

Etude expérimentale sur les déplacements verticaux à l'interface d'une fondation soumise à des sollicitations dynamiques



Faouzi Meribout

Laboratoire de structures et mécanique des sols

Département de Genie civil, Faculté des sciences de l'ingénieur

Campus Hamani, Université Mentouri Constantine, 25000 Algérie.

Ahmed Boumekik

Laboratoire de structures et mécanique des sols

Département de Genie civil, Faculté des sciences de l'ingénieur

Campus Hamani, Université Mentouri Constantine, 25000 Algérie.

RESUME

Dans cet article on présente les résultats d'une étude expérimentale sur les déplacements verticaux à l'interface d'une fondation soumise à des sollicitations dynamiques générée par une machine vibrante. La semelle de forme rectangulaire est sollicitée par une force verticale harmonique produite par l'appareil d'essai. Deux types de sols ont été étudiés dans le présent travail et ce à des fins de comparaison un sol cohérent et un sol non cohérent. Les résultats ont montrés que les sols cohérents présentent des tassements verticaux importants après consolidation de la zone sous la semelle, par ailleurs les parties en dehors de cette zone ne présentent pas des déformations notables et leur participation reste négligeable, Contrairement aux sols non cohérents où les tassements sont plus modérés et la diffusion des effets dynamiques est plus importante, les particules en dehors de la zone sous la fondation participent activement à l'absorption des effets dynamiques. De même, l'effet de variation du tassement avec la profondeur a été particulièrement étudié dans le cas du sol sableux.

ABSTRACT

This paper presents the experimental results of dynamic displacements of soil measured at the soil-foundation interface, including the effects of time-varying processes. The foundation prototype used in the tests is of a rectangular shape. The harmonic vibrations applied on the foundation prototype are generated directly by the testing machine. In order to analyze the influence of the soil nature on the dynamic settlement, the tests have been carried out on two types of sample soils: granular and cohesive. Obtained results showed that the two types of soil present a different dynamic behaviour. In fact, it was observed that cohesive soils exhibit more significant displacement and develop permanent dynamic settlement. However granular soils experience more important lateral deformations with a substantial reduction in volume.

INTRODUCTION

L'appareil de tassement dynamique vertical est un appareil destiné à l'étude des déplacements instantanés à l'interface sol/structure et en profondeur à différentes couches de sols homogènes ou pas. Les principaux essais effectués à ce type de problèmes sont ceux accomplis par (Brumund et Leonards, 1972) [4].

Cet appareil a été conçu pour examiner le comportement réel d'échantillons de différents types de sols sous l'action de chargements verticaux harmoniques avec variation des paliers de fréquences des forces excitatrices ainsi que leurs amplitudes, et ce en complément aux études théoriques [2], [3], [6], [7], [8], [15] et aux travaux expérimentaux [4], [12].

1. Principe de l'essai :

1.1. Modèle réduit :

Le modèle réduit utilisé dans l'essai est représenté sur la figure (1). Dans ce modèle la force verticale harmonique produite par la machine d'essai est appliquée directement sur un prototype de semelle de forme circulaire ou carré. Cette fondation est placée à la surface d'un échantillon de sol de dimensions assez importantes par rapport à celles de la fondation.

Le matériau utilisé étant le même que dans le problème réel, l'effet d'échelle est principalement lié au rapport entre les dimensions des semelles et la taille des échantillons.

Les dimensions de la semelle sont fixés à : diamètre = 102 mm, hauteur 50 mm.

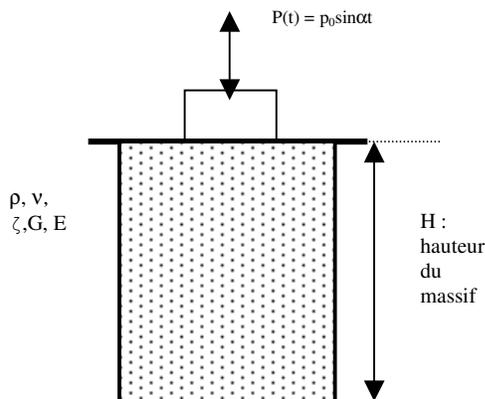


Fig. 1 modèle expérimental de fondation de machine générant une vibration verticale

Les dimensions des échantillons sont fixées en tenant compte des conditions d'échelle, des zones d'influence, ainsi que des dimensions utilisées dans les expérimentations similaires. Ces dimensions doivent tenir compte de la zone d'influence des tassements dynamiques, qui est de 2.4 R en surface avec une profondeur pouvant atteindre 6R (R étant le rayon de la semelle).

