

Étude expérimentale du comportement du sol lors du fonçage des pieux

Vladimir SHAKHIREV

Docteur es Sciences
Centre expérimental des Sols
Laboratoire public d'Études et d'essais, Casablanca

Jean-Pierre MAGNAN

Directeur technique chargé du pôle Géotechnique
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Houssine EJJAAOUANI

Directeur du Centre expérimental des Sols
Laboratoire public d'Études et d'essais, Casablanca (Maroc)

RÉSUMÉ

Cet article décrit des expérimentations en laboratoire à petite échelle et sur le terrain avec des pieux réels, pour caractériser la cinématique des déformations des sols lors de l'enfoncement des pieux. Les expérimentations en laboratoire ont été réalisées dans des cuves remplies de sable ou d'argile où l'on a enfoncé des pieux cylindriques ou pyramidaux. Elles ont fourni des champs de déplacements verticaux et horizontaux qui permettent de quantifier la réponse du sol aux grands déplacements du pieu. Les expérimentations en vraie grandeur ont analysé les évolutions de la surface du sol, des déplacements horizontaux, de la résistance à la pénétration statique, des teneurs en eau et des poids volumiques du sol lors du battage de pieux de grandeur réelle. Elles ont mis en évidence les zones de compression et de décompression du sol, l'amplitude des déplacements et des déformations volumiques. Ces données permettent de mieux comprendre la cinématique du comportement du sol.

MOTS CLÉS : Comportement - Sol - Pieu - Fonçage - Expérimentation - Laboratoire - In situ - Déformation - Déplacement (mouvement).

Introduction

Dans beaucoup de pays, le dimensionnement des pieux s'effectue actuellement sur la base d'essais en place, au moyen de méthodes de calcul reposant principalement sur l'expérience, avec pour certaines une base théorique simplifiée, rapprochée de la réalité par des coefficients correcteurs. C'est le cas en France, où la méthode pressiométrique a reçu un développement tout à fait exceptionnel, mais où l'on utilise aussi l'approche du pénétromètre statique, voire des formules de battage ou d'autres méthodes. Les essais de pieux nécessaires pour étalonner les méthodes de calcul pressiométrique et pénétrométrique s'intéressent en général à la déformation propre du pieu, dont on déduit les interactions avec le sol, la loi de comportement du matériau du pieu étant supposée connue. De tels essais de pieux ont été effectués en grand nombre par les Laboratoires des Ponts et Chaussées au cours des vingt dernières années (Baguelin et *al.*, 1975 ; Bustamante et Gianselli, 1981) et on en trouve aussi de nombreux exemples dans les publications d'autres pays (Briaud et Tucker, 1988 ; Janbu, 1952). L'une des difficultés des essais de pieux courants réside dans la pauvreté assez générale de la connaissance du sol autour des pieux, connaissance des lois de comportement des sols, mais aussi mesures de déplacements autour du pieu, pour en comprendre l'interaction avec le sol et pour disposer des informations nécessaires pour valider les méthodes de calcul modernes en éléments finis.

Les essais dans lesquels on s'intéresse au comportement du sol autour du pieu ont été très fréquents il y a une quarantaine d'années, à l'époque où les chercheurs en mécanique des sols tentaient d'appliquer à tous les problèmes concrets de la construction géotechnique l'approche de la mécanique des milieux continus. Parmi les nombreux essais de ce type, on peut noter ceux de Cambefort (1964), Habib (1953), Janbu (1953), Kérisel et Adam (1962), Lebègue (1964), l'Herminier (1953), Pogany (1953) et Tcheng (1966). Ces essais sont devenus moins fréquents depuis quelques années, mais il nous semble qu'ils sont la clé des évolutions futures de la mécanique des sols et des fondations, car ils apportent une connaissance détaillée des mécanismes rhéologiques qui expliquent la résistance des massifs de sols aux sollicitations qui leur sont appliquées.

Cet article présente les résultats d'études du second type, c'est-à-dire privilégiant l'observation directe du sol autour des pieux, dans un cas d'application assez rare, qui est le cas des pieux battus. Les essais décrits ici ont été réalisés au cours des années 1970, pour l'essentiel dans les régions de Samara (Kujbyshev), de Yaroslav, d'Ufa et de Minsk, et sont restés non publiés dans les archives du premier auteur. À une époque où le développement effréné des recherches sur la modélisation numérique a souvent supplanté les recherches expérimentales, ces données expérimentales, fruit d'un travail très complexe et important, présentent un intérêt renouvelé, à la fois comme exemple de ce que l'on peut déduire de recherches expérimentales sur modèles et sur site réel, comme référence expérimentale pour la validation des modèles de calcul numérique, et comme illustration du comportement des sols lors du battage des pieux.

