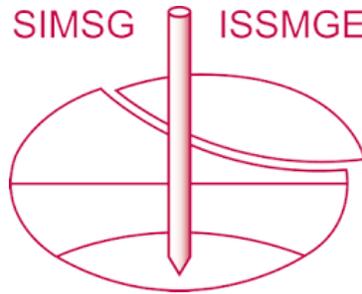


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



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.

Les fondations du 2^{ème} pont ferroviaire d'Argenteuil The foundations of the 2nd railway bridge of Argenteuil

M. Bustamante, E. Bourgeois & L. Gianceselli
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

J-L. De Justo
Département de Mécanique des Milieux Continus, Université de Séville, Espagne

RÉSUMÉ

L'amélioration des dessertes de l'Île de France a conduit la SNCF à envisager la construction d'un deuxième pont à Argenteuil, implanté à proximité immédiate du pont construit par Haussmann en 1864. Le tracé du nouvel ouvrage intéresse des formations à risques (Marnes et Caillasses, Gypses). La solution initiale de pieux forés a été abandonnée au profit de micropieux à très haute portance (6 MN). On rapporte les résultats d'essai de chargement sur micropieu instrumenté et les observations effectuées lors de la construction des micropieux sur la première pile.

ABSTRACT

In order to improve the railway service in the Paris region the French Railway Authorities have decided to build a new bridge at Argenteuil, to be located in the immediate vicinity of an old bridge built by Haussmann in 1864. Due to various constraints among which the presence of karstic strata, the initial solution of large bored piles was abandoned, at the advantage of micropiles with a very high capacity of 6 MN. The response of the soil have been determined on an instrumented micropile. All the data related to the test and the design as well as the observations made during the grouting of the working micropiles are reported by the authors.

1 L'OUVRAGE ET SON CONTEXTE

L'amélioration des dessertes ferroviaires de la région parisienne a conduit la SNCF à envisager la construction d'un second pont sur la Seine à Argenteuil. Cet ouvrage a été implanté à proximité immédiate du pont construit par Haussmann en 1864 lequel a subi de graves dommages par faits de guerre en 1870, 1940 et 1944. Ce dernier fut toujours reconstruit sur ses anciennes fondations, considérées comme intactes.

Sur le plan de sa conception, le nouvel ouvrage d'une longueur de 194 m rappelle l'ouvrage existant avec ses quatre appuis en rivière.

Le tracé du nouvel ouvrage intéresse les Marnes et Caillasses et les Gypses de la région parisienne, bien connus pour les risques de décompressions, dissolutions ou même karsts qu'ils présentent. Quant aux fonds de Seine, l'étude des archives a indiqué qu'ils étaient encombrés de pieux de bois, restes de maçonneries et charpentes métalliques, suite aux destructions successives.

Toutes ces sujétions, ajoutées au fait d'avoir à construire tout contre un ouvrage ancien sous circulation très intense et d'avoir à respecter les contraintes imposées par la navigation, ont conduit à considérer avec beaucoup d'attention le problème du choix des fondations.

2 LE CHOIX DES FONDATIONS

2.1 Conception

La solution initiale de pieux forés de grands diamètres ne fut retenue que pour les culées et cela à raison de 10 Ø1200 en Rive Gauche et 12 Ø1200 en Rive Droite. On opta pour les quatre appuis en Seine, pour une solution sur micropieux à très haute portance pour les avantages suivants (Bustamante et al., 2002) :

- réduction de l'emprise du batardeau, mais aussi du bouchon et de la semelle des piles (Fig. 1) ;
- recours à des équipements de forage légers pouvant travailler à partir des batardeaux ;

- limitation des approvisionnements par voie fluviale ;
- élimination des risques de soutirage et décompression des sols à proximité des appuis de l'ouvrage ancien ;
- possibilité de reconnaissance de la totalité de l'emprise des appuis du fait des forages destinés aux micropieux, avec possibilité de confortement des vides et horizons « suspects » par injection.

