - Extensomètre - In situ - Sable - Caractéristiques - Équipement - /pieu vissé moulé.

Introduction

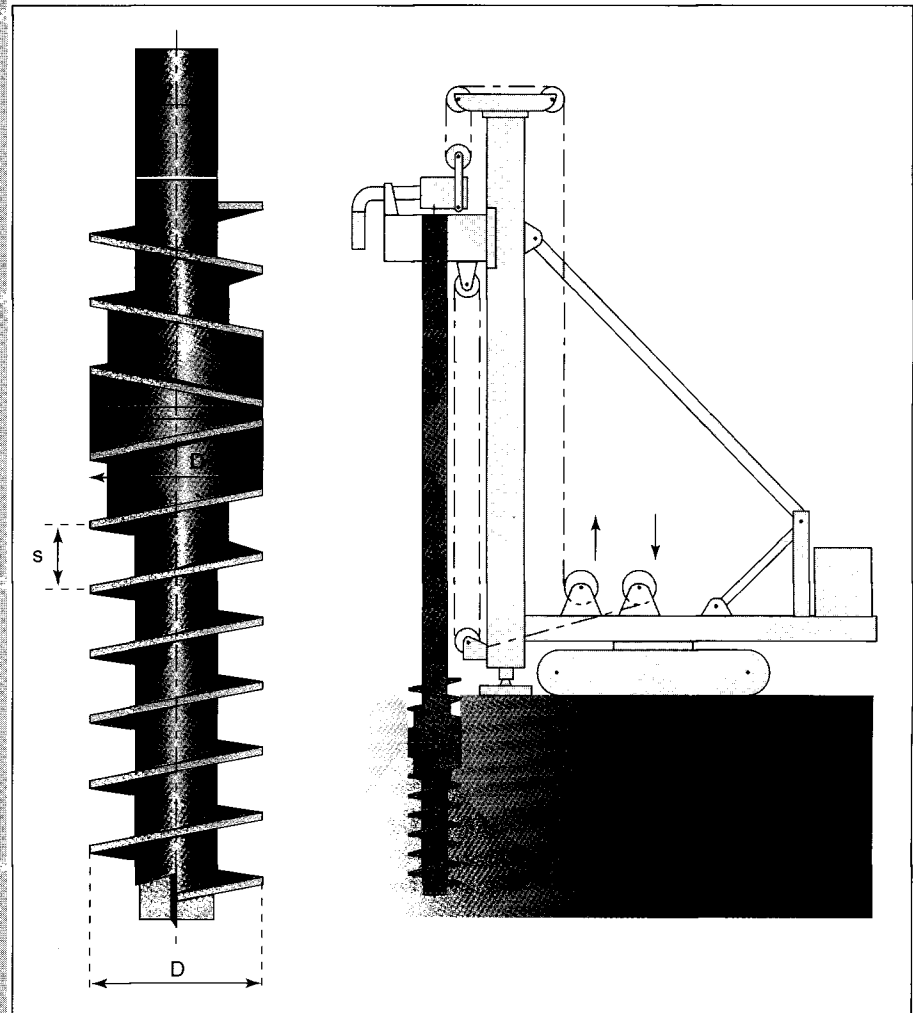
Dans le cadre de ses recherches sur le comportement des pieux refoulants et plus particulièrement des pieux vissés moulés (Bustamante et Gianeselli, 1994), le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) a procédé, en collaboration avec l'entreprise belge De Waal, à la réalisation d'un essai de chargement en vraie grandeur, sur le site du projet Décatron international.

Il s'agit d'un complexe de deux bâtiments d'une superficie au sol de quelque 12 000 m², situé à Lomme près de Lille (Nord), et regroupant 23 salles de cinéma pour un total de 7 500 places. Ce complexe, l'un des tous premiers en France, a été finalement fondé sur 920 pieux. Les pieux choisis étaient des pieux vissés moulés du type De Waal, d'une longueur dans le sol comprise entre 7,5 et 10,5 m soit, pour une longueur moyenne de 8,8 m, une longueur totale de 8 104 mètres.

Si le principe des pieux De Waal est bien connu en Belgique et au Pays-Bas, où il est utilisé depuis 1989, il n'a connu à ce jour que deux applications en France. Il s'agit d'un pieu en béton, armé ou non sur toute la hauteur, qui appartient essentiellement à la classe des pieux refoulants. Il s'obtient en vissant un tube d'acier de 219 mm de diamètre intérieur à paroi épaisse (e = 27 mm), muni à sa base d'une tête de forage creuse débordante, obturée par une pointe perdue. La tête de forage, qui fait office de tarière de refoulement, est inter-