L'article est divisé en deux parties :

① La première décrit les essais réalisés dans des cuves remplies de sable ou d'argile en laboratoire. Des modèles réduits de pieux ont été enfoncés dans ces cuves, en observant soigneusement les déplacements verticaux et horizontaux des sols pendant le fonçage. Les techniques expérimentales, les résultats des essais et leur interprétation sont présentés successivement.

② Dans la seconde partie, les expérimentations effectuées sur deux sites expérimentaux, lors du battage de quatre pieux de section carrée en béton armé, sont décrites et leurs résultats sont analysés. Les principales caractéristiques des comportements des sols testés (argile macroporeuse) sont ensuite analysées et commentées.

Études sur modèles de pieux en laboratoire

Les études présentées ici ont été réalisées, d'une part, à Ufa et, d'autre part, à Minsk, sous la direction du premier auteur. Ces études, consacrées aux phénomènes qui se produisent dans le sol lors de l'enfoncement d'un pieu, ont été effectuées dans deux types de cuves :

- des cuves « planes » (dans lesquelles le sol est placé entre deux parois verticales assez rapprochées),
- des cuves « tridimensionnelles » (cuves en forme de boîte parallélépipédique dans lesquelles le pieu est foncé au milieu de la cuve, à bonne distance des parois).

Études en cuve plane

Matériel d'essai et de mesure

La cuve plane était constituée d'une boîte de dimensions $20 \times 400 \times 700$ mm, dont les parois latérales étaient faites de verre épais. Le côté de la boîte destiné à l'observation portait un quadrillage de fils fixés sur les côtés de la boîte. Les fils verticaux étaient espacés de 20 mm, tandis que les fils horizontaux étaient espacés de 17 mm et de 3 mm. La cuve était remplie de sable séché et tamisé, dont les particules avaient des dimensions comprises entre 0,1 et 0,5 mm. Pour faciliter l'observation visuelle du comportement du sol lors du fonçage du pieu, la mise en place du sable dans la cuve était effectué par couches : une couche de 17 mm d'épaisseur de sable de couleur naturelle et une couche de 3 mm de sable coloré en noir, etc. La position initiale des couches colorées et non colorées correspondait à la disposition des fils horizontaux, qui jouaient le rôle de repères fixes.

À titre de variante, pour obtenir une image qualitative non seulement des déplacements verticaux, mais aussi des déplacements horizontaux du sol par photographie, on a mis en place des repères dans la cuve à la place des couches colorées. Chaque repère était constitué d'un cylindre de bois de 4 mm de diamètre et de 19 mm de longueur. Sur l'extrémité du cylindre orientée vers l'écran d'observation, on collait un cercle de papier sur lequel était tracée une croix. Du côté extérieur de la plaque de verre, on installait un réseau de fils noirs selon un pas de 20×20 mm. Les repères étaient placés de façon à coïncider avec les intersections des fils.

Les modèles réduits de pieux étaient des prismes de bois de dimensions $20 \times 20 \times 240$ mm et des pièces de bois pyramidales dont les faces étaient inclinées par rapport à l'axe longitudinal du pieu

de $\tan \beta_1 = 0,025$ et de $\tan \beta_2 = 0,05$, avec une longueur de 240 mm également. Les faces des modèles réduits de pieux en contact avec le verre étaient couvertes de flanelle, qui empêchait les particules de sable de se glisser entre les pieux et le verre.

Le fonçage des pieux d'essai était réalisé par application d'une force dont on n'enregistrait pas l'intensité à cause du frottement des pieux contre les parois de la cuve. Lors du chargement, on photographiait les déplacements des couches de sable par rapport aux fils servant de repères.

Observations et mesures pendant les essais

La figure 1 présente des vues caractéristiques des déformations du sol observées lors de l'enfoncement des pieux prismatiques et pyramidaux dans le sable à l'intérieur de la cuve plane.

Les résultats des mesures des déplacements verticaux des couches de sol aux différentes profondeurs, effectuées au moyen d'un appareil de relevé des coordonnées permettant de mesurer le 1/100 de millimètre, sont représentés en fonction de la profondeur relative d'enfoncement du pieu sur la figure 2.