Les massifs de sols testés sont de trois types ayant des formes cubiques, leurs dimensions respectives sont : 30*30*30, 50*50*50 et 100*100*100 cm. Ces dimensions sont en accord avec les dimensions des échantillons testés par J.V.Perry (1963) qui sont de formes cubiques de 1m³ de volume, alors que les essais modèles de Brumund et de Leonard (1972) ont été effectués au moyen d'un récipient 2-ft³ (0.057-m³); ces derniers ont employé le sable 20-30 Ottawa, compacté à une densité relative de 70%.

L'intensité des forces appliquées dépend strictement des valeurs de contrainte à la rupture du sol. Cependant, la taille des grains est maintenue à l'état réel.

1.2. Machine d'essai :

La machine d'essai (figure 2) conçue et montée au laboratoire LMSS est constituée d'un bâti métallique supportant un moteur électrique, relié au système de transmission de charge.



Fig.2: vue globale de la machine expérimentale.

Ce dispositif expérimental peut générer des forces verticales harmoniques selon différentes fréquences et amplitudes, grâce à un système de variation de vitesse constitué d'un réducteur de fréquences réglable relié au moteur électrique.

De même, il maintient une pression constamment sur la semelle lors des différentes phases de relaxation du mouvement.

Des caméras à haute résolution numérique enregistrent toutes les indications révélées par les trois comparateurs, afin de pouvoir reconstituer par le biais de

logiciels de traitement de l'image les déplacements instantanés de chaque témoin, c'est-à-dire chaque point de contrôle.

L'exploitation de ces enregistrements nous permet de reconstituer l'évolution des différents paramètres, et le traçage ainsi des courbes de variations du déplacement et de la force excitatrice en fonction du temps.

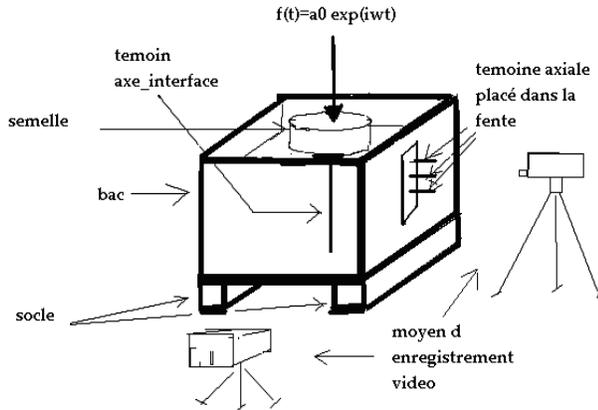


Fig. 3: schéma du dispositif d'essai d'axe-interface et voisinage

1.3. Principe de l'essai :

La face supérieure de l'échantillon est en contact avec la semelle en béton axée sous la partie mobile de l'axe vertical de la machine, la face inférieure reposant sur une plaque rigide fixe.

Un système de contrôle-commande permet de recueillir les données en provenance des différents capteurs (pression, pression totale, rotation, variation de volume). Il permet l'enregistrement régulier de ces différentes mesures et la commande de l'appareil (fréquence de la force excitatrice, vitesse et sens d'action, programmation de différentes phases). De Même, le système d'enregistrement vidéo numérisé permet l'analyse ainsi que la reconstitution des courbes de variation des déplacements verticaux avec le temps.

2. Etude de la variation de l'intensité des tassements selon la nature du sol :

Le comportement des sols dans la zone d'interface a été particulièrement étudié dans cette partie, en effet, selon la nature du sol, on a relevé des essais effectués que la semelle a beaucoup plus tendance à s'enfoncer dans les argiles où les tassements sont strictement localisés sous la semelle, contrairement aux sables argileux qui travaillent de façon plus solidaire au voisinage.