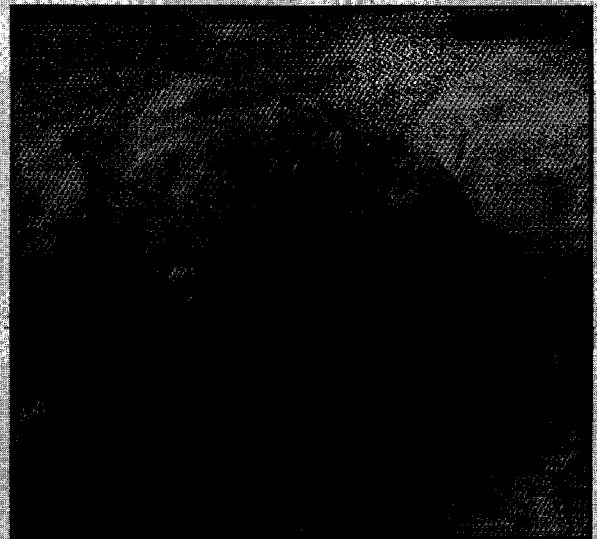
Fig. 1 - Pieu De Waal

a. *Détail de la tête de forage et schéma d'un équipement.*



b. *Pointes perdues avant leur mise en œuvre.*

c. *Partie basse du pieu après excavation. On remarque la pointe perdue.*



changeable ; elle détermine le diamètre D caractérisant le fût du pieu fini (fig. 1). La gamme des diamètres D les plus courants va de Ø 310 à Ø 560 mm. Dans le contexte du site de Lomme, où il s'agissait de reprendre des charges nominales allant de 0,35 à 1,08 MN, on a utilisé plusieurs diamètres, comme indiqué dans le tableau I.

Le site de Lomme a été retenu en raison de la possibilité d'étudier le comportement sous charge verticale statique de ce type de pieu, encastré dans un matériau aussi caractéristique que les sables du Landénien, que l'on rencontre surtout dans le département du Nord, mais également en Belgique, dans la région de Mons.

TABLEAU I

Diamètre D (mm)	Nombre de pieu	Charge nominale (MN)
310	100	0,35
360	221	0,50
460	273	0,46
510	171	0,91
560	123	1,08
.....	32	0,8 et 2

Caractéristiques des sols

Les sols dans l'emprise du futur complexe cinématographique ont fait l'objet d'une campagne de reconnaissance effectuée par le bureau belge Géologica, basée exclusivement sur la réalisation de dix-sept pénétromètres statiques CPT. Cette première campagne a été complétée au droit du plot d'essai par trois autres profils pénétrométriques (S.1 à S.3) et un sondage pressiométrique (PR.1), exigé par le LCPC, et dont la réalisation a été confiée au Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Lille.

Le pénétromètre S.2 a été implanté dans l'axe du pieu d'essai et le profil pressiométrique PR.1 à 2 m du pieu d'essai. La figure 2 situe le plot d'essai avec les différents sondages par rapport aux bâtiments du projet Décatron. En se référant à la coupe des sols établie lors de la réalisation du sondage pressiométrique, on relève la succession de couches suivantes :

- de 0 à 1,5 m : matériaux de remblais constitués par des blocs et des craies,
- de 1,5 à 3,8 m : limons sableux,
- de 3,8 à 5,2 m : argiles vertes et argiles sableuses,
- de 5,2 à 6,5 m : sables argileux moyennement compacts,
- de 6,5 à 13,5 m : sables fins argileux verts compacts à très compacts.

Le terrain est baigné par une nappe dont le toit est située à 0,8 m sous le niveau de la plate-forme de travail.

Les sables fins verts sont des sables du Landénien de la région lilloise. Ils se présentent sous l'aspect de matériaux pulvérulents avec une forte teneur en limons et argiles. Il est courant que certains niveaux soient indurés. Sur le plan de la granulométrie, ce sont des sables fins argileux avec un passant à 2 µm compris entre 10 et 20 %. Le fuseau granulométrique de ces matériaux est représenté sur la figure 3.

La figure 4 présente le profil pressiométrique PR.1 ainsi que les pénétrogrammes statiques S.1 à S.3 du plot d'essai. On constate que les trois derniers mètres de fût et la pointe du pieu reposent dans un sable moyennement à très compact, caractérisé par :

- $p_1 \approx 1,2$ à $2,5$ MPa,
- $E_M \approx 17$ à 37 Mpa, pour le pressiomètre,
- $q_c \approx 8$ à 24 MPa, pour le pénétromètre.

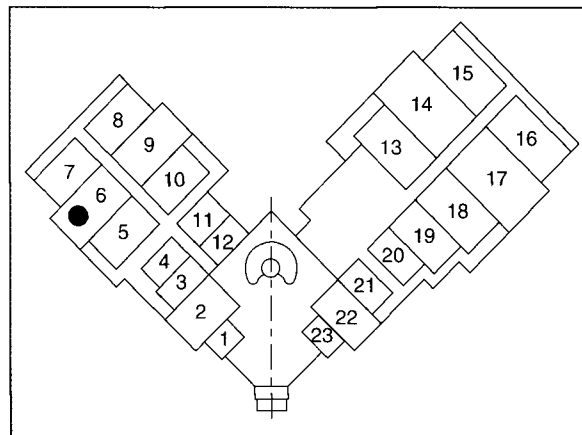


Fig. 2 - Situation du plot d'essai par rapport au projet.

