

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.



INTERPRETATION D'ESSAIS DE PIEUX SOUS CHARGES LATÉRALES INTERPRETATION OF TESTS ON LATERALLY LOADED PILES

E. Degny¹ R. Frank² T. Hadjadji³

¹Docteur-ingénieur, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, France

²Directeur, CERMES (ENPC/LCPC), Noisy-le-Grand, France

³Ingénieur-chercheur, LCPC, Paris, France

Résumé: Sur le site de Plancoët, des essais cycliques de courte durée et des essais statiques, courte durée et longue durée, ont été conduits à la fois sur un pieu isolé et sur un groupe de six pieux. L'interprétation a permis de proposer de nouvelles règles pour le calcul des pieux à partir de la méthode pressiométrique, vis à vis des charges de longue durée. L'effet de groupe a aussi pu être pris en compte par des calculs simples aux modules de réaction.

INTRODUCTION

Les Laboratoires des Ponts et Chaussées, en collaboration avec l'Institut Français du Pétrole, ont réalisé sur le site de Plancoët (Côtes d'Armor, France), un programme d'essais de chargement horizontaux cycliques de courte durée, et statiques, de courte et longue durées, sur des pieux métalliques battus. Ces essais ont porté sur un groupe de 6 pieux répartis sur deux files et sur un pieu isolé de référence, voisin du groupe (Baguelin et al., 1985, Meimon et al., 1986 et Baguelin et al., 1989).

L'ensemble des résultats des essais statiques de longue durée effectués sur le pieu isolé ont été utilisés pour évaluer les principales méthodes de calcul existantes. En particulier, la méthode pressiométrique (Ménard et al., 1969) utilisée dans les LPC, a été appliquée à partir des résultats d'essais pressiométriques M1 réalisés après le battage du pieu isolé. Ce sont les résultats d'essais pressiométriques M2, réalisés avant tout battage, qui sont utilisés ici pour confronter la méthode pressiométrique à l'ensemble des résultats des essais statiques de longue durée. Ces résultats expérimentaux sont par ailleurs exploités pour prévoir le comportement du pieu isolé soumis à une charge horizontale de longue durée.

Le groupe de 6 pieux a été soumis aux mêmes types d'essais que le pieu isolé dans le but d'étudier "l'effet de groupe". Les résultats des essais ont été interprétés pour quantifier cet effet par comparaison avec le comportement du pieu isolé. La méthode pressiométrique est alors adaptée afin de prendre en compte l'effet de groupe dans des calculs simples aux modules de réaction dans le logiciel GOUPIL de calcul des groupes de pieux (Degny et Romagny, 1989).

LE SITE ET LES PIEUX

La figure 1 présente l'implantation du groupe de pieux par rapport au pieu isolé, le massif de réaction et l'emplacement des essais pressiométriques Ménard: le profil pressiométrique M1 a été réalisé à 1m du pieu isolé après son battage tandis que le profil pressiométrique M2 l'a été à 1m du groupe de pieux avant sa mise en place.

Les deux coupes géotechniques sont pratiquement identiques: il s'agit de bicouches constituées d'une première couche de 4m d'argile peu

plastique surmontant une couche de 4m de sable limoneux et de sable fin et graviers.

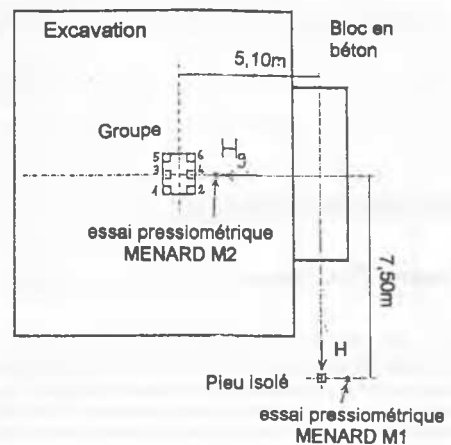


Fig. 1. Plan général du site expérimental (d'après Meimon et al., 1986)