Les essais de compression axiale cyclique réalisés, à cet effet, sur l'échantillon de sable argileux à ain elBey, puis sur l'argile marneuse site de l'université Mentouri, ont confirmé les hypothèses préliminaires.

Les échantillons de sol ont pour caractéristiques :

- L'argile marneuse :
 - une masse volumique $\rho = 1.61\text{g/cm}^3$
 - teneur en eau naturelle $W = 22.44\%$
 - Limites de liquidité $W_L = 47\%$
 - Indice de plasticité $I_p = 18\%$
 - Angle de frottement interne $\phi = 15^\circ$
 - cohésion $C_u = 0.2$ bars.

- L'argile sableuse :

- une masse volumique $\rho = 1.53\text{g/cm}^3$
- teneur en eau naturelle $W = 18.59\%$
- Limites de liquidité $W_L = 28\%$
- Indice de plasticité $I_p = 11\%$
- cohésion $C_u = 0.124$ bars.

2.1. Bilan des essais :

Pour caractériser ce tassement dynamique, une série d'essais a été effectuée avec des témoins – comparateurs mesurant les déplacements verticaux dans deux positions spécifiques de l'interface.

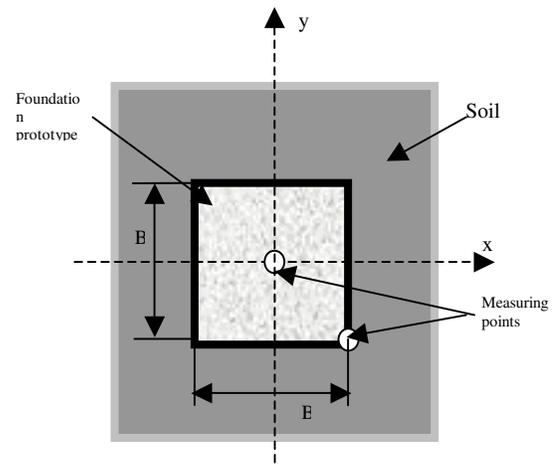


Figure 5 Measuring points at interface soil-foundation

Le premier point de mesure est pris à l'axe de la semelle sur le plan contenant l'interface ($x=0$), et le second est situé à la limite du bord de la semelle rectangulaire ($x=B/2$).

Tous les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions de charge (amplitude de force agissante : 950N, période de la vibration 0.6s), avec une durée pour chaque essai fixée à 20s. Les résultats des prélèvements mesurés sont présentés sur les courbes ci-dessous.

2.2. Tassement dynamique à l'axe de l'interface sol-fondation :

Les courbes de la variation des tassements dynamiques, en fonction du temps, mesurées à l'axe de l'interface sol-fondation pour les deux échantillons de sol sont représentées sur la figure 6 :

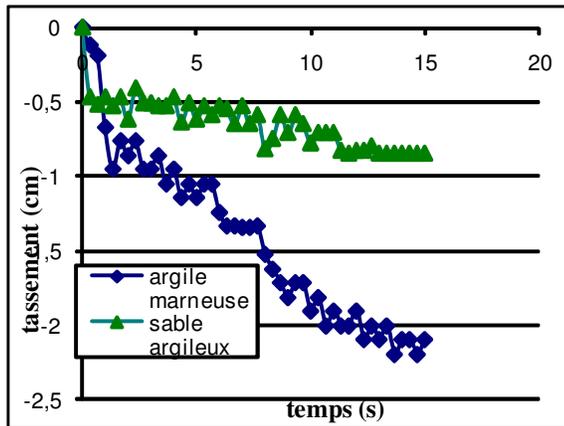


Fig.6: Variation du tassement dynamique à l'axe de la semelle ($x=0$)

Les essais effectués sur les deux types de sols ont montrés que les tassements à l'axe interface sous la même force excitatrice, dans le cas des argiles sont plus importants que dans le sol sableux, ce qui peut s'expliquer par l'apparition d'un phénomène de pré-consolidation de l'argile due essentiellement à la faible densité relative et une teneur en eau basse (assèchement de l'échantillon avant l'expérimentation).

Le tassement se stabilise pratiquement après 16 secs, et sa valeur avoisine les 21.1 mm pour l'argile marneuse, et 8.24 mm pour le sable argileux.