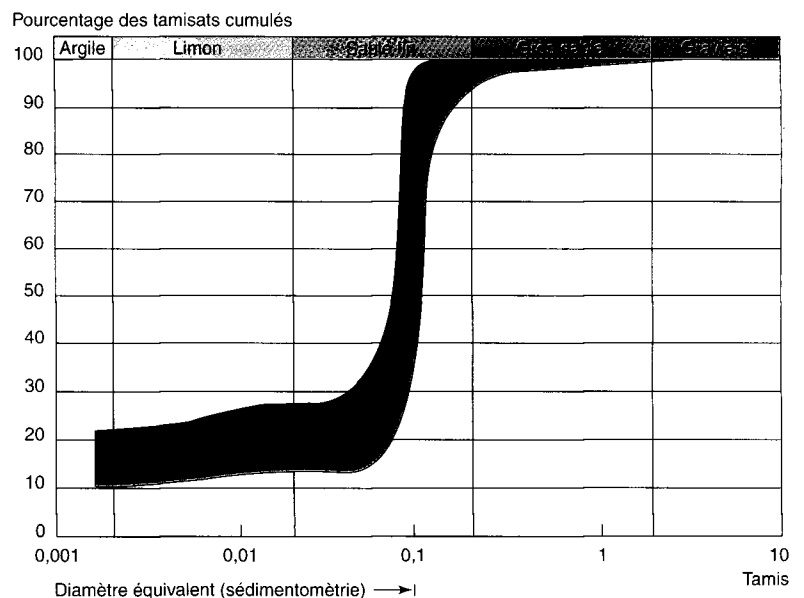
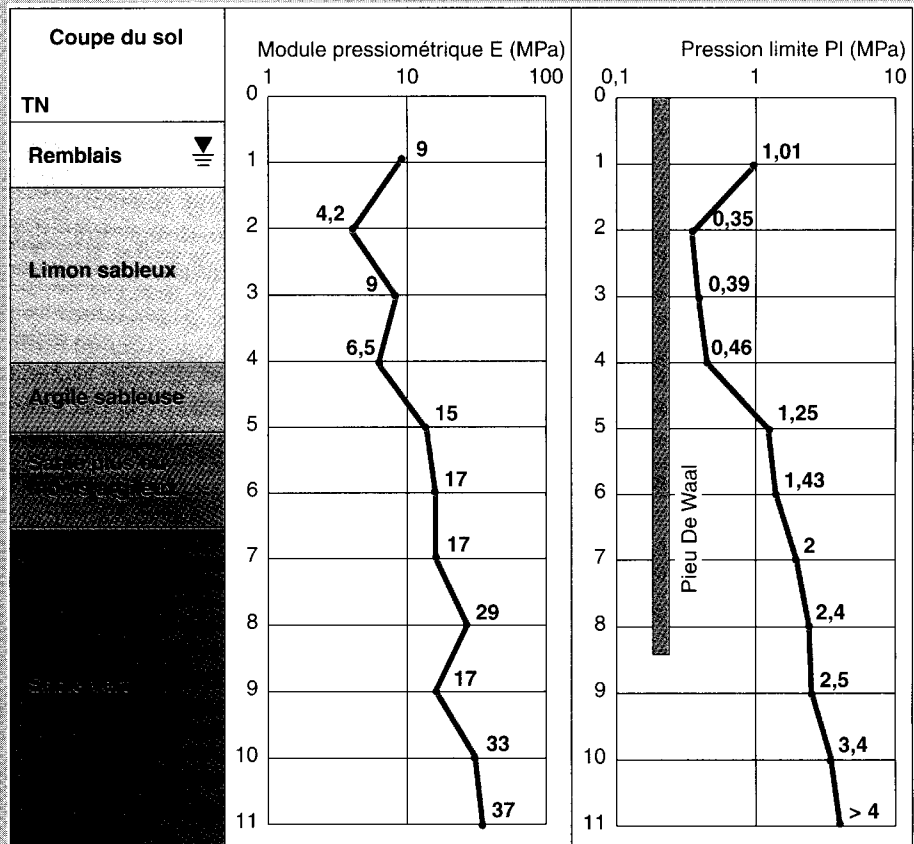
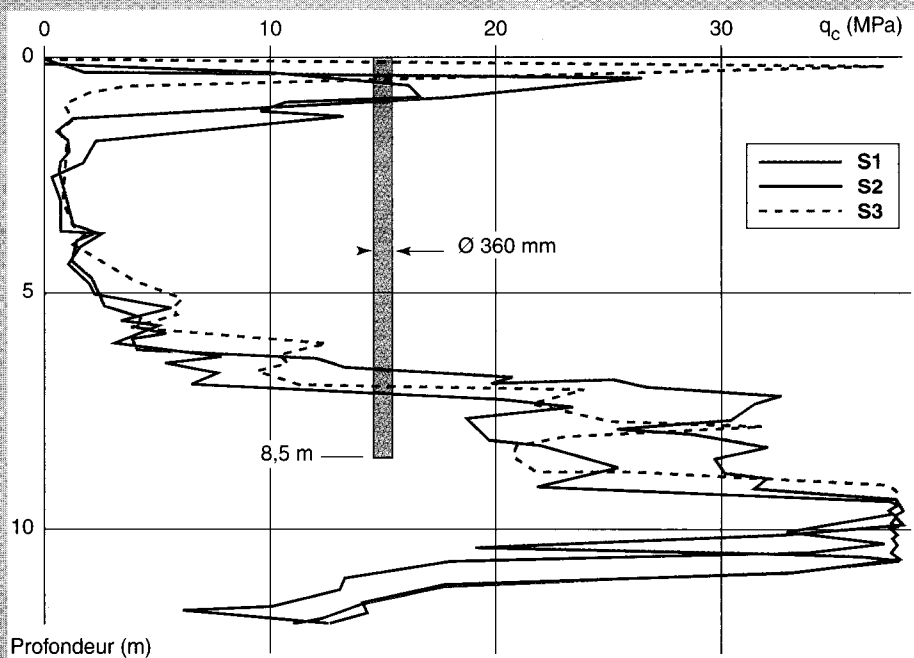