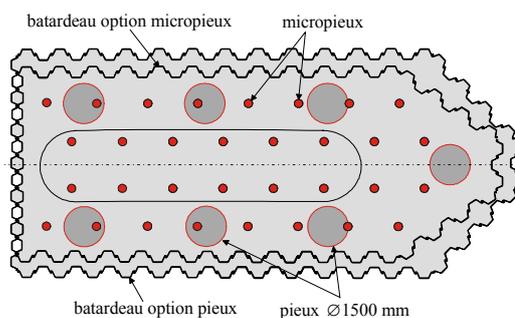


Figure 1. Emprise des batardeaux montrant la solution pieux et micropieux (pré-dimensionnement avec 32 micropieux).

Au niveau de la réalisation, les travaux se trouvaient simplifiés par le fait qu'il devenait possible de forer et injecter à partir des plates-formes installées sur les batardeaux.

2.2 Le dimensionnement

Suite aux calculs de pré-dimensionnement, on estima que les efforts sollicitant la pile pouvaient être repris avec 32 micropieux de 22 m de longueur sous la semelle, et capables de reprendre chacun et pour les plus chargés quelque 5,5 MN aux ELU.

Toujours au niveau du dimensionnement, c'est l'estimation des déplacements de la pile sous le choc d'une barge (solllicitation de type ELU accidentel) qui est apparue comme le problème essentiel. Il importait de s'assurer que la raideur de la fondation au niveau des tabliers distants d'à peine 15 cm, était

suffisante pour éviter que le nouveau viaduc ne percute l'ancien. L'étude de ce problème a fait l'objet de trois approches :

- au niveau du pré-dimensionnement, par l'étude du comportement d'une fondation fictive équivalente en terme de rigidité de flexion (Bustamante, 2003) ;
- après avoir défini la configuration définitive de la fondation, en recourant à deux modélisations par éléments finis, l'une en 2-D avec PLAXIS (De Justo, 2004) et l'autre en 3-D avec CESAR-LCPC.

Les charges de calcul communes aux trois approches étaient les suivantes :

- o poids du tablier de l'ouvrage et de ces équipements ainsi que du massif de couronnement de la fondation, $F_v = 35 \text{ MN}$;
- o torseur des efforts exercés sur le massif de fondation lors du choc de la barge sur la pile, $F_H = 15 \text{ MN}$ et $M = 120 \text{ MNm}$.

Pour ce qui concerne la modélisation en condition 3-D avec le programme CESAR-LCPC (Bourgeois, 2004), on retiendra les points suivants :

- les micropieux étaient représentés dans le maillage par des cylindres équivalents à section carrée ;
- le maillage utilisé, comportait 39 400 nœuds et 13 600 éléments ;
- le modèle tenait compte du frottement du sol sur tout le périmètre du massif de fondation et sur sa base.

Le tableau 1 ci-dessous récapitule l'essentiel des résultats obtenus avec les trois approches et avec des hypothèses de sol, considérées comme les plus défavorables.

Tableau 1 : Résultats des différentes approches de calcul

Paramètre	Fondation fictive	PLAXIS	CESAR-LCPC
angle de rotation de la fondation α	$5 \times 10^{-3} \text{ rad}$	$3,0 \times 10^{-3} \text{ rad}$	$1,8 \times 10^{-3} \text{ rad}$
déplacement horizontal δ à 18,5 NGF	86 mm	55,5 mm	24 mm
déplacement horizontal du tablier d	186 mm	133 mm	60,5 mm
effort normal pour le micropieu n°1 (aval extrême)	-	3,4 MN	2,72 MN
effort normal pour le micropieu n°19 (amont extrême)	4,25 MN	-1,4 MN	5,1 MN

déplacement du tablier $d = \delta + H \tan \alpha$ (H : hauteur de la pile = 20m).

La figure 2 illustre le résultat obtenu à partir de la modélisation CESAR-LCPC en 3-D.