2.3. Tassement vertical sur le bord de la fondation :

Contrairement à ce qui a été constaté comme déplacements verticaux à l'axe, sur le bord de la fondation les déplacements ayant lieu sont beaucoup plus significatifs dans le cas du sable que dans le cas de l'argile marneuse, où le travail de l'ensemble sol-fondation se concentre dans la zone directement sous la fondation, et le sol au voisinage ne subit pratiquement pas de tassements notables, on observe à la fin du processus une consolidation zonale après un cisaillement avec le sol autour, les courbes de tassement dans ce cas sont dès le départ monotone le sol travail pratiquement comme un ressort qui rebondit sous l'action de la force excitatrice. Le tassement se stabilise pratiquement après 16 secs, et sa valeur avoisine les 3.20 mm pour l'argile marneuse, et 8.02 mm pour le sable argileux de dunes.

Des résultats précédents, il est clair que de part la nature même de sa constitution, le comportement en dynamique des sols non cohérents (sable argileux dans

notre cas) se répartit sur l'ensemble du sol sous la fondation et le voisinage, le bloc sol est très solidaire, et les essais ont montré que les déplacements verticaux sous la fondation varient graduellement avec la position des particules sous l'axe de la fondation et à proximité de l'interface où elle atteint ses valeurs maximales.

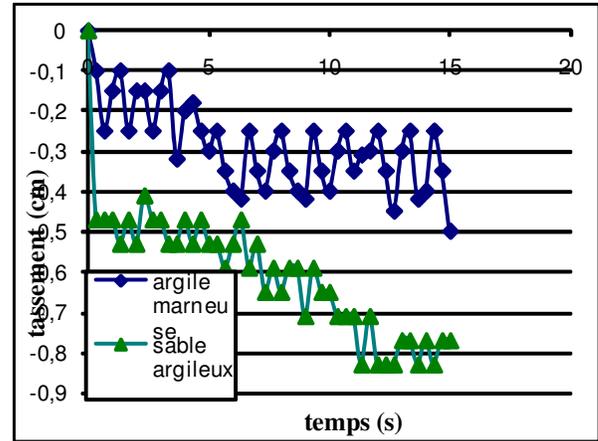


Fig. 7 : déplacement vertical à l'interface sol – fondation des 2 échantillons de sols $X = b$ (bord de la fondation)

L'argile marneuse a un comportement bien spécifique, dans ces sols cohérents l'essentiel du travail s'effectue dans la zone axiale sous la fondation où on constate une consolidation et un affaissement remarquable du sol, qui sera suivit par une stabilisation des déplacements, le sol travaillant dans ce cas comme un ressort.

Dans la zone avoisinante, les déplacements sont infimes, et on constate un cisaillement franc entre les parties du sol sous la fondation et le reste, comme montre la figure, où on voit clairement la forme du fil d'étain qui était rectiligne avant la mise en action de la sollicitation cyclique.

3. Etude de la variation de l'intensité des tassements avec la profondeur suivant l'axe de la semelle dans un sol sableux :

Dans cet essai le témoin est placé à l'axe de la semelle à une profondeur $h/3$ de l'interface, et sous l'action des mêmes sollicitations on mesure la variation temporelle des déplacements puis les déformations en ce point du sol sableux ayant les caractéristiques suivantes :

- masse volumique 2.31 g/cm³, le sable utilisé est à forte dominance de particules fines, la taille des grains est comprises entre 0.2 et 0.6 mm.

D60	D50	D30	D10	C _u	C _c
-----	-----	-----	-----	----------------	----------------

0.36	0.32	0.27	0.25	1.44	0.81
------	------	------	------	------	------

Tab 1 : caractéristiques granulométriques du sable

L'indice des vides varie de 0.652 à 0.909.