Les pieux sont constitués de poutrelles en H sur lesquelles ont été collées des jauges de contraintes pour la mesure des moments fléchissants, puis obturées par des plaques latérales soudées. Les 6 pieux du groupe sont articulés dans un chevêtre rigide. Les déplacements horizontaux des pieux au niveau du point d'application de la charge horizontale, sont déduits de la lecture de comparateurs électriques situés au-dessus de cette charge. Cette dernière est appliquée au niveau du terrain naturel, soit à un mètre au-dessus du fond de fouille, au moyen d'un vérin à double effet prenant appui sur le massif de réaction. Les efforts repris en tête, pour chacun des 6 pieux, sont déduits des jauges de contraintes situées hors du sol. Pour des raisons de symétrie, seuls les pieux 1, 2, 3 et 4 sont instrumentés tout le long du fût. Les pieux 5 et 6 ne comportent des jauges de surface que dans leur partie hors sol (Jézéquel, 1984, Jézéquel et Saintilan, 1986).

Le programme de chargement (tableau 1) comporte des essais statiques de longue durée (charges statiques maintenues 40 jours) et des essais de sollicitations cycliques non alternées de période 14 secondes simulant l'effet de la houle sur les plateformes offshore (jusqu'à 10 000 cycles). Par ailleurs, le programme de chargement du pieu isolé a été complété ultérieurement par 5 essais statiques de courte et longue durées à des niveaux de charge plus élevés.

part extrapolées logarithmiquement d'un chargement cyclique de durée équivalente, et dont la charge haute correspond à la charge horizontale de longue durée. Il en ressort que maintenir une charge constante est plus nocif que de faire des cycles. On constate en moyenne que les déplacements dus au maintien de la charge dans le temps sont 50% plus élevés que ceux produits par le chargement cyclique.

Tableau 1. Programme de chargement horizontal du groupe de pieux et du pieu isolé de Plancoët.

Type de l'essai	Nom de l'essai	Groupe de pieux				Pieu isolé (*)			
		Délai observé après la fin de l'essai précédent (jours)	Durée de l'essai (heures)	Nombre de cycles N	Charge horizontale H_g (kN)	Délai observé après la fin de l'essai précédent (jours)	Durée de l'essai (heures)	Nombre de cycles N	Charge horizontale H (kN)
Statique courte durée	SH-1	1 ^{er} essai réalisé 15 jours après le battage du groupe	8 (4 paliers de 2 heures)	-	0 - 120	1 ^{er} essai réalisé 9 mois après le battage du pieu	8 (4 paliers de 2 heures)	-	0 - 20
Statique longue durée	SH-1	-	960 (40 jours)	-	120	-	1106 (46 jours)	-	20
Cyclique	CH1-1	16	4	1000	40 - 80	108	4	1000	6,7 - 13,3
Cyclique	CH2-1	25	39	10.000	40 - 120	4	37	9500	6,7 - 20
Cyclique	CH1-2	1	4	1000	40 - 80	2	4	1000	6,7 - 13,3
Statique courte durée	SH-2	5	6 (6 paliers de 1 heure)	-	0 - 160	1	12 (6 paliers de 2 heures)	-	0 - 26,6
Statique longue durée	SH-2	-	816 (34 jours)	-	160	-	1008 (42 jours)	-	26,6
Cyclique	CH1-3	2	39	10.000	40 - 80	89	39	10.000	6,7 - 13,3
Cyclique	CH2-2	5	39	10.000	40 - 120	7	39	10.000	6,7 - 20

(*) le pieu isolé a été ultérieurement soumis à des essais statiques de courte durée (C.D.) et de longue durée (L.D.) :

essai SH-3 (C.D.), essai SH-4 (C.D. et L.D. à H=30kN durant 54 jours), essai SH-5 (C.D. et L.D. à H=40kN durant 40 jours), essai SH-6 (C.D.) et essai SH-7 (C.D. et L.D. à H=60kN durant 93 jours).

