

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.



ETUDE EXPERIMENTALE DU TASSEMENT DES FONDATIONS SUPERFICIELLES EXPERIMENTAL STUDY OF THE SETTLEMENT OF SHALLOW FOUNDATIONS

S. Amar¹ F. Baguelin² Y. Canepa³ R. Frank⁴

¹Ingénieur, LCPC, Paris, France

²Directeur Scientifique, TERRASOL, Montreuil, France

³Ingénieur LREP, Melun, France

⁴Directeur, CERMES (ENPC/LCPC), Noisy-le-Grand, France

Résumé. Cet article présente les principaux résultats obtenus expérimentalement par les Laboratoires des Ponts et Chaussées sur le tassement de fondations superficielles sous charges verticales centrées. Quelque 80 essais de chargement réalisés sur 6 sites, représentant 4 natures de sol ont été analysés. Les auteurs proposent une méthode pour l'estimation des tassements de longue durée des fondations superficielles.

INTRODUCTION

Les Laboratoires des Ponts et Chaussées ont réalisé entre 1980 et 1990 une centaine d'essais de chargement de fondations superficielles établies sur sols réels. Ces essais ont été effectués sur 6 sites différents représentant 4 natures de sol.

Les résultats de ces essais ont fait l'objet d'interprétation en terme de pression de rupture essentiellement (Amar et al. 1984, Amar et al. 1987).

L'objet de cet article est de présenter de manière plus détaillée les résultats obtenus concernant les tassements observés sous charge verticale centrée et d'en faire la synthèse. Après avoir rappelé les principales caractéristiques des sols testés et décrit les conditions expérimentales, on donne les résultats typiques observés. Les courbes obtenues sous charge verticale centrée sont analysées.

Une méthode de calcul, faisant appel aux formules classiques de l'élasticité linéaire, est proposée, en calant le module d'Young à utiliser en fonction du module pressiométrique E_M , pour un niveau de chargement q égal à la moitié du chargement de rupture q_r ($q = q_r/2$).

Les résultats pratiques tirés de cette étude sont donnés en conclusion.

La figure 1 donne, par nature de sol, le nombre d'essais de courte durée sous charge verticale centrée. Au total, 80 essais sous charge verticale centrée de courte durée ont été réalisés et 6 de longue durée.

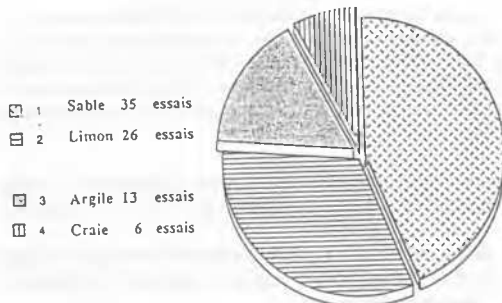


Fig 1. Répartition des essais de courte durée sous charge verticale centrée.

SITES ET CONDITIONS EXPERIMENTALES

Chacun des sites testés a fait l'objet d'une reconnaissance géotechnique détaillée. Les tableaux 1 et 2 récapitulent les principales caractéristiques mesurées sur chacun des sites.

Tous les essais expérimentaux ont été réalisés sur des fondations carrées ou rectangulaires de dimensions de l'ordre du mètre : $0,7 \text{ m} < B < 1,6 \text{ m}$ et $1 < L/B < 3$.

Deux types d'essais ont été effectués : des essais de courte durée (CD) menés jusqu'à la rupture du sol et des essais de fluage, c'est-à-dire sous charge constante et de longue durée (LD).

A chacun de ces types d'essais correspond un dispositif expérimental particulier dont la description a été donnée par Amar et al (1987).

Dans le premier cas, on pratique un chargement progressif de la fondation par paliers jusqu'à la rupture du sol, définie pour des enfoncements de la fondation supérieurs à 10 % de la largeur B de celle-ci ($S > 0,1 B$).

Chaque palier de chargement est maintenu constant jusqu'à la stabilisation des enfoncements ou, à défaut, pendant une durée de 30 mn.

Dans le cas des chargements de longue durée (LD), la charge appliquée Q_{LD} à la fondation a été maintenue constante pendant plusieurs mois, voire des années.