Fig. 3 - Fuseau granulométrique des sables du Landénien.

Fig. 4 - Profils caractéristiques



a. Profil pressiométrique PR.1.



b. Pénétragrammes statiques S.1 à S.3.

Caractéristiques Équipement du pieu d'essai

Le pieu d'essai a été réalisé à partir d'un équipement De Waal monté sur porteur Hitachi KH 125-GLSR. La tête de forage avait les caractéristiques suivantes (fig. 1a) :

- $D = 360$ mm,
- $s = 150$ mm,
- $d_1 = 273$ mm.

La mise en œuvre du pieu d'essai, d'une longueur de 8,5 m sous la plate-forme de travail, a été effectuée dans la journée du 15 février 1996. La durée de la totalité des opérations de forage, bétonnage et insertion de la cage, n'a pas excédé 14 minutes.

Le béton du pieu d'essai, semblable à celui des pieux définitifs, a été confectionné à partir d'un ciment CLC 45 dosé à 350 kg/m^3 , et de granulats 0/15. Le bétonnage a été réalisé à la pompe avec un affaissement au cône de l'ordre de 20.

Le pieu était armé sur toute sa hauteur avec une cage de $\varnothing 170$ mm, descendue par poussage dans le béton frais. L'armature était composée de 6 T $\varnothing 20$ mm et d'un tube en acier $\varnothing 51/55$ mm disposé dans l'axe du pieu, appelé à recevoir un train d'extensomètres amovibles LPC, type MVL P.50 (Bustamante et al., 1990).

Matériels de mesure et d'essai

Le dispositif de réaction, conçu et installé par l'entreprise De Waal, était constitué par un empilement de blocs de béton avec chevêtre spécial (fig. 5) permettant de mobiliser 3 MN de réaction. Les charges d'épreuve ont été appliquées à l'aide de l'ensemble vérin/pompe électrique du LCPC.

Concernant les matériels de mesure, on a utilisé :

- un manomètre de précision de 0-60 MPa avec peson annulaire à jauges LCPC de 2,5 MN pour le contrôle des charges ;
- deux comparateurs potentiométriques au $1/100^{\text{e}}$ mm (de classe 0,5 et de course 150 mm), montés sur une base de référence pour la mesure des enfoncements de la tête du pieu ;
- un chapelet d'extensomètres amovibles délimitant huit tronçons de mesure, disposés au sein du fût comme indiqué sur la figure 6, permettant de mesurer les raccourcissements unitaires $\Delta l/l$.

La totalité des matériels de mesure a été préalablement étalonnée au LCPC.



Fig. 5 - Massif de réaction.

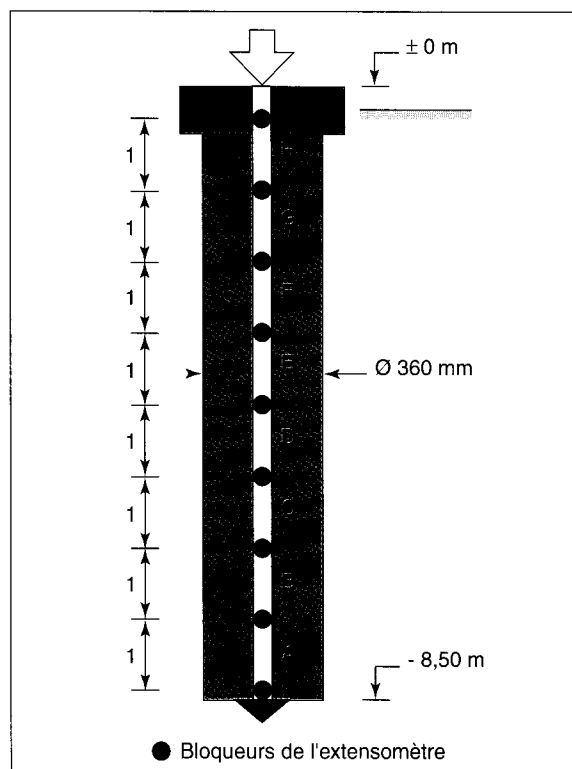


Fig. 6 - Schématisation de l'instrumentation du pieu d'essai montrant les différents tronçons de mesure.