COMPORTEMENT DU PIEU ISOLÉ

Effet du Temps et Effet Cyclique

Pour chaque essai statique de longue durée, les diverses mesures de déplacement horizontal y_0 (au niveau du point d'application de la charge) ainsi que celles du moment fléchissant maximal M_{max} ont été approximées par des lois logarithmiques permettant d'en extrapoler les valeurs correspondantes à 10 ans. L'histoire du chargement horizontal du pieu est intégrée dans les mesures de déplacement horizontal y_0 du pieu, toutes ces valeurs ont été comptées depuis la position du pieu qu'il avait à l'issue du battage grâce aux comparateurs qui ont été laissés en place tout au long de l'expérimentation. Pour les moments fléchissants, il s'agit par contre de mesures relatives au début de l'essai considéré à cause des problèmes liés aux dérives des jauges de contraintes dans le temps.

L'analyse des courbes optimisées sur tous les niveaux de chargement conduit à proposer en moyenne:

$$y_0 (T=10 \text{ ans}) = 1,3 \cdot y_0 (T=0) \text{ et}$$

$$M_{max} (T=10 \text{ ans}) = 1,1 \cdot M_{max} (T=0); \quad (1)$$

ce qui montre que l'accroissement dans le temps de y_0 et M_{max} reste faible.

Il a aussi été possible de comparer les déplacements horizontaux y_0 produits d'une part par une charge horizontale de longue durée et d'autre

Prévision du Comportement

Les résultats d'essais pressiométriques Ménard M2 (fig.1) ont servi à construire les courbes de réaction Ménard le long de la profondeur de sol intéressant le pieu isolé. Ces courbes de réaction sont constituées d'un premier segment dont la pente correspond au module de réaction $E_s = P/y$ et limité à la réaction de fluage P_f puis d'un deuxième segment de pente $E_s/2$ atteignant le palier plastique défini par la réaction limite P_l .

La méthode pressiométrique Ménard a été confrontée aux résultats expérimentaux de l'essai statique de longue durée SH-7 présentés aux figures 2 et 3. Au cours de cet essai, le pieu a été soumis à la plus élevée des charges de longue durée ($H = 60$ kN) pendant la plus importante durée de maintien de la charge ($T = 93$ jours). Tant les déplacements que les moments mesurés ou calculés sont relatifs au début de l'essai, et ne prennent donc pas en compte les déformations résiduelles. Il ressort des figures 2 et 3 qu'un calage sécuritaire de la méthode Ménard s'obtient en limitant les courbes de réaction $P-y$ à la réaction de fluage.

Afin d'intégrer l'histoire du chargement horizontal du pieu isolé - ce qui doit être la vocation d'une méthode de prévision - la méthode pressiométrique Ménard a alors été confrontée aux extrapolations des valeurs absolues du déplacement horizontal y_{10} du pieu au niveau du fond de fouille de l'ensemble des essais de longue durée. Il s'est avéré nécessaire de réduire à un tiers le module de réaction E_s (on a utilisé $E_s/3$) des courbes de réaction toujours limitées à la réaction de fluage (fig. 4).

Ceci constitue une diminution importante du module de réaction. Elle correspond au cas d'un pieu battu soumis à des conditions très sévères d'utilisation eu égard au programme de chargement et au soin apporté aux essais pressiométriques Ménard (limitation du remaniement dû au forage). Le fait d'utiliser les résultats d'essais pressiométriques après battage du pieu isolé (Baguelin et al., 1989) conduit aussi à une bonne approximation des déplacements horizontaux y_{10} extrapolés à 10 ans (fig.4) puisque les courbes de réaction qui en sont déduites intègrent l'effet important du remaniement du sol causé par le battage du pieu.