Tableau 1. Identification des sols.

| Site | Nature sol | w | w _L | I _p | γ_d |
|----------------|--------------|----|----------------|----------------|------------|
| PLANCOET (PLA) | Argile molle | 37 | 35 | 16 | 13,0 |
| JOSSIGNY (JOS) | Limon | 22 | 38 | 14 | 16,0 |
| LOGNES (LOG) | Argile raide | 25 | 85 | 52 | 16,0 |
| LABENNE (LAB) | Sable dune | 5 | - | - | 16,0 |
| PROVINS (PRO) | Argile raide | 19 | 94 | 60 | 16,0 |
| CHATENAY (CHA) | Craie | 27 | - | - | 15,5 |

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques des sols.

| SITE | LABORATOIRE | | | IN SITU (kPa) | | | | |
|------|--------------|------|------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----|
| | c_u kPa | c' | φ' | p_1 kPa | E_M kPa | q_c kPa | q_d kPa | N |
| PLA | 46 | 0 | 34 | 280 | 2040 | 500 | 550 | 6 |
| JOS | 38 | 12 | 32 | 510 | 6500 | 2100 | 1900 | 7 |
| LOG | 80 | 0 | 22 | 740 | 12000 | 2500 | 3500 | 16 |
| LAB | - | 0 | 32 | 910 | 8400 | 5600 | 3600 | 15 |
| PRO | 145 | - | - | 1290 | 24500 | - | 5700 | - |
| CHA | - | - | - | 1350 | 19500 | - | 3500 | - |

La figure 2 schématise les deux types de chargement adoptés.

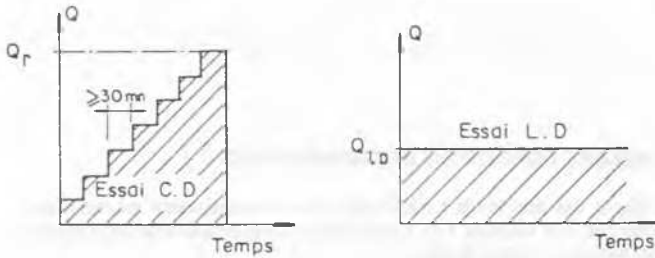


Fig 2. Les différents types de chargement.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Comportement lors des Essais de Courte Durée (CD).

La figure 3 a. montre une courbe de chargement typique, obtenue en faisant croître la charge par paliers d'une durée de 30 mn. ; les tassements sont donnés pour la fin des paliers (S_0). La figure 3b. fournit, pour le même essai, les courbes donnant le tassement de la fondation en fonction du temps, pour chaque palier de chargement.

Lorsque l'on examine la courbe de chargement de la figure 3 a., on constate qu'elle présente une première partie approximativement linéaire ; ensuite, les tassements croissent de plus en plus rapidement pour un même incrément de charge.

Cette courbe ne présente toutefois pas de cassure franche permettant d'avoir, sans ambiguïté, une charge de rupture. On a cependant défini conventionnellement la charge de rupture q_r comme étant la charge correspondant à un tassement de $0,1 B$.

L'examen de la figure 3 b. montre que les tassements de la fondation, sous une charge constante, augmentent linéairement avec le logarithme du temps. Une droite de "stabilisation" est ainsi obtenue pour chaque palier de chargement. La pente de ces droites est notée A_0 et le tassement de référence (celui obtenu en fin de palier) est noté S_0 (30 mn).

Le tableau 3 récapitule, pour l'ensemble des sites, les rapports caractéristiques A_0/S_0 mesurés. Il est remarquable de noter la quasi-stabilité de ce rapport, pour 3 sites sur cinq, quel que soit le niveau de chargement et pour un grand nombre d'essais.