3.1. Tassements dans la zone d'interface en position d'axe :

Le comparateur relié au témoin placé dans la zone d'interface à l'axe de la semelle, nous indique les déplacements temporels du sol sableux sous la semelle. La reconstitution de ces données nous permet d'élaborer les courbes de variation de la déformation axiale en fonction du temps :

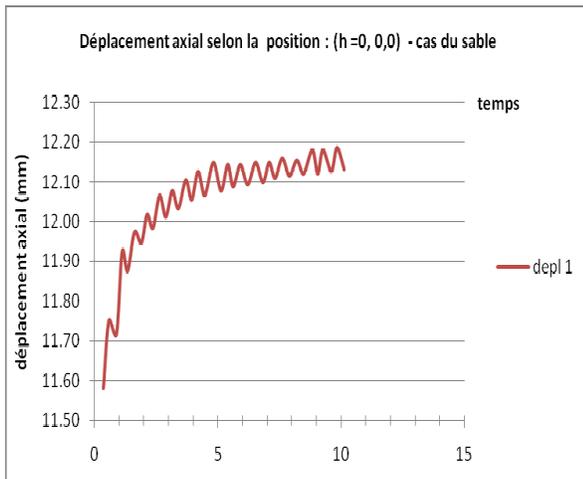
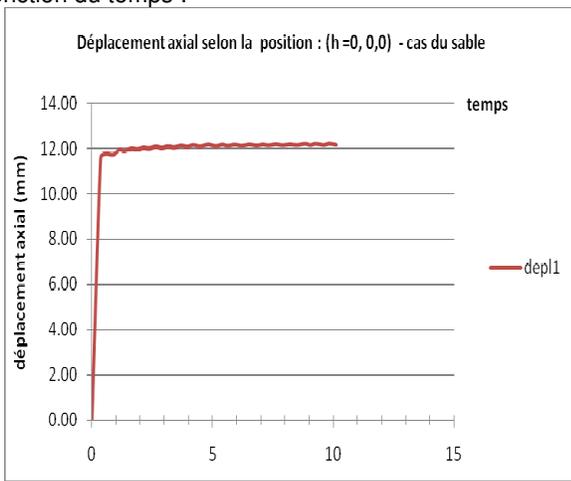


Fig.8 : (a) déplacement axial selon la position d'axe interface point1 (0,0,0,), (b)détail des sinusoïdes à partir du 2eme cycle.

Ces déplacements suivent une courbe croissante en sinusoïdes. A l'amorce du mouvement, un tassement initial important se produit ($S_i=11.74\text{mm}$) suite au choc, qui sera suivi par une phase de mouvement transitoire avant la stabilisation des sinusoïdes au bout du

15eme cycle avec des tassements moyens de 12.05 mm. Les déformations axiales sont ainsi déduites : $\epsilon (\%) = \Delta h/h_0$. La courbe des déformations temporelles à l'interface reconstituée après traitement présente l'aspect suivant :

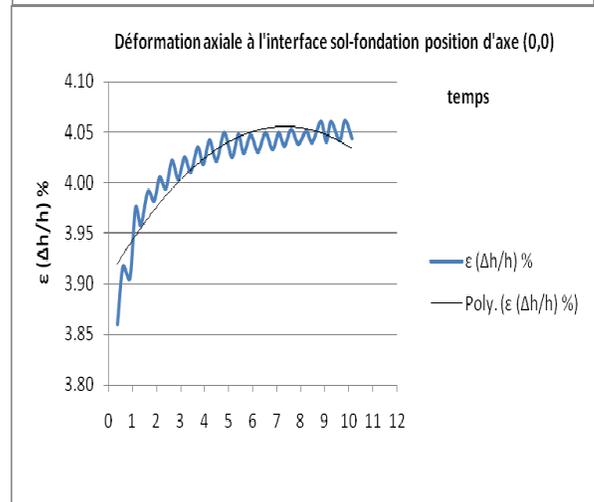
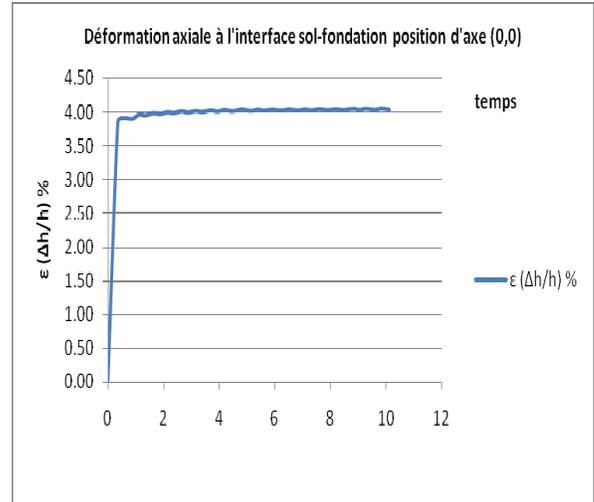


Fig.9: variation de la déformation axiale à l'axe interface

On remarque la poursuite du processus d'accroissement des déformations pendant neuf cycles, puis une stabilisation sensible des sinusoïdes avec des amplitudes de 0.02% en moyenne.