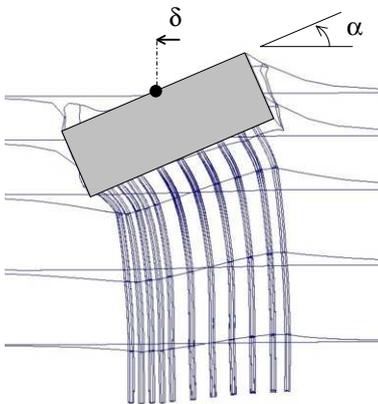


Figure 2. Déformée de la semelle avec 28 micropieux (modélisation 3D)

Le résultat essentiel de ces trois approches est d'avoir démontré que la déformation de la fondation sous l'effet du choc de 15 MN était suffisamment faible pour que le tablier du

nouveau viaduc n'entre pas en contact avec celui de l'ouvrage ancien.

3 CARACTÉRISTIQUES DU MICROPIEU D'ESSAI

Le niveau de performance demandé aux micropieux de l'ouvrage exigeait d'être validé par un essai de chargement préalable. Le micropieu d'essai a été installé sur la Rive Droite de la Seine au travers de sols correspondant à ceux qui seraient rencontrés à l'aplomb des appuis en rivière. À l'exception toutefois des 12 premiers mètres dont on s'employa à réduire le frottement qu'ils pouvaient induire au scellement. Les caractéristiques et séquences de mise en œuvre de ce micropieu ont été les suivantes :

- mise en place d'un tubage permanent $\varnothing 450 \text{ mm}$ sur les 12 premiers mètres ;
- forage en $\varnothing 240$ au tricône et sous coulis dilué ;
- insertion dans le forage de l'armature constituée par un tube d'acier $\varnothing 180 \text{ mm}$ à très haute résistance ; les 12 premiers mètres de l'armature ont reçu un dispositif de neutralisation du frottement ; la partie destinée à être scellée au terrain en mode IRS comportait 21 manchettes ;
- envoi par la dernière manchette d'un coulis dosé à $C/E = 2$;
- injection en mode IRS et en deux passes d'un coulis de $C/E = 2,2$;
- confection d'une tête spéciale.

La longueur totale du micropieu terminée dans le sol valait 36,26 m. La figure 3 illustre l'assemblage du micropieu.



Figure 3. Vue de l'armature en cours d'assemblage

4 RÉSULTATS DE L'ESSAI DE CHARGEMENT

Après avoir été instrumenté d'un train d'extensomètres LCPC (Fig. 4), le micropieu ME a été essayé le 12 mai 2004, après un délai de repos de 29 jours, et selon un programme de type MLT, c'est-à-dire que la charge est appliquée par incréments successifs, avec une durée prédéfinie pour chaque palier. Le dispositif de réaction (Fig. 5), constitué par un chevêtre et quatre tirants d'ancrage permettait de mobiliser un effort de 6,5 MN.

Les relations caractéristiques obtenues après l'interprétation des mesures sont illustrées sur les figures 6 a,b et c.

L'examen des relations charge-enfoncement Q_0 - S_0 et Q_p - S_0 montre que la charge limite du micropieu vis-à-vis du sol n'a pas été atteinte. Ceci est confirmé par la quasi nullité de l'enfoncement de la pointe et la très faible valeur de l'enfoncement résiduel resté stabilisé à 5,74 mm après déchargement complet. Pour des raisons évidentes, la méthode de Chin (Borel et al., 2004) ne permet pas de prévoir la charge limite Q_L qui est de toute évidence bien supérieure à 6 MN.