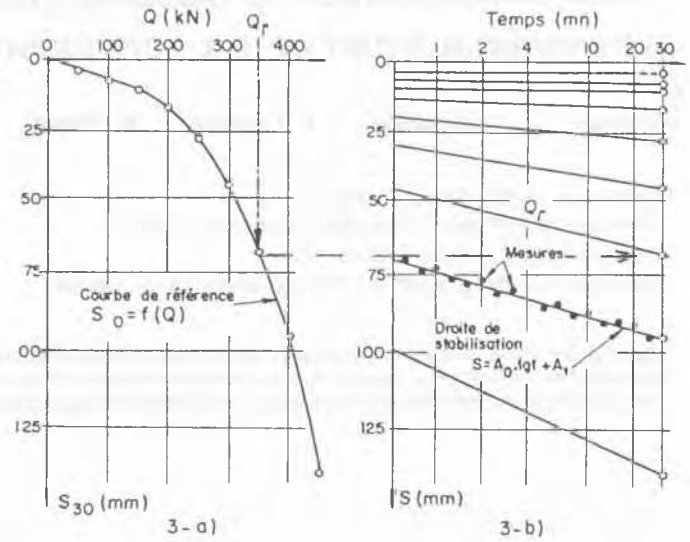


Fig 3. Courbes de tassement du centre géométrique.

Tableau 3. Valeurs des rapports A_0/S_0 .

| Sites | Nature du sol | A_0/S_0 % |
|----------|---------------|----------------|
| JOSSIGNY | Limon | 15 |
| LOGNES | Argile | 15 |
| LABENNE | Sable | 5 |
| PROVINS | Argile | 5 à 20 |
| CHATENAY | Craie | 5 à 20 |

Résultats des Essais sous Charge Constante de Longue Durée (essais LD)

La figure 4 montre pour les 6 essais de longue durée l'évolution des tassements S en fonction du logarithme du temps. On constate que, pour les sites d'argile et de limon (figure 4 a.), pour les domaines de temps expérimentés ($t \approx 500$ à 800 jours), les tassements sont d'abord linéaires avec le logarithme du temps ; on note ensuite une "accélération" du tassement par rapport à cette fonction.

Dans le cas des essais réalisés sur du sable, à Labenne (figure 4 b.), un coude, bien marqué, apparaît entre 1 et 2 ans après l'application de la charge.

Ce phénomène pourrait être imputé à différents facteurs sans que l'on puisse actuellement trancher (variation de la teneur en eau avec les années, loi de calage logarithmique mal choisie, etc.).

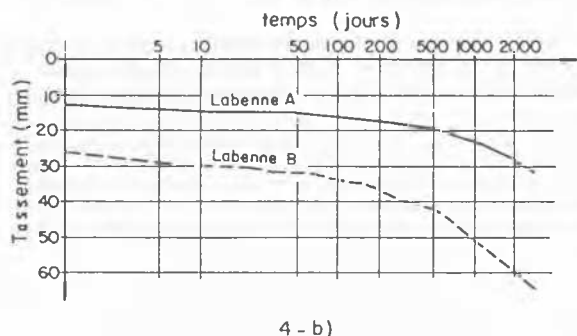
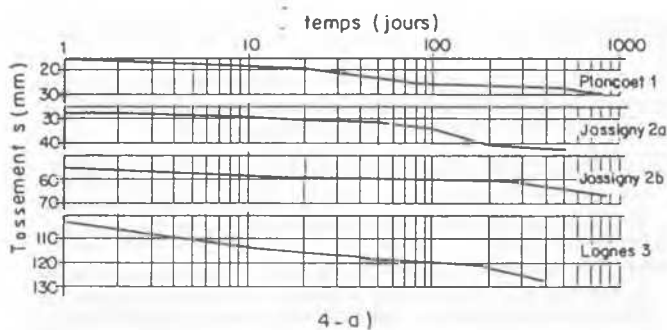


Fig 4. Tassement S en fonction du logarithme du temps.

Analyse des Résultats.

Ont été regroupés sur les figures 5 et 6, respectivement les résultats obtenus sur le site de JOSSIGNY (limon) et sur celui de LABENNE (sable). Sur ces deux figures, sont reportées diverses courbes de chargement avec, en abscisse, le taux de chargement ($x = q/q_r$, %, q_r étant la pression de rupture) et, en ordonnée, le tassement rapporté au tassement à la rupture S_r ($y = S/S_r$, %). Les courbes reportées sont, d'une part, les courbes de chargement des essais courte durée (paliers de 30') sous la forme d'un fuseau et, d'autre part, les courbes extrapolées à 10 ans à partir des droites de stabilisation à 30' des essais CD.