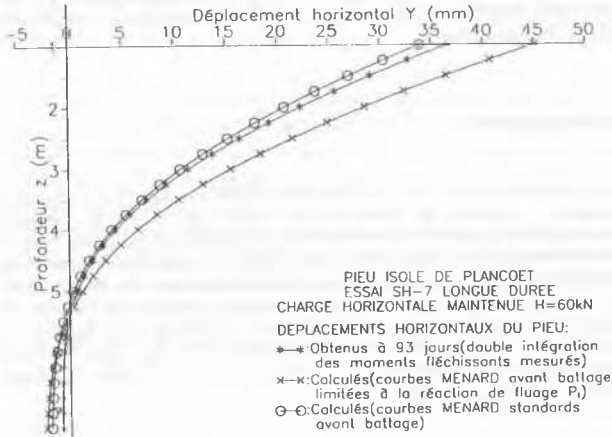


Fig. 2. Comparaison entre les déplacements

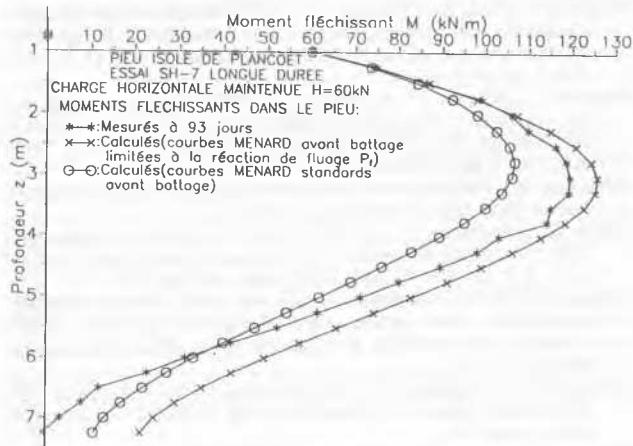


Fig 3. Comparaison entre les moments

EFFET DE GROUPE

L'exploitation des résultats d'essais pour les trois types de charges montre que les pieux de la file arrière reprennent moins d'effort en tête que ceux de la file avant (effet d'ombre). Dans une même file, les pieux situés dans l'axe du chargement sont moins sollicités (effet de voûte). Par ailleurs, les pieux de la file arrière subissent des moments fléchissants maximaux moins importants que ceux des pieux de la file avant. Ces derniers ont tendance à avoir un déplacement horizontal un peu moins important au niveau du fond de fouille (tableau 2).

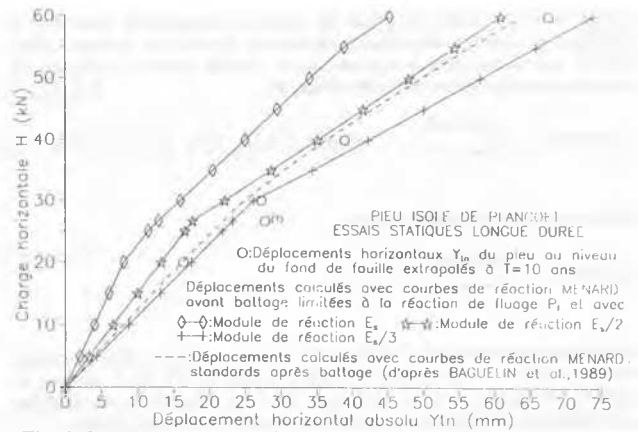


Fig. 4. Confrontation de la méthode pressiométrique Ménard aux valeurs absolues extrapolées à 10 ans du déplacement horizontal y_{10} du pieu au niveau du fond de fouille.

Tableau 2. Comparaison entre les réponses des pieux du groupe et celle du pieu isolé : exemple de l'essai statique de courte durée SH-1.

	Groupe de Plancoët: charge $H_g=120\text{kN}$, essai statique de courte durée SH-1						Pieu isolé de Plancoët (essai statique de courte durée SH-1)
	Pieu n°1 file avant	Pieu n°2 file arrière	Pieu n°3 file avant	Pieu n°4 file arrière	Pieu n°5 file avant	Pieu n°6 file arrière	
Charge horizontale en tête (kN)	24,2	19	21,9	16,4	22,7	17,7	20
Déplacement horizontal y_{10} (kN) au niveau du fond de fouille	15,62	15,73	15,32	15,84			9,22
Moment fléchissant maximal M_{max} (kN.m)	44,8	41,4	41,6	38,3			26,7

Les réactions de sol apparaissent globalement plus réduites sur la file arrière que sur la file avant; elles sont systématiquement plus faibles que celles agissant sur le pieu isolé, notamment dans les premiers mètres de sol. Pour un niveau de charge équivalent, le pieu isolé se déplace systématiquement moins que les pieux du groupe (tableau 2). Ces phénomènes sont d'autant plus marqués que la charge horizontale est élevée.