L'essai de chargement Interprétation

Le pieu d'essai a été essayé le 27 mars 1996, après un délai de repos de 41 j, et selon un programme conforme aux principes du mode opératoire de l'essai de pieu des LPC (Bustamante et Jézéquel, 1989). Le chargement a été réalisé en dix paliers de 0,15 MN. L'essai a été interrompu lors de l'application de la charge de 1,65 MN au cours du onzième palier, et cela en raison de l'éclatement du massif de tête. La désorganisation de celui-ci n'a pas permis d'obtenir la courbe de déchargement.

Les figures 7, 8 et 9 montrent les relations caractéristiques obtenues après l'interprétation des mesures en tête pour chaque palier :

- l'enfoncement de la tête du pieu s_0 et de la pointe sous la charge Q_0 , pour chaque palier (fig. 7),
- la relation $s_0 - \log t$ traduisant l'évolution du fluage pour chaque palier (fig. 8),
- la détermination de la charge critique de fluage (fig. 9).

L'analyse du comportement du pieu lors du dixième palier et de l'ensemble des résultats permet de considérer que la charge limite Q_u était très voisine de 1,65 MN, puisque à la trentième minute du dixième palier, l'enfoncement brut du pieu était déjà pratiquement égal au dixième de son diamètre. Quant à la charge critique de fluage Q_c , celle-ci apparaît nettement sur la relation $\alpha - Q_0$.

On a donc adopté pour ces deux charges caractéristiques :

- $Q_u = 1,65 \text{ MN}$,
- $Q_c = 1,05 \text{ MN}$.

L'application d'un coefficient de sécurité de 0,8 à la charge Q_c conduirait, vis-à-vis du sol bien évidemment, à une charge nominale $Q_N = 840 \text{ kN}$. Cette valeur est à comparer à la charge nominale de 0,5 MN, finalement adoptée pour le projet pour les pieux de $\varnothing 360 \text{ mm}$, mais qui s'explique aussi par le taux de travail admissible du béton, limité à 5 MPa.

Il est à noter que, sous la charge maximale d'épreuve de 1,5 MN, l'enfoncement brut de la tête s_0 , intégrant le raccourcissement élastique du fût et les déformations du sol, a atteint 35,17 mm à la trentième minute. Par suite de l'éclatement du

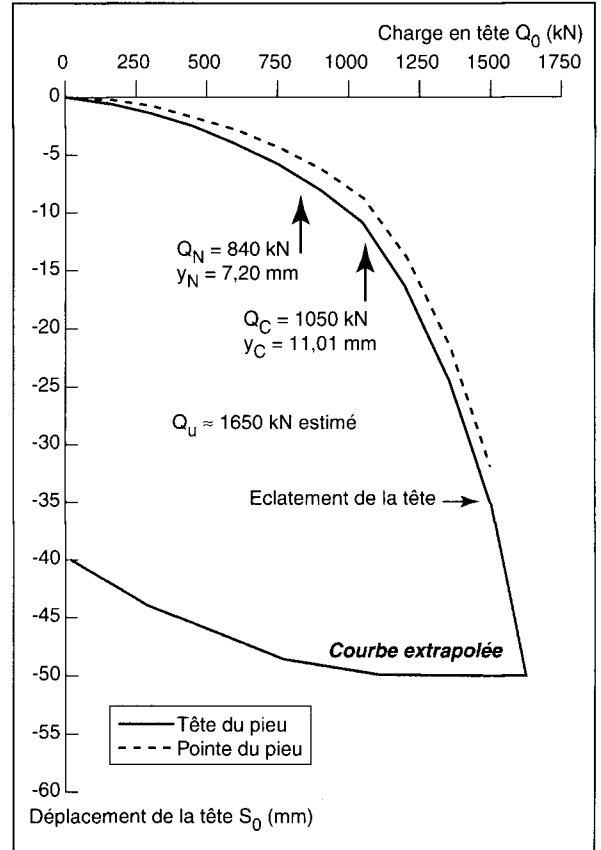


Fig. 7 - Enfoncement de la tête de pieu S_0 et de sa pointe sous la charge Q_0 , pour chaque palier.