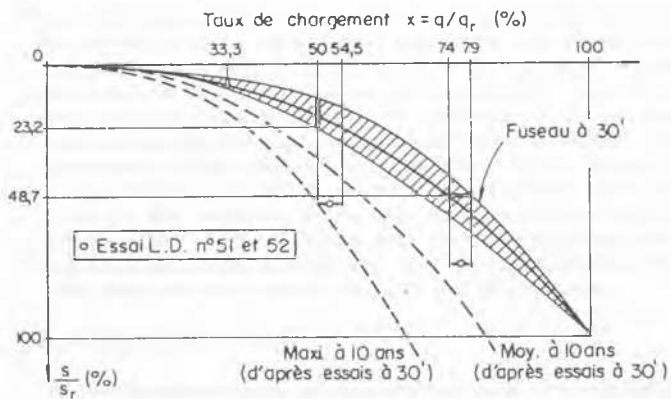


Fig 5. Courbes de chargement du site de Jossigny.

Sur ces mêmes figures ont été reportés les résultats obtenus lors des 2 essais de longue durée (LD) réalisés sur chacun des sites..

Lorsqu'on examine les essais de JOSSIGNY (figure 5) on constate qu'il y a une bonne concordance entre les résultats extrapolés à partir des essais de courte durée (CD) et les valeurs mesurées lors des essais de longue durée (LD).

L'analyse des résultats montre que, pour la plage des efforts expérimentés lors des essais de longue durée (LD) et pour des taux de chargement q/q_r compris entre 50 et 75 %, les rapports entre les tassements à 10 ans et ceux à 30 mn sont de l'ordre de 2 :

$$S_{10\text{ans}} = 2 \cdot S_{30'}$$

Par contre, pour les essais réalisés à LABENNE sur du sable, la figure 6 indique que les mesures lors des essais de longue durée (LD) sont près de deux fois plus forts que ceux obtenus par extrapolation des essais de courte durée (CD).

Pour les taux de chargement expérimentés lors des essais LD, à savoir $q/q_r = 45$ à 60 %, les rapports entre les tassements mesurés à près de 10 ans et ceux à 30 mn sont respectivement :

$$S_{10\text{ans}} = 2,6 S_{30'} \quad (q/q_r = 45 \%)$$

$$S_{10\text{ans}} = 2,9 S_{30'} \quad (q/q_r = 60 \%)$$

Pour pouvoir comparer ces résultats avec ceux obtenus par d'autres auteurs (Burland et al, 1984), l'évolution des tassements obtenus au delà de 3 ans a été schématisée par une fonction du type

$$S = S_3 (1 + m \log t/3)$$

Pour le site de LABENNE les valeurs du coefficient m sont comprises entre 0,6 et 0,7, alors que Burland et al (1984) proposent dans le cas des chargements statiques une valeur de m égale à 0,15 environ.

Ceci n'est vrai que pour une durée supérieure à 3 ans, car en deçà les valeurs du coefficient m tirées des expérimentations présentes sont sensiblement plus faibles que 0,15.

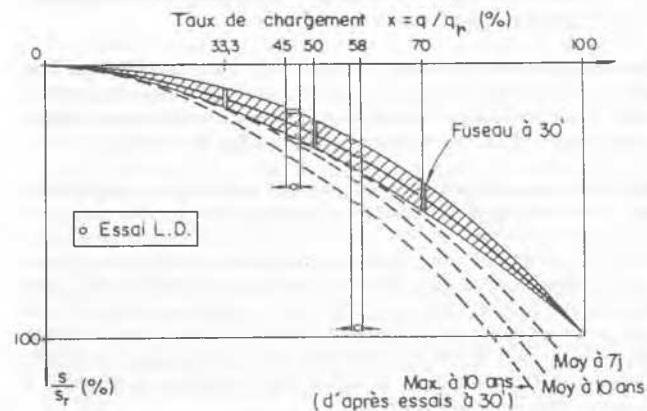


Fig. 6. Courbes de chargement du site de Labenne.

METHODE DE PREVISION PROPOSEE

Les résultats mesurés lors des essais de courte durée avec des paliers de 30 mn, ainsi que les mesures de longue durée, ont été utilisés pour proposer une méthode de prévision.

