

# 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.*

# Action du Déplacement Latéral du Sol sur un Pieu

## Action of Lateral Soil Movement on a Pile

G.BIGOT            Ingénieur, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de l'Est Parisien, Melun,  
 F.BOURGES        Ingénieur,  
 R.FRANK           Ingénieur,  
 Y.GUEGAN         Ingénieur, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

**RESUME** - On relate les mesures effectuées sur un pieu expérimental métallique tubulaire traversant une couche épaisse de limons tourbeux, surmontant la craie dans laquelle il est fiché. Le pieu est d'abord soumis à une sollicitation horizontale en tête. Ensuite, libre en tête, il subit l'action d'un remblai élevé sur la couche compressible, dont on a mesuré les déplacements latéraux. A partir des résultats expérimentaux, on étudie la possibilité d'utiliser des courbes pressiométriques comme courbes de réaction pour la prévision du phénomène.

### INTRODUCTION

Dans certains types de structures fondées sur pieux (culées de pont avec remblai d'accès reposant sur des couches compressibles, par exemple), ceux-ci sont soumis à des poussées dues au déplacement latéral de la couche molle. Les efforts ainsi engendrés peuvent être importants et mettre en péril les fondations de l'ouvrage. Des méthodes d'évaluation de ces efforts ont été proposées (TSCHEBOTARIOFF, 1970, DE BEER et WALLAYS, 1972). Elles sont en général empiriques et ne tiennent pas compte du phénomène réel qui fait intervenir, en particulier, le déplacement relatif entre le sol et le pieu et la rigidité relative sol-pieu. L'expérience rapportée ici a pour but d'analyser de telles sollicitations, en vue de mieux connaître le phénomène dans un but de prévision.

L'étude a été menée sur un pieu métallique tubulaire placé au pied du talus d'un remblai construit sur une couche tourbeuse compressible (Fig. 1). Le site expérimental se trouve près de PROVINS (Seine-et-Marne). Le principe de l'expérimentation est classique : des jauges de déformation, placées sur les génératrices tendue et comprimée du plan moyen, donnent les déformations  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$ . On en tire directement le moment fléchissant

$$M = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \frac{EI}{R} \quad (1)$$

(R : rayon du pieu).

Par ailleurs, si  $y(z)$  est le déplacement horizontal du pieu en fonction de la profondeur, on a :

$$y'' = \frac{M}{EI} \quad (2)$$

La double intégration de cette expression permet de calculer  $y'(z)$  et  $y(z)$  avec comme constantes d'intégration la rotation  $y'_0$  et le déplacement  $y_0$  en tête, lesquels sont mesurés. Par dérivation de l'expression (2), on obtient l'effort tranchant T, puis la réaction globale p définie par :

$$P = - \frac{1}{2R} \frac{dT}{dz} \quad (3)$$

On a, par ailleurs, mesuré au moyen d'inclinomètres, le déplacement horizontal du sol  $g(z)$  en pied de talus.

### I - DONNEES EXPERIMENTALES (fig. 1)

#### a - Le sous-sol

En profondeur, à partir du terrain naturel, on rencontre les couches suivantes :

- de 0 à 4 m : limon vasard surconsolidé en surface. La nappe oscille dans cette couche entre 0 et 2 m de profondeur suivant les saisons.
- de 4 à 15 m : couche hétérogène allant du limon tourbeux à la tourbe presque pure.
- de 15 à 17 m : sables et graviers.
- à partir de 17 m : craie, altérée sur les premiers mètres.

Plusieurs essais pressiométriques ont été effectués sur le site. On a indiqué les résultats de l'un de ces essais (module  $E_p$  et pression limite  $p_1$ ) sur la figure 1.

#### b - Le remblai

Le remblai a été monté progressivement jusqu'à 7 m entre le 31 mai et le 30 juillet 1974. Le coefficient de sécurité minimum (calculé par la méthode des tranches de BISHOP), se situe aux environs de 2 (valeur correspondant à la fin du chargement).

#### c - Le pieu

Il s'agit d'un tube métallique visitable dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Ø intérieur : 89,6 cm
- épaisseur moyenne : 1,5 cm
- longueur : 24 m
- moment d'inertie :  $I = 456\ 000\ \text{cm}^4$
- module de l'acier :  $E = 2.10^8\ \text{kPa}$

Ce pieu a été mis en place par vibro-fonçage puis curage intérieur. Un bouchon de béton de 2,50 m a été coulé à la base.

#### d - Calendrier de l'expérimentation

- novembre 1973 : mise en place du pieu.