Comme dans le cas du pieu isolé, la comparaison des déplacements horizontaux du chevron dus à une charge horizontale statique de longue durée d'une part et extrapolés logarithmiquement à partir d'un chargement cyclique de durée équivalente et dont la charge haute correspond à la charge de longue durée, montre là aussi, que le maintien de la charge statique est plus pénalisant. On constate en moyenne que les déplacements dus au maintien de la charge dans le temps sont 45% plus élevés que ceux produits par le chargement cyclique.

La comparaison entre les modules de réaction sécants $E_S = P/y$ déduites des courbes de réaction "mesurées" (en fait établies à partir des mesures de moments fléchissants par double dérivation pour obtenir la réaction P et par double intégration pour calculer le déplacement y), aussi bien pour

le pieu isolé que pour les pieux du groupe, a permis de quantifier la réduction du module de réaction sécant due à l'effet de groupe. Ainsi, dans le cas d'une charge horizontale de courte durée on aboutit en moyenne pour les pieux de la file arrière à :

$$E_s^{\text{file arrière}} = \frac{E_s^{\text{pieu isolé}}}{5} \quad (2)$$

et pour les pieux de la file avant à :

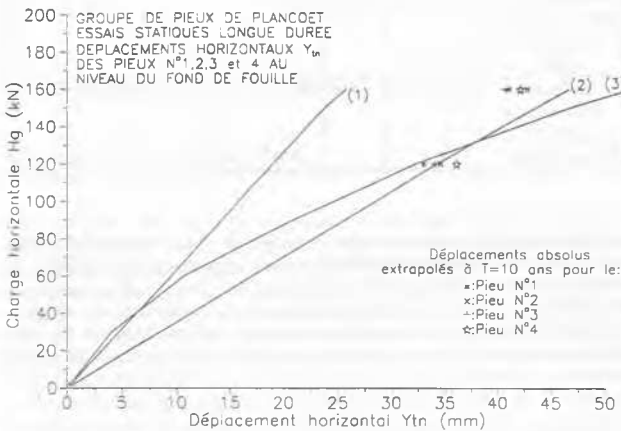
$$E_s^{\text{file avant}} = \frac{E_s^{\text{pieu isolé}}}{4} \quad (3)$$

Rappelons que Davisson (1970) préconise pour une géométrie de groupe comme celle de Plancoët, une réduction unique de 75 % du module de réaction par rapport au pieu isolé pour obtenir le module de réaction d'un pieu du groupe, indépendamment de sa position au sein du groupe.

Comme ce qui a été fait avec le pieu isolé, les évolutions au cours du temps des déplacements horizontaux y_{10} des pieux au niveau du fond de fouille pour les deux essais statiques de longue durée (SH-1 et SH-2) réalisés sur le groupe, ont été approximées par des lois logarithmiques pour en extrapoler les valeurs absolues correspondant à une durée de maintien de la charge horizontale de $T = 10$ ans.

Les courbes de réaction Ménard construites sur la base des résultats pressiométriques M2 ont été alors adaptées pour prendre en compte les effets de groupe dans le cas d'un chargement de longue durée. Les courbes de réaction ont été modifiées respectivement pour les pieux de la file arrière et de la file avant, de telle sorte que, utilisées dans le logiciel Goupil de calcul d'un groupe de pieux, on obtienne un bon calage par rapport aux valeurs extrapolées à $T=10$ ans des déplacements horizontaux des pieux au niveau du fond de fouille (fig. 5). Cette démarche a nécessité la réduction du module de réaction E_s des courbes de réaction dans les proportions suivantes :

$$E_s^{\text{file arrière}} = \frac{E_s^{\text{pieu isolé}}}{7} \quad \text{et} \quad E_s^{\text{file avant}} = \frac{E_s^{\text{pieu isolé}}}{5} \quad (4)$$



Courbe n°1: courbes de réaction MENARD avec $E_s/3$ pour les deux files de pieux

Courbe n°2: courbes de réaction MENARD avec $E_s/5$ pour la file avant et $E_s/7$ pour la file arrière (calcul longue durée à 10 ans)

Courbe n°3: selon la méthode de POULOS et DAVIS (1980) [utilisation des valeurs du module d'Young du sol données par BAGUELIN et al. (1989)].