Les déformations axiales du sol décrivent des sinusoïdes régulières et d'amplitude sensiblement constante.

La courbe de variations des déformations a une tendance croissante durant les premiers cycles, puis se stabilise et le sol présevera les mêmes déformations harmoniques par la suite, cette courbe s'approche des formes idéalisées.

3.2. Tassements dans la zone d'interface en position d'axe à une profondeur h/3:

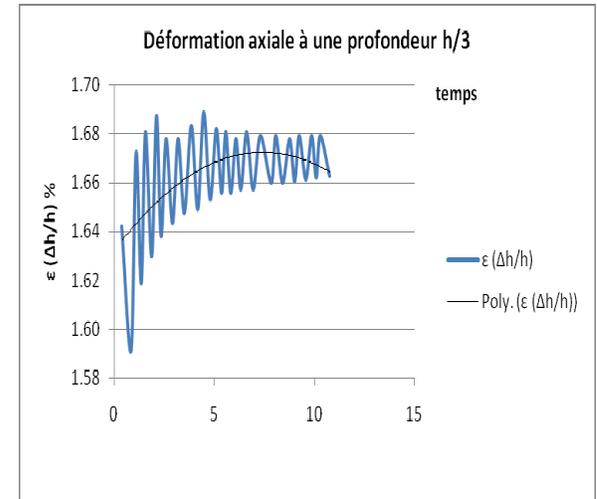
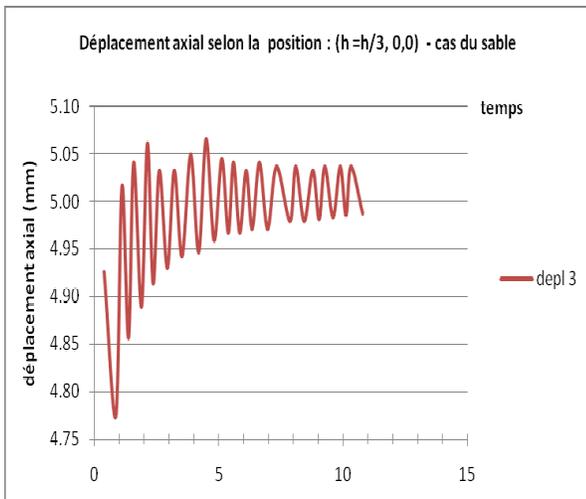
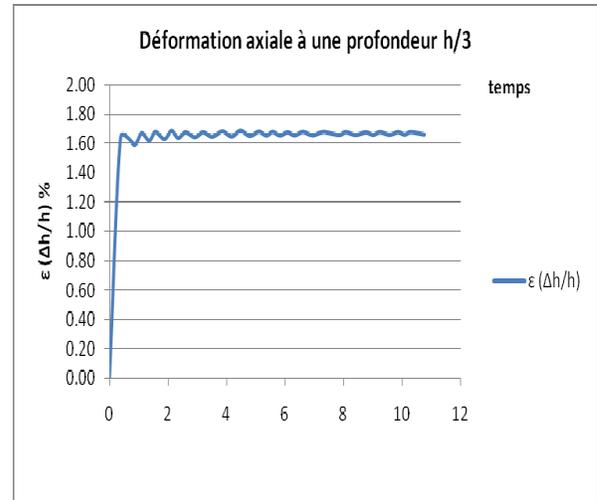
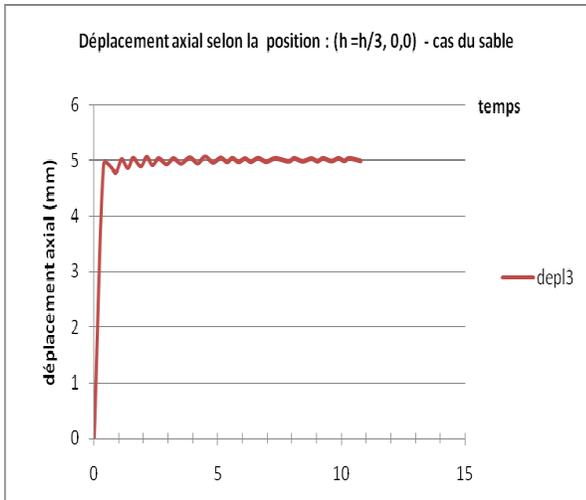