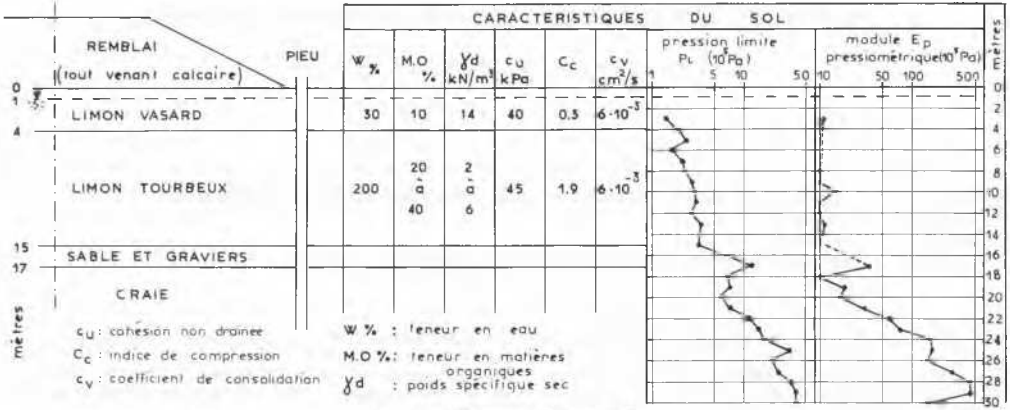


Fig. 1 - Site expérimental

- novembre 1973 - avril 1974 : délai de repos nécessaire pour que le sol revienne à un état stable.
- 30 avril 1974 : essai de sollicitation horizontale : charge de 120 kN appliquée en tête par paliers.
- 31 mai 1974 - 1er octobre 1974 : étude du comportement du pieu sous les seules sollicitations dues au remblai :
  - 31.5.74 au 30.7.74 : mise en place du remblai de 7 m de hauteur ;
  - 30.7.74 au 1.10.74 : observations du comportement du pieu, le remblai restant à hauteur constante.

Notation des courbes	Date	Hauteur de remblai mis en place en m	Tassement cumulé du sous-sol en m
T	30.4.74	-	-
a	11.7.74	3,60	0,34
b	18.7.74	3,80	0,56
c	30.7.74	7,00	1,00
d	20.8.74	7,00	1,46
e	1.10.74	7,00	1,76

TABLEAU I

II - MESURES ET RESULTATS

On a effectué essentiellement dans le sol des mesures de déplacement latéral avec un inclinomètre descendu dans des tubes souples placés suffisamment loin du pieu pour éviter l'influence de ce dernier sur le déplacement du sol. Des mesures optiques donnent le déplacement des tubes en surface. On obtient ainsi la courbe de déplacement du sol  $g(z)$  en fonction de la profondeur, indépendante du pieu.

Pour le pieu, les jauges de déformations sont placées tous les mètres. Le déplacement  $y_0$  et la rotation  $y'_0$  en tête sont obtenus respectivement par visée optique et mesure par clinomètre (type niveau à bulle).

Les résultats sont présentés sous forme de courbes donnant la variation de différents paramètres en fonction de la profondeur  $z$ . Les courbes sont notées T (pour la charge de 120 kN en tête) et a, b, c, d, e (pour les différentes étapes de chargement, par le sol, du pieu libre en tête) (Tableau I).

La figure 2 donne les déplacements  $g$  du sol en pied du remblai et loin du pieu. La figure 3 donne les courbes de déplacement  $y$  du pieu, de moment  $M$  et de réaction globale  $p$ .

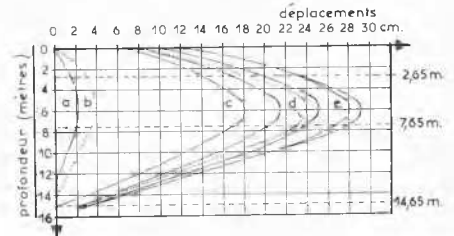


Fig. 2 - Déplacements latéraux du sol à différentes étapes

III - INTERPRETATION UTILISANT LES COURBES PRESSIOMETRIQUES

a. Hypothèses et méthode

La notion de module de réaction est, en l'état actuel des connaissances, une notion commode pour l'étude théorique des pieux soumis à des efforts de flexion en tête. Elle peut être étendue au cas des pieux soumis à l'action du déplacement du sol de fondation sous un remblai, en prenant en compte la différence de déplacement  $\Delta y = y - g$  au lieu du déplacement d'équilibre de l'ensemble sol-pieu,  $y$  (MARCHE, 1973). Dans le cas de l'utilisation de courbes de réaction, l'équation de base devient, plus généralement :