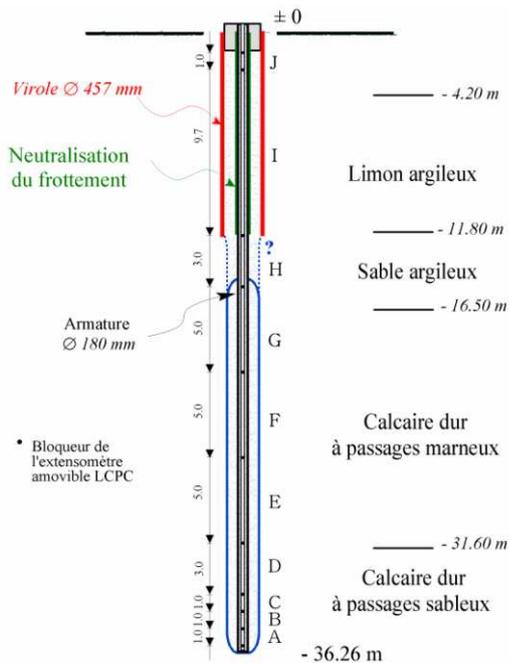


Figure 4. Micropieu d'essai avec ses niveaux d'extensomètres amovibles



Figure 5. Vue du dispositif d'essai en cours de chargement du micropieu

Le résultat obtenu concerne la réponse globale du micropieu, il importait pour faire abstraction des 12 premiers mètres de sol inexistant en rivière, de déterminer la part d'effort reprise par le scellement sous la cote +16 NGF de la semelle.

Cela est possible grâce à l'instrumentation du micropieu permettant de connaître la distribution des efforts le long du scellement comme l'illustre la figure 6b. Cette dernière montre que la charge maximale d'épreuve de 5,6 MN appliquée en tête se répartit à raison de 1,27 MN au dessus de la cote +16.0 NGF et de 4,33 MN en dessous de celle-ci. La pointe et les deux derniers mètres de scellement ne sont pratiquement pas sollicités.

Ce résultat montre que la charge transmise au-delà de la cote +16 NGF, à savoir 4,33 MN, était égale à 2,4 fois la charge aux ELS rares (1,82 MN), et 1,3 fois la charge aux ELU accidentels (3,35 MN).

Les courbes de mobilisation q_s indiquent différents régimes caractéristiques pour les différents niveaux (Fig. 6c). Les frottements unitaires q_s valaient respectivement $q_s = 100$ kPa, sur la hauteur d'armature située au droit des remblais et des limons argileux ; $q_s = 90$ kPa dans les sables argileux du Beauchamp scellés en mode IGU, pour atteindre $q_s > 410$ kPa, dans les Marnes et Caillasses et Gypses avec scellement en mode IRS.

Les frottements n'ont été pleinement mobilisés (valeur de « pic ») que pour les niveaux H, I et J. La pointe et les niveaux

non sollicités A, B, C, ou toujours en cours de mobilisation tels que D, E et F, offrent des réserves de capacité portante encore considérables.

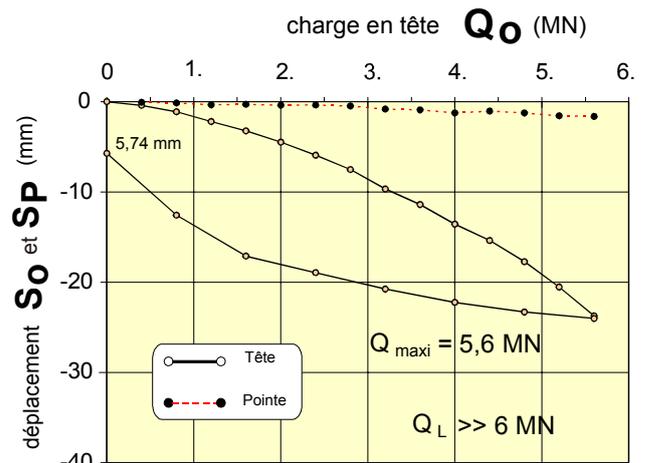


Figure 6a. Enfoncement de la tête So et de la pointe Sp sous la charge Q_0 .