Fig.10 : variation du déplacement vertical à l'axe interface (0,0) à une profondeur h/3

Fig.11 : variation de la déformation axiale à l'axe interface (0,0) à une profondeur h/3

Les déformations en profondeur, contrairement à celles produites à l'interface ont tendance à montrer des sinusoïdes ayant des amplitudes importantes de l'ordre de 0.1% lors des 4 premiers cycles, pour se réduire de moitié lors des cycles suivants

Jusqu'à la stabilisation des tassements qui se fait pratiquement à partir du sixième cycle, où l'amplitude sera $\epsilon = 0.4\%$. La courbe de déformation devient harmonique monotone avec des amplitudes de plus en plus petites.

3.3. Analyse de l'effet de la profondeur sur le tassement vertical

Afin de mieux cerner l'effet d'influence des tassements en profondeur, des essais sur des échantillons plus grands ont été effectués, avec une hauteur de sol $h=500$ mm. Les mesures de déplacements obtenus dans ce cas sont montrées sur la figure fig. 10

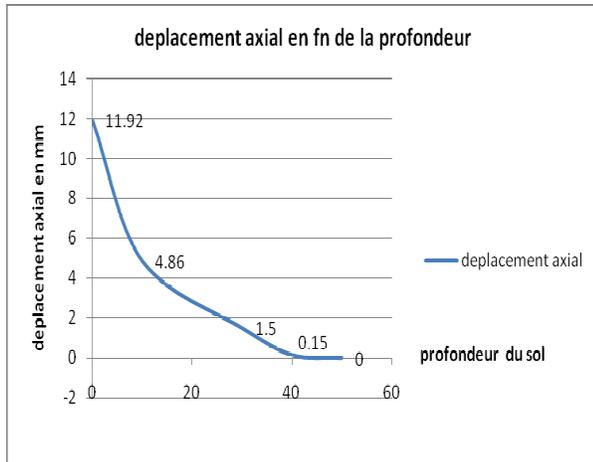


Fig.12 : variation du déplacement axial avec la profondeur

L'allure de la courbe des déplacements en fonction du temps de cet essai cyclique est conforme aux prévisions, le sol sableux connaît un déplacement important sous le premier coup, c'est un choc sous lequel le sol tasse subitement d'environ 11.92 mm à la surface d'interface, et de 4.86 mm en profondeur ($h/3$), après cela les déplacements décrivent des sinusoides légèrement décroissantes.

L'intensité des tassements décroît avec la profondeur et son effet devient peu perceptible à partir d'une profondeur ($h = 6R$) où le tassement ne dépasse pas $S=1.5$ mm soit $S_0/8$, avec R : Rayon de la semelle, et S_0 : tassement immédiat à l'interface.

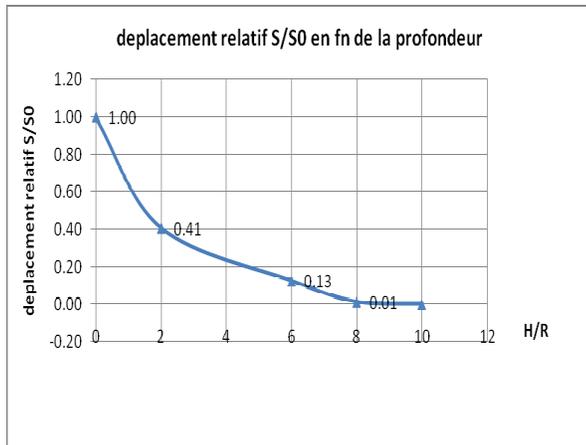


Fig.13 : variation du déplacement relatif axial avec la profondeur

Les déplacements relatifs à une profondeur $3R$ sont d'environ 30% du tassement à l'interface S_0 , alors que sa valeur avoisine les 13% du tassement référentiel à une profondeur $6R$ pour s'annuler pratiquement à $8R$.