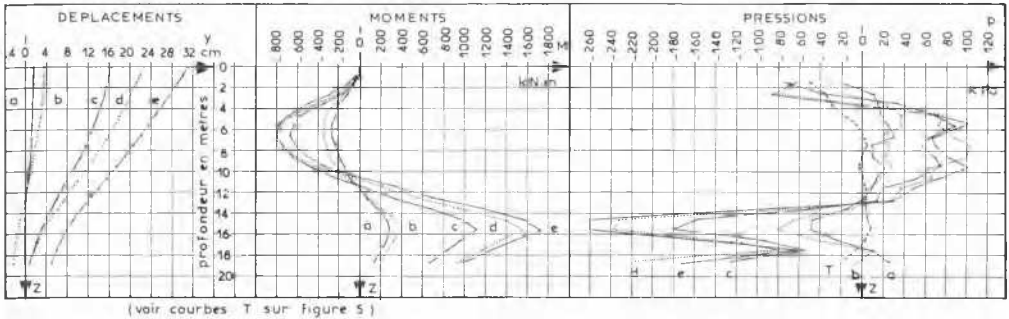


Fig. 3 - Déplacements, moments et pressions déterminés expérimentalement

$$EI y^{(4)} + E_s(z, \Delta y) \cdot \Delta y = 0 \quad (4)$$

$E_s$  module horizontal du sol, dépendant de la profondeur  $z$  et du niveau de chargement (loi non linéaire) est donné par les pentes des sécantes de la courbe de réaction à la cote considérée (fig.4) (BAGUELIN, FRANK, GUEGAN, 1976).

La solution numérique de ce problème utilise une solution analytique dans chaque couche de sol où l'on peut considérer la loi de réaction comme unique et où l'on peut exprimer la fonction  $g(z)$  en polynôme de degré inférieur ou égal à 3. La continuité aux inter-couches ainsi que les conditions aux limites permettent de calculer les constantes d'intégration. La non linéarité de la loi de réaction nécessite, de plus, un processus itératif.

La seule difficulté de la méthode pour le dimensionnement est, évidemment, la prévision des déplacements latéraux du sol  $g(z)$  ainsi que des courbes de réaction. Le but ici de cette exploitation numérique, où l'on connaît les déplacements du sol  $g(z)$  (voir figure 2) est de tester la validité de l'utilisation directe des courbes pressiométriques ( $p, u/R$ ) ( $p$  : pression dans la sonde,  $u/R$  : dilatation circonférentielle) comme courbes de réaction. La comparaison des courbes pressiométriques et des courbes de réaction pour le cas d'efforts horizontaux en tête, a été étudiée par BAGUELIN et JEZEQUEL (1972). L'utilisation des courbes pressiométriques repose sur l'analogie entre la sollicitation d'expansion cylindrique et celle intervenant pour un pieu sollicité horizontalement.

Les courbes pressiométriques utilisées ici sont celles données par le pressiomètre MENARD, tous les mètres. Pour tenir compte de l'effet de surface, on a pris une profondeur  $z_c = 2 B$  sur laquelle on a appliqué le coefficient réducteur sur les pressions de MENARD :  $(1 + z/z_c) / 2$ . On a pu, de plus, grâce aux mesures expérimentales, tenir compte du décollement sur la face arrière du pieu en réduisant les modules de 30 % (valeur déterminée sur un modèle d'éléments finis bidimensionnel).

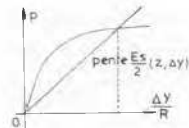


Fig. 4 - Courbe de réaction : pression-déplacement à la profondeur  $z$

#### b. Résultats et analyse

La comparaison des résultats théoriques et des mesures expérimentales est résumée par la figure 5 pour la sollicitation horizontale en tête et pour la sollicitation due au remblai. Cette comparaison montre que l'utilisation des courbes pressiométriques est satisfaisante compte tenu de la simplicité de la méthode vis-à-vis de la complexité du problème. Elle donne des résultats du même ordre de grandeur que ceux effectivement mesurés.

En ce qui concerne la sollicitation en tête l'accord sur les moments est très bon. Quant aux déplacements en tête, la valeur expérimentale directement mesurée correspond bien à celle calculée. L'écart se produisant en profondeur est probablement dû à l'imprécision des mesures (en particulier rotation en tête). Les résultats concernant l'action du remblai montrent, d'une part que les valeurs des déplacements sont données à 10 % près, d'autre part que, pour les moments, la méthode est pessimiste en tête et plutôt optimiste en pied. Une explication possible est la suivante : en tête la mise en place du pieu aurait provoqué un fort remaniement du sol, plus important que celui induit par la mise en place de la sonde pressiométrique MENARD. En pied, le remaniement serait, par contre, inférieur : les modules donnés par le pressiomètre MENARD semblent donc trop faibles, d'autant plus que les déformations sont petites. En effet, dans cette zone, où l'on n'utilise que la portion initiale des courbes pressiométriques ou de réaction, le pressiomètre autoforeur de BAGUELIN et JEZEQUEL (1973) semble plus adapté, puisque sa mise en place ne provoque ni remaniement ni décompression du sol, en principe.