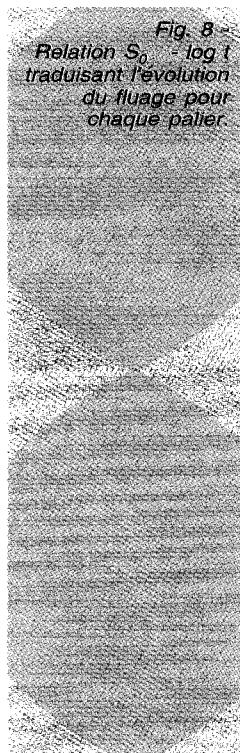
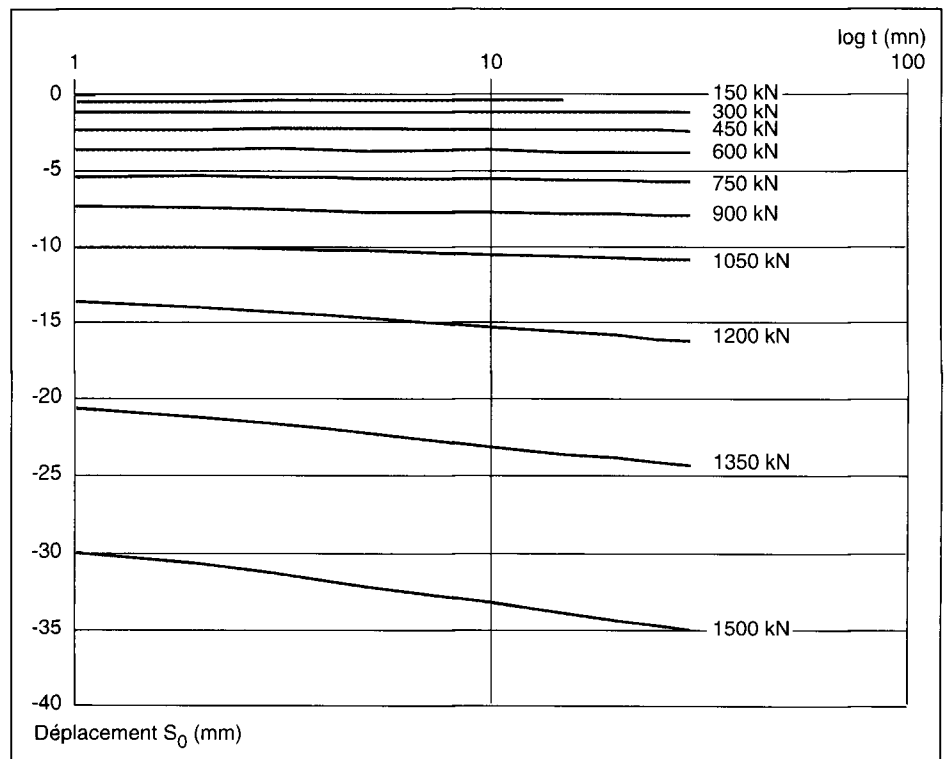


Fig. 8 - Relation $S_0 - \log t$ traduisant l'évolution du fluage pour chaque palier.



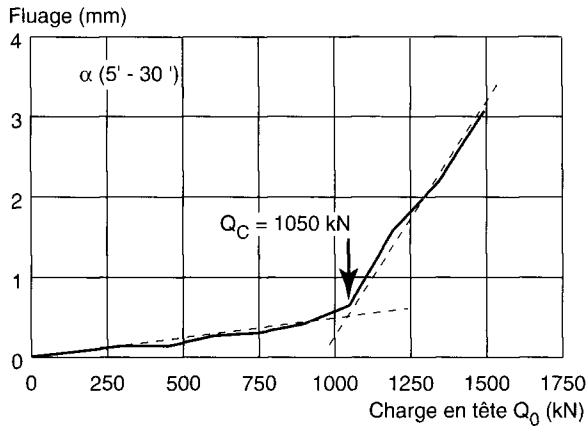


Fig. 9 - Détermination de la charge critique du fluage.

massif de tête, l'enfoncement résiduel s_r après déchargement complet n'a pas pu être mesuré. On a fait apparaître, sur la figure 7, la courbe de déchargement probable.

L'enfoncement brut de la tête sous la charge nominale Q_N de 840 kN vaudrait 7,2 mm, soit 2 % du diamètre nominal D , y compris environ 2 mm de raccourcissement élastique du fût. En se limitant à une charge nominale de 500 kN, l'enfoncement brut vaut quelque 3 mm, avec un raccourcissement élastique de 1 millimètre.

Les figures 10 et 11 illustrent les relations tirées de l'interprétation des mesures des raccourcissements unitaires $\Delta l/l$, c'est-à-dire :

- la distribution des efforts le long du fût (fig. 10),
- les courbes de mobilisation du frottement latéral unitaire par tronçon (fig. 11).

D'après la figure 10, la charge maximale d'épreuve de 1,5 MN se répartit à raison de 0,529 MN sous la pointe et 0,971 MN pour le frottement latéral total, soit respectivement 35 % et 65 % de la charge appliquée en tête. Le frottement est entièrement mobilisé sur toute la hauteur du fût et sa valeur de pic dépend de la compacité des couches.

On distingue en fait trois régimes de frottements, dont les courbes de mobilisation des valeurs unitaires q_s sont présentées sur la figure 11. Pour des déplacements $y_i \approx 15$ mm, les valeurs de frottement unitaire q_s valent, de la tête vers la pointe :

- niveaux E-F-G : $q_s \approx 15$ kPa, dans les remblais, limons et argiles vertes de p_l moyen 0,4 MPa,
- niveau D : $q_s \approx 75$ kPa, dans les argiles sableuses et sables fins de p_l moyen ≈ 1 MPa,
- niveaux A-B-C : $185 < q_s < 210$ kPa, dans les sables fins très compacts de p_l compris entre 1,5 et 2,5 MPa.