La figure 2a montre les déplacements verticaux des couches de sol, en fonction de la profondeur, pour un pieu de section constante (pieu

prismatique, courbes de la partie gauche de la figure) et pour un pieu de section variable (pieu pyramidal, partie droite de la figure). Le champ des déplacements verticaux du sol est représenté pour trois enfoncements des pieux (6d, 12d et 18d, où d représente le côté du pieu de section carrée au niveau de la surface supérieure du sable).

On distingue sur la figure 2a des zones où les déplacements du sol sont dirigés vers le bas et des zones où ils sont dirigés vers le haut, ce qui permet de définir des domaines caractéristiques de déformation du sol associés au fonçage du pieu (fig. 2b). Pour les différentes profondeurs de fonçage du pieu, le domaine ① est une zone compactée à proximité immédiate du pieu, due à la propagation dans le sol de la composante verticale des contraintes transmise par les forces de frottement sur la surface latérale du pieu.

L'influence de la partie inférieure du pieu, qui transmet au sol des contraintes normales, contribue naturellement aussi à la formation de cette zone. Toutefois, lorsque l'extrémité inférieure du pieu s'éloigne d'une couche donnée, la taille de cette zone, tant dans la direction verticale que dans la direction radiale, non seulement ne diminue pas, mais au contraire augmente. Cela témoigne de l'influence prédominante sur la formation de la zone compactée des forces de frottement qui s'exercent sur la surface latérale du pieu.

Fig. 1 - Étude de la distribution des déformations verticales du sol lors du fonçage des modèles réduits de pieux dans une cuve plane remplie de sable

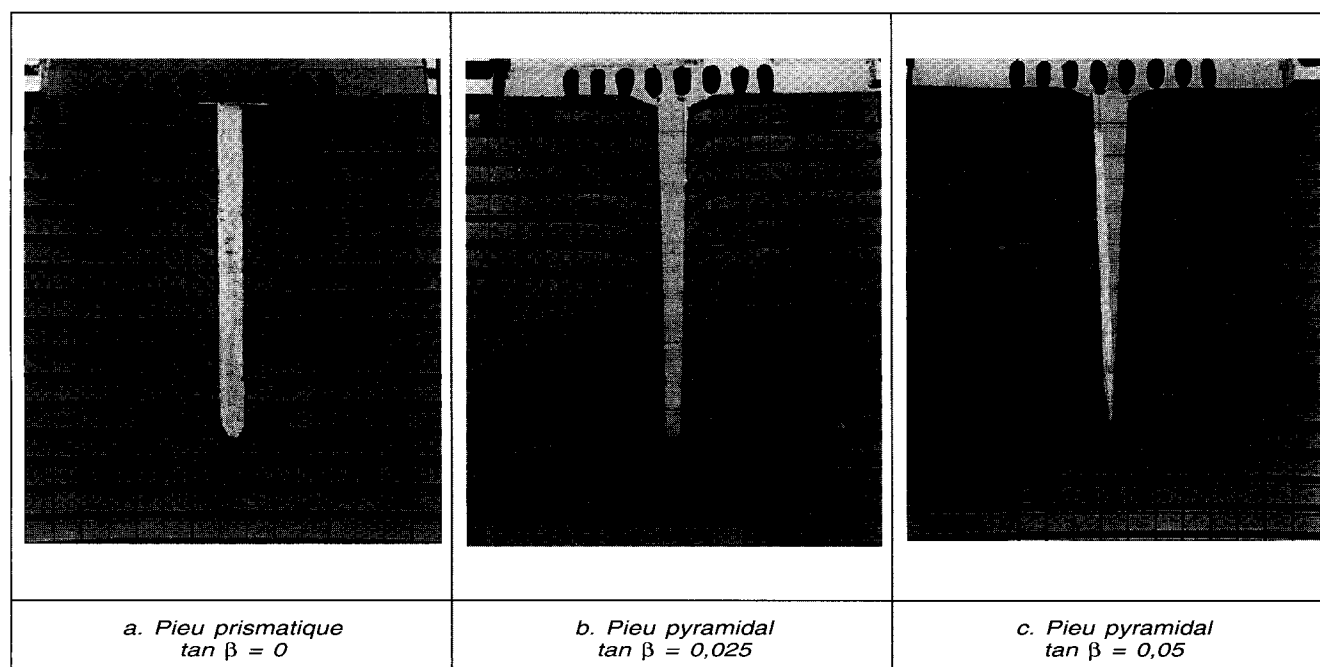