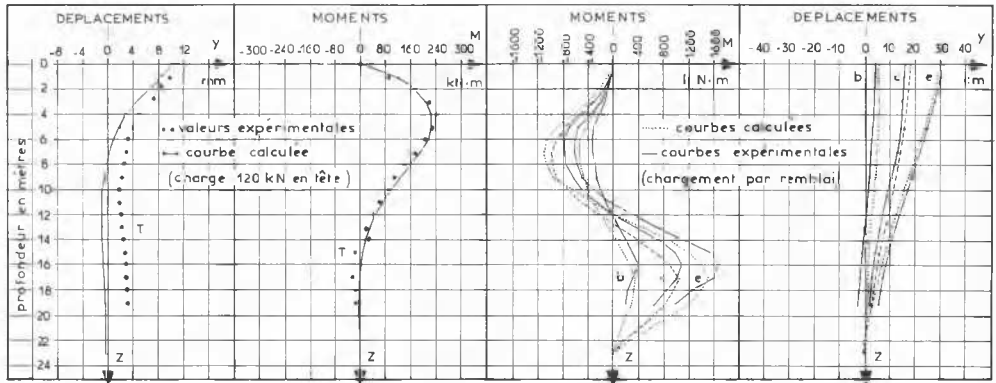


Fig. 5 - Comparaison des moments et des déplacements calculés et mesurés

Ceci est illustré par la figure 6 qui compare à trois niveaux différents les courbes pressiométriques MENARD utilisées pour le calcul et les valeurs de réaction déterminées expérimentalement pour le pieu.

L'influence du remaniement apparaît donc comme un facteur essentiel pour ce type de problèmes comme l'ont déjà souligné BAGUELIN et JEZEQUEL (1972). Son appréciation est malheureusement toujours difficile. Par ailleurs, la méthode suppose que les courbes de réaction sont intrinsèques au sol alors que l'on sait que bien d'autres facteurs interviennent dans l'interaction sol-pieu ; par exemple les conditions de chargement ; par exemple les conditions de chargement et d'encastrement en tête (BAGUELIN, FRANK et SAID, 1976).

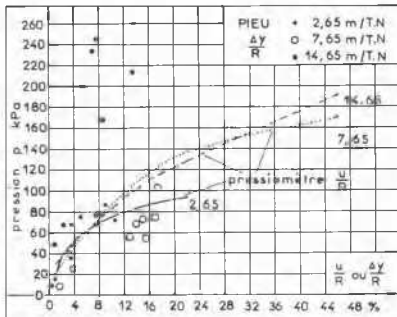


Fig. 6 - Courbes pressiométriques et réactions du pieu

#### CONCLUSION

Les déplacements horizontaux du sol de fondation peuvent induire sur les pieux des efforts parasites importants même lorsque le coefficient de sécurité du remblai est relativement élevé, comme le montre cette expérience où l'acier atteint, dans certaines

phases, sa limite élastique. L'utilisation des courbes pressiométriques comme courbes de réaction semble conduire à une estimation acceptable des efforts et des déplacements. Il reste que, pour la prévision, le déplacement du sol doit être connu et fait actuellement l'objet de recherches.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leurs remerciements à A. FOURNIER et G. RAULT dont la contribution à l'expérimentation a été déterminante, ainsi qu'à J.L. BANGRATZ pour sa participation à l'exploitation des mesures.

#### REFERENCES

- BAGUELIN, F., FRANK, R. et GUEGAN, Y. (1976) "Calcul sur ordinateur des pieux sollicités horizontalement ou subissant des poussées parasites", Bull. Liaison Labo. P. et Ch., n° 84, Paris.
- BAGUELIN, F., FRANK, R. et SAID, Y.H. (1976) "Etude théorique du mécanisme de réaction latérale des pieux", Bull. Liaison Labo. P. et Ch., n° 85, Paris.
- BAGUELIN, F. et JEZEQUEL, J.F. (1972) "Etude expérimentale du comportement de pieux sollicités horizontalement", Annales de l'ITBTP n° 297, Série SF/91, pp. 153-204, Paris.
- BAGUELIN, F. et JEZEQUEL, J.F. (1973) "Le pressiomètre autoforeur", Bull. Liaison Labo. P. et Ch., Supp. n° 67, pp. 9-30, Paris.
- DE BEER, E.E. et WALLAYS, M. (1972) "Forces induced in piles by unsymmetrical surcharges on the soil around the piles", 5th Eur. Conf. on S. Mech. and Found. Eng., Madrid.
- MARCHE, R. (1973) Discussion on "Lateral Pressure of Clayey Soils on Structures", Comptes Rendus 8ème Cong. Int. Méc. Sols Tr. Fond., Moscou, Vol. 4-3, p. 247-252.
- TSCHEBOTARIOFF, G.P. (1970) "Bridge abutments on piles driven through plastic clay", Proc. Conf. Des. Install. Pile Found. Cell. Struct., Lehigh Univ.