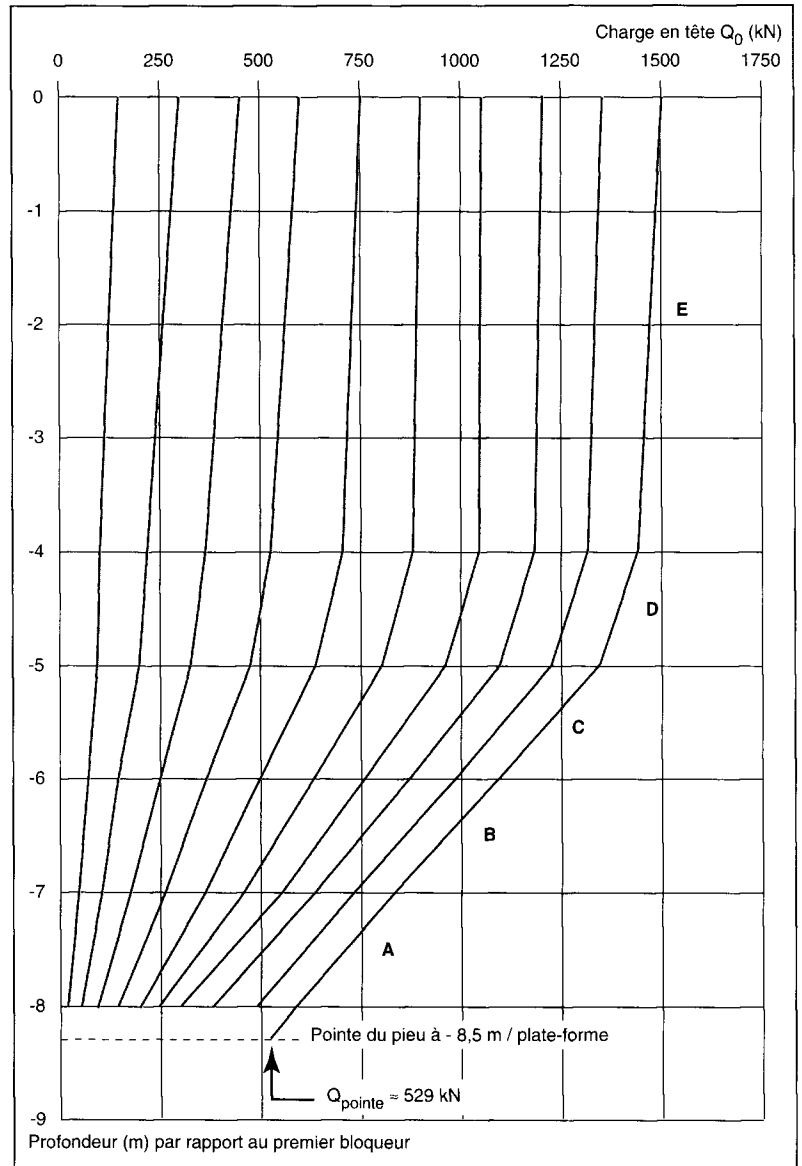


Fig. 10 - Distribution des efforts le long du fût.

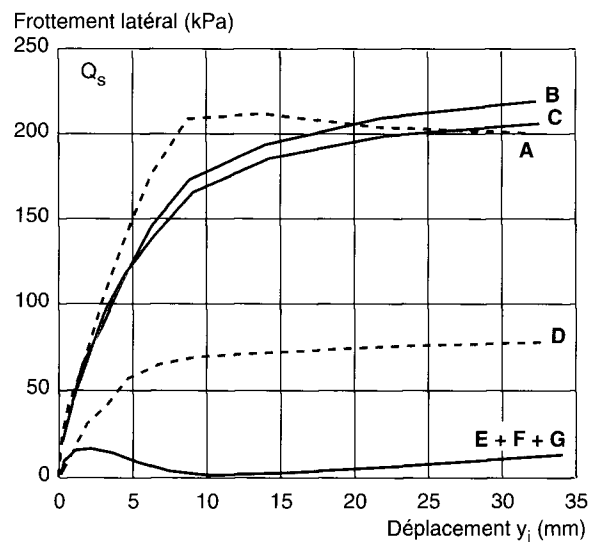


Fig. 11 - Courbes de mobilisation du frottement latéral unitaire q_s par tronçon.

Pour un effort sur la pointe mesuré de 0,53 MN ou estimé à 0,68 MN (cas où Q_u est extrapolé à 1,65 MN), les valeurs correspondantes des facteurs de portance varient de :

- $k_p = 2,15$ à $2,75$, pour le pressiomètre,
- $k_c = 0,25$ à $0,35$, pour le pénétromètre.

avec

- un diamètre de la pointe $D = 360$ mm,
- $p_l = 2,5$ MPa, d'où $p^*_l = 2,4$ MPa,
- $q_c = 20$ MPa.

Si l'on compare les valeurs de ces paramètres dimensionnants aux valeurs de calcul proposées par Bustamante et Gianceselli en 1994 pour le pieu Atlas (tableaux II et III), autre type de pieu vissé moulé également refoulant et auquel s'apparente le pieu De Waal, on constate :

> une bonne convergence d'ensemble des valeurs mesurées des frottements unitaires q_s , avec toutefois des valeurs légèrement supérieures pour les sables très compacts (cas des niveaux A, B et C), ou légèrement inférieures pour les sols les moins compacts (niveaux D et F) ;

> que les valeurs des facteurs de pointe k_p , comprises pour le pieu De Waal entre 2,15 et 2,75 pour le pressiomètre, se situent pratiquement à mi-chemin des valeurs proposées pour les argiles et les sables (tableau IV). La nature des sols rencontrés à Lomme sous la pointe, sables fins argileux, pourrait expliquer ce résultat ;

> que les valeurs mesurées de k_c par contre, rattachées à la méthode pénétrométrique, ne constituent que la moitié environ des valeurs proposées par le même document, et cela tant pour les sables que pour les argiles.