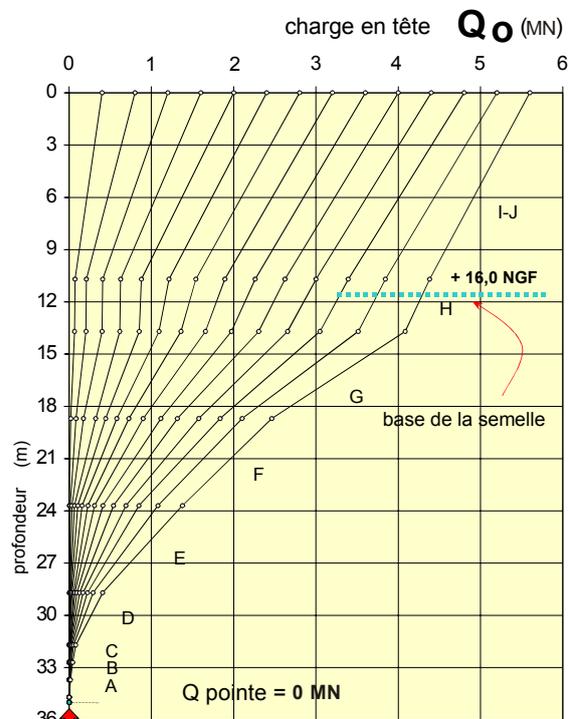


Figure 6b. Répartition des efforts le long du scellement

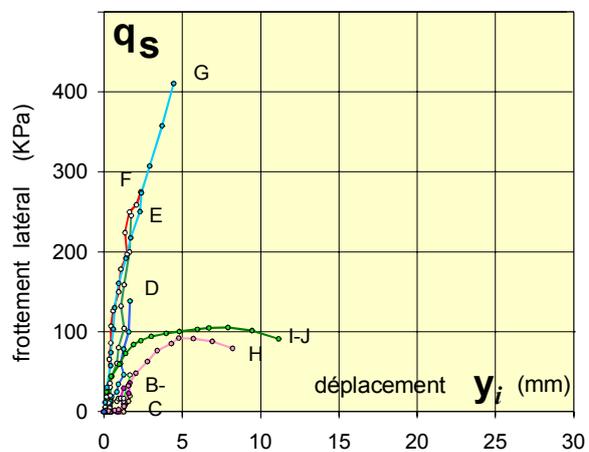


Figure 6c. Courbes du frottement latéral unitaire q_s .

5 EXTRAPOLATION AU PONT

L'ensemble des conclusions tirées de l'essai de chargement et des observations faites lors de la réalisation du micropieu d'essai a permis d'optimiser le dimensionnement mais aussi les opérations de forage et l'injection.

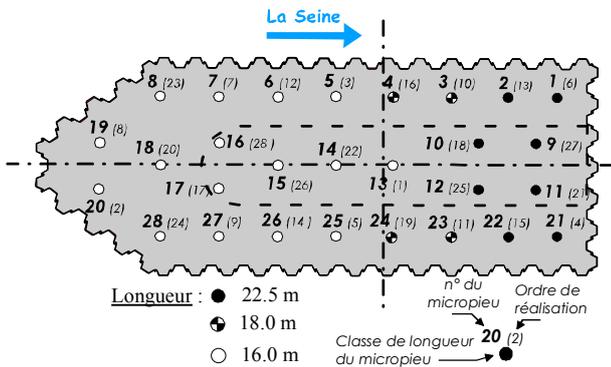


Figure 7. Implantation et longueurs des 28 micropieux définitifs

C'est ainsi qu'au vu des excellentes performances du micropieu d'essai le nombre de micropieux par pile a été ramené à 28 au lieu de 32, et les longueurs sous la semelle à : 15, 17 et 21,5 m avec, respectivement, 10, 12 et 16 manchettes distribuées tous les mètres. La figure 7 situe l'implantation des différents micropieux au sein de la pile.

Les travaux de construction des fondations du pont ont débuté en avril 2004 par la réalisation des pieux Ø1200 en Rive Droite. L'installation du batardeau de la première pile P2 en Seine a démarré fin juillet et était en mesure de recevoir la plate-forme de travail pour les micropieux à la mi-septembre.