Fig.5. Confrontation de méthodes pressiométriques Ménard modifiées et de la méthode élastique aux valeurs absolues extrapolées à 10 ans des déplacements horizontaux y_{10} des pieux du groupe au niveau du fond de fouille.

L'adaptation de la méthode pressiométrique au cas des charges de longues durées, a conduit pour le pieu isolé, à diviser par 3 le module de réaction Ménard ($E_s/3$). On peut alors constater que la réduction du module de réaction sécant due à l'effet de groupe lors d'un chargement de longue durée est pour la file avant de 2,33 (7/3) et de 1,67 (5/3) pour la file arrière. Ces réductions sont à comparer à celles de 5 et 4 obtenues respectivement pour la file avant et arrière pour une charge de courte durée.

Le calcul de l'effet de groupe selon la méthode élastique (Poulos et Davis, 1980), en utilisant les valeurs du module d'Young du sol (considéré comme constant avec la profondeur), obtenus selon un calcul élastique à rebours à partir des résultats du pieu isolé (Baguelin et al., 1989), conduit à une bonne approximation des déplacements à 10 ans avec toute fois une surestimation des déplacements pour le deuxième niveau de charge (fig. 5).

CONCLUSION

L'expérimentation du site de Plancoët réalisée sur des pieux de vraie grandeur, a permis de proposer des modifications de la méthode pressiométrique quant à la prévision du comportement des pieux dans le cas des charges horizontales de longue durée. Il a été aussi possible de quantifier l'effet de groupe à la fois pour des chargements de courte durée et de longue durée. Les réductions proposées ici pour le module de réaction Ménard doivent être confrontées à d'autres programmes de chargement de pieux, afin d'évaluer l'influence du site (type de sols), mais aussi de la configuration du groupe de pieux (mise en place, nombre de pieux, espacement...).

REFERENCES

- Baguelin, F., Frank, R. et Jézéquel, J.F. (1989). Interprétations d'essais de chargement latéral d'un pieu isolé, *CR du 12ème Cong. Int. de Méca. des Sols et des Trav. de Fond*, Rio-de-Janeiro, Brazil, 13-18 août, Vol. 2, pp. 1117-1118.
- Baguelin, F., Jézéquel, J.F. et Meimon, Y. (1985). Chargements latéraux sur un groupe de pieux, *CR du 11ème Cong. Int. de Méca. des Sols et des Trav. de Fond*, San Francisco, Californie (Etats-Unis), 12-16 août, Vol. 3, pp. 1587-1588.
- Davisson, M.T. (1970). Lateral load capacity of piles, *Highway Research Record* (Etats-Unis), No 333, pp. 104-112.
- Degny, E. et Romagny, J.C. (1989). Calcul des efforts et déplacements dans les groupes de pieux : le programme Goupil, *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, No 162, Réf. 3405, juillet-août, pp. 3-12.
- Jézéquel, J.F. (1984). Résistance latérale des pieux. Site de Plancoët : groupe de 6 pieux (groupe Abis), *Rapport de Recherche FAER 1.05.01.3, Groupe Méca. des Sols-Ouvrages d'Art*, LR de Saint-Brieuc, déc., 55 p.
- Jézéquel, J.F. et Saintilan, D. (1986). Résistance latérale des pieux. Site de Plancoët, *Rapport de Recherche FAER 1.05.01.5*, LR de Saint-Brieuc, août, 55 p.
- Meimon, Y., Baguelin, F. et Jézéquel, J.F. (1986). Pile group behaviour under long time lateral monotonic and cyclic loading, *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Num. Methods in Offshore Piling*, Nantes, France, May 21-22, pp. 285-302, Technip Editor.
- Ménard, L., Bourdon, G. et Gambin, M. (1969). Méthode générale de calcul d'un rideau ou d'un pieu sollicité horizontalement en fonction des résultats pressiométriques, *Sols-Soils*, N° 22-23, Vol. VI, pp. 16-29.
- Poulos, H.G. et Davis, E.H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley and Sons, New-York, 397 p.