Conclusions :

Des résultats précédents, il est clair que de part la nature même de sa constitution, le comportement en dynamique des sols non cohérents (sable argileux dans notre cas) se répartit sur l'ensemble sol sous la fondation et le voisinage, le bloc sol est très solidaire, et les essais ont montré que les déplacements verticaux sous la fondation varient graduellement avec la position des particules sous l'axe de la fondation et à proximité de l'interface où elle atteint ses valeurs maximales.

L'argile sableuse où marneuse a un comportement bien spécifique, dans ces sols cohérents l'essentiel du travail s'effectue dans la zone axiale sous la fondation où on constate une consolidation et un affaissement remarquable du sol, qui sera suivi par une stabilisation des déplacements, le sol travaillant dans ce cas comme un ressort.

Dans la zone avoisinante, les déplacements sont infimes, et on constate un cisaillement franc entre les parties du sol sous la fondation et le reste.

Les essais menés sur le sable ont montrés que l'intensité des tassements décroît avec la profondeur et son effet devient pratiquement nul à partir d'une certaine profondeur selon la nature du sol. Le massif de sol est considéré comme infiniment épais pour une épaisseur plus grande que 6 fois le rayon de la fondation

L'essai du tassement dynamique ouvre la possibilité d'essais spécifiques lors de la conception d'installations industrielles à des coûts réduits, permettant de mieux jugé du comportement futur des sols sous les installations de machines vibrantes. Outre les essais classiques, cet essai offre des facilités supplémentaires que des essais in situ d'ailleurs peu commode. Toutefois, la taille de l'appareil et sa sophistication le destinent davantage à des travaux de recherche qu'à des essais de routine.

Références

Références bibliographiques

1. Baranov V.A (1967) On the calculation of excited vibration of an embedded foundation. *Voprosy Dynamiki I prochnooti*, N°14, polytechnical Institue of Riga pp. 195,209.
2. Boumekik A. (1985) Fonctions impédances d'une fondation vibrante en surface ou partiellement encastrée dans un sol multicouche. *Thèse Doc. Univ. Libre de Bruxelles*.
3. Boumekik A, Nuyens J, Canstantopoulos I.C. (1986) Soil-structure effect on circular structure embedded in multilayered soil profile. *Proc. Int. Soc. For soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco.
4. Brumund W. F. & Leonards G.A. (1973) Experimental Study of Static and Dynamic Friction between Sand and Typical Construction Materials. *Journal of Testing and Evaluation*, 1 (2), 162-165.
5. Bycroft G.N. (1980) Soil foundation interaction and differential ground motion. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 8,397-404.

6. Chow Y.K. (1986) Simplified analysis of dynamic response of rigid foundations with arbitrary geometries. *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol. 14,643-653.
7. Gazetas G. (1983) Analysis of machine foundation vibrations. *State of art. International journal of soil Dynamics and earthquake engineering* Vol2, N°1.
8. Luco J.E. and Wesmann R.A. (1971) Dynamic response of circular footings. *Journal of engineering Mechanics Division ASCE*, 97, 1381-1395.
9. Lysmer J. and Richard F.E. (1966) Dynamic response of footing to vertical loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE*. Vol 92.
10. Novak M. and Beredugo Y.O. (1972) Vertical vibration of embedded footings. *Journal of the soil Mechanics and Foundation Division* Vol. 98 N°SM12.
11. Perry J.V.(1963) Soil motions under vibrating foundations. *Thesis PHD Virginia polytechnic institute*. AMC Texas.
12. Veletsos A.S. (1973) Vibration of viscoelastic foundations. *Int. J. Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*
13. Vrettos C. (1999) Vertical and rocking impedances. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 28, 1525-1540.
14. Wolf J. (2001) Response of unbounded soil in scaled boundary finite-element method. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 31:15-32 (Dol: 10.1002/eqe.91).
- 15.