La réalisation du premier micropieu (n°13) a débuté le 23 septembre. Le dernier (n°16) a été terminé le 20 octobre, d'où un rendement de 2 micropieux/jour.

Les opérations de forage et de scellement de chaque micropieu ont fait l'objet d'enregistrements des paramètres caractéristiques (Masclès, 2004). La figure 9 montre le relevé des volumes de coulis injectés en mode IRS lors de la 2^{ème} passe, pour les pieux longs de la pile P2. On remarque que les volumes moyens V_m injectés ont presque toujours sensiblement excédé les volumes passés sur le micropieu d'essai (ME).

6 CONCLUSION

La proximité immédiate d'un ouvrage SNCF ancien sous trafic intense, la présence de formation à risques (Marnes et Caillasses et Gypses) et les sujétions de la navigation sur la Seine, ont conduit à retenir pour les fondations en rivière du 2^{ème} pont d'Argenteuil des micropieux de très haute portance.

Ce choix a été à l'origine d'économies considérables par rapport à une solution sur pieux forés de grands diamètres.

L'optimisation du dimensionnement mais aussi des opérations de forage et scellement a été rendu possible grâce à l'exploitation des informations obtenues lors de la réalisation d'un essai de chargement préalable sur micropieu instrumenté.

Les problèmes posés par le dimensionnement ont conduit à effectuer des modélisations qui intègrent l'effet de groupe et la contribution du massif de couronnement des micropieux.



Figure 8. Vue des travaux d'installation des micropieux à partir du batardeau de la pile P2 (octobre 2004). On note la proximité de l'ancien pont de 1864.

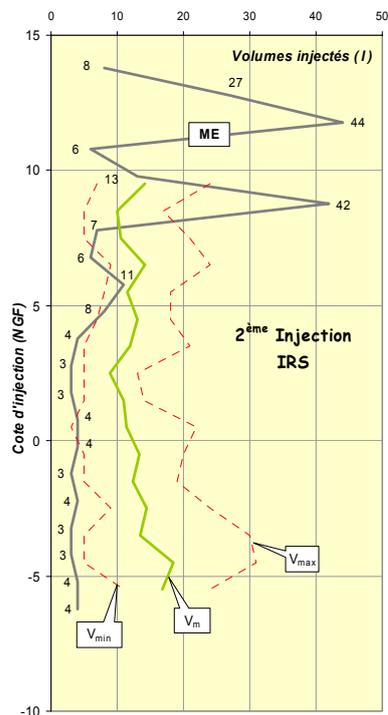


Figure 9. Pile P2. Fourchette des volumes de coulis injectés en 2^{ème} passe en mode IRS pour les pieux longs.

Volumes de coulis : V_m – moyen, V_{max} – maxi., V_{min} – mini.

RÉFÉRENCES

- Bourgeois, E. 2004. *Modélisation de la fondation d'une pile du pont d'Argenteuil à partir de CESAR-LCPC*. Rapport interne du LCPC Mars.
- Bustamante, M. 2004. *Pré-dimensionnement d'une fondation sur micropieux : 2^{ème} pont d'Argenteuil*. Rapport interne du LCPC Février- Août.
- Bustamante, M., Borel, S., Gianceselli, L., Couchard, I., Detandt, H. and Dethy, B. 2002. Foundation Behaviour of a Large HS-Train Viaduct After 4 Years' Operation. *Ninth International Conference on Piling And Deep Foundations*, Nice, 3-5 June, 59-64.
- Bustamante, M., Borel, S. and Gianceselli, L. 2004. An appraisal of the Chin method based on 50 instrumented pile test. *Ground Engineering*, January, Vol.37, number 1, 22-26.
- De Justo, J-L. 2004. *Modélisation de la fondation d'une pile du pont d'Argenteuil à partir de PLAXIS*. Rapport interne du LCPC Mars.
- Masclès, S. 2004. Relevé des paramètres des injections de scellement des micropieux. 2^{ème} Pont d'Argenteuil. Rapport interne du LCPC Octobre.