TABLEAU II
Choix du coefficient de portance de la pointe k_i

Nature des sols	k_p	k_c	k_N
Argile	1,6 à 1,8	0,55 à 0,65	0,9 à 1,2
Sable	3,6 à 4,2	0,5 - 0,75	1,8 à 2,1
Graves (*)	$\geq 3,6$	$\geq 0,5$	non déterminé
Craie	$\geq 2,4$	$\geq 0,6$	$\geq 2,6$
Marnes	$\geq 2,4$	$\geq 0,7$	$\geq 1,2$

(*) La réalisation d'essais pénétrométriques CPT et SPT restant toujours sujette à caution dans ce type de sols.

TABLEAU III
Choix du frottement latéral unitaire q_s

À utiliser lorsque

Nature des sols	Type de pieu vissé		p_l (MPa)	q_c (MPa)
	Moulé	Tubé		
Limon argileux ou argile sableuse	Q_1	Q_1	$< 0,3$	$< 0,1$
	Q_3	Q_2	$> 0,5$	$> 0,5$
	Q_4	Q_2	≥ 1	≥ 3
Sable ou graves	Q_1	Q_1	$< 0,3$	< 1
	Q_4	Q_2	$> 0,5$	$> 3,5$
	Q_5	Q_2	$> 1,2$	> 8
Craie	Q_4	Q_2	$> 0,5$	$> 1,5$
	Q_5	Q_2	$> 1,2$	$> 4,5$
Marnes	Q_4	Q_2	$< 1,2$	< 4
	Q_5	Q_2	$\geq 1,5$	≥ 5

Conclusions

L'interprétation des résultats de chargement sur ce qui peut être considéré comme l'un des tous premiers essais de chargement en vraie grandeur sur pieu vissé moulé de type De Waal instrumenté, mis en œuvre dans des sables fins compacts à très compacts sous nappe, a montré que :

- ◆ le pieu essayé indiquait une portance globale élevée pour un encastrement de quelques mètres dans des sables compacts de p_l moyen $\approx 2,5$ MPa et $q_c \approx 20$ MPa ;
- ◆ les valeurs mesurées des paramètres dimensionnants pour les termes de résistance de pointe

et de frottement latéral q_s et k_p corroboraient assez bien les valeurs de ces mêmes paramètres proposées pour le pieu Atlas (autre type de pieu refoulant) et qu'en conséquence, les règles proposées pour ce dernier pouvaient constituer dans un premier temps une référence suffisante pour tout dimensionnement à venir.

On terminera en soulignant que ce premier résultat obtenu pour des sables fins argileux est encourageant et qu'il serait opportun de pouvoir le compléter pour des sols aussi caractéristiques de notre territoire que les marnes, les craies ou les graves.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BUSTAMANTE M., GIANESELLI L. (1994), Contribution au dimensionnement des pieux vissés, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **191**, mai-juin, pp. 41-53.

BUSTAMANTE M., JÉZÉQUEL J.-F. (1989), *Essai statique de pieu isolé sous charge axiale*. Méthode d'essai LPC, **31**, févr., 12 p.

BUSTAMANTE M., JÉZÉQUEL J.-F., GIANESELLI L. (1990), *La mesure des déformations à l'aide des extensomètres amovibles LPC*, Méthode d'essai LPC, **34**, oct., 16 p.

Remerciements

Le LCPC remercie toute l'équipe de l'entreprise De Waal ainsi que M. Barthelme, de l'entreprise ETIP, pour l'aide qu'ils ont apportée sur le site de Lomme, lors de la préparation et de la réalisation de l'essai de chargement.

ABSTRACT

The bearing capacity of a pre-cast screw De Waal pile in sand under water table

M. BUSTAMANTE - L. GIANESELLI

This paper gives an account of the results of a full-scale static vertical loading test on a pre-cast screw De Waal pile, which was instrumented along the entire length of its shaft with a removable extensometer. This pile was constructed on a site at Lomme near Lille, during construction of a cinema complex which is built on 920 piles. This site was selected because of the presence of a layer of fine very compact sand under the water table. The De Waal pile is a displacing pile. It is a deep foundation which is able to assume large effective loads, of between 0.75 and 2 MN, and is very suitable for the construction of medium-sized civil or industrial buildings. The test on the Lomme site demonstrated:

- that the tested pile exhibited a very high effective bearing capacity for a relatively low embedment depth in fine compact sands
- that the bearing capacity characteristics (toe resistance, lateral friction) as measured along the length of the pile, matched the values forecast by the authors in 1994 for the ATLAS pile, which is another type of pre-cast screw pile.