Cette méthode utilise l'approche élastique linéaire isotrope classique dans laquelle le module d'élasticité est remplacé par le module pressiométrique E_M (pondéré en profondeur suivant les lois d'amortissement des contraintes de Boussinesq).

On peut s'approcher des valeurs mesurées en multipliant les modules E_M par un coefficient α .

Le tableau 4 donne, pour un taux de chargement q/q_c , égal à 0,5 les valeurs de α obtenues pour le limon de Jossigny et le sable de Labenne.

Tableau 4. Valeurs de α . $E = \alpha E_M$

| Nature du sol | Valeur de α pour 30' | Valeur de α pour 10 ans |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Limon | 3 | 1,5 |
| Sable | 3,5 à 3 | 1,3 à 1 |

En pratique on peut retenir les mêmes coefficients α pour les limons et les sables, à savoir $\alpha = 3$ pour les tassements de courte durée et 1,5 pour les tassements de longue durée. Cette dernière valeur, proposée pour les tassements de longue durée pour les sables, revient à négliger une partie des tassements immédiats. Il faut, en effet, remarquer que le calage a été fait sur des mesures de tassements qui comprennent non seulement les tassements différés (de fluage) sur plusieurs années, mais également les tassements immédiats (à 0 minute) et les tassements de courte durée (entre 0 et 30 minutes). Or, le plus souvent, ce sont les tassements différés, après la fin de la construction qu'il est important de bien déterminer pour la bonne tenue de la plupart des ouvrages de génie civil.

Par ailleurs, il est vraisemblable que le tassement différé est relativement important dans le cas des fondations posées sur le sable de Labenne.

CONCLUSIONS

L'analyse des données expérimentales présentées ici permet de tirer des enseignements sur le tassement des fondations superficielles sous charge verticale centrée :

- quelle que soit la nature du sol (sable, limon ou argile) les tassements différés ne peuvent être négligés et il convient de les prendre en compte lorsque l'on dimensionne une fondation superficielle ;

- pour des fondations de diamètre B inférieur à 2 m, il semble que l'on puisse avoir une bonne estimation des tassements de longue durée en utilisant les formules élastiques classiques et en prenant comme valeur du module d'Young 1,5 fois le module pressiométrique E_M : $E = 1,5 E_M$.

Il faut noter que la méthode proposée utilise le module pressiométrique habituel, c'est-à-dire celui déterminé sur la courbe de premier chargement entre les pressions "initiale" et "de fluage" de la courbe pressiométrique standardisée. Ce module est très sensible au remaniement, qui dépend non seulement des conditions de mise en oeuvre de la sonde pressiométrique, mais également du type de sol. La mesure d'un module sur un cycle de déchargement-rechargement incorporé à l'essai serait sans doute préférable (Frank, 1991). Dans ce cas les corrélations proposées ici avec le module d'Young pour l'estimation du tassement des fondations superficielles à long terme, serait évidemment à revoir.

Enfin, il serait souhaitable de mener une analyse analogue à celle-ci sur des ouvrages instrumentés de grandes dimensions, type centrale nucléaire, avant de généraliser ou d'affiner, par nature de sol, la méthode proposée.

REFERENCES

- Amar, S., Baguelin, F., Canépa, Y. (1984) Etudes expérimentales du comportement des fondations superficielles. Annales de l'ITBTP, (F) N° 427 Série Sols et Fondations 189 sept. 1984 pp. 82-109.
- Amar, S., Baguelin, F., Canépa, Y. (1987) Comportement des fondations superficielles sous différents cas de chargement. Actes du Colloque Interactions Sols Structures, Paris, Presses de l'ENPC, pp. 15-22.
- Burland, J.B., Burbidge, M.C. (1984) Settlement of Foundations on sand and gravel. Papers Invited Lecturers Centenary Celebrations. Glasgow and West of Scotland Assoc. of ICE 5-66. Aussi : Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 1, Dec. 1985, 78 : 1325-1381.
- Frank, R. (1991) Quelques développements récents sur le comportement des fondations superficielles. Rapport général, Comptes rendus X^e Cong. Europ. Méca. Sols et Tr. Fond., Florence, Vol. 3, pp. 1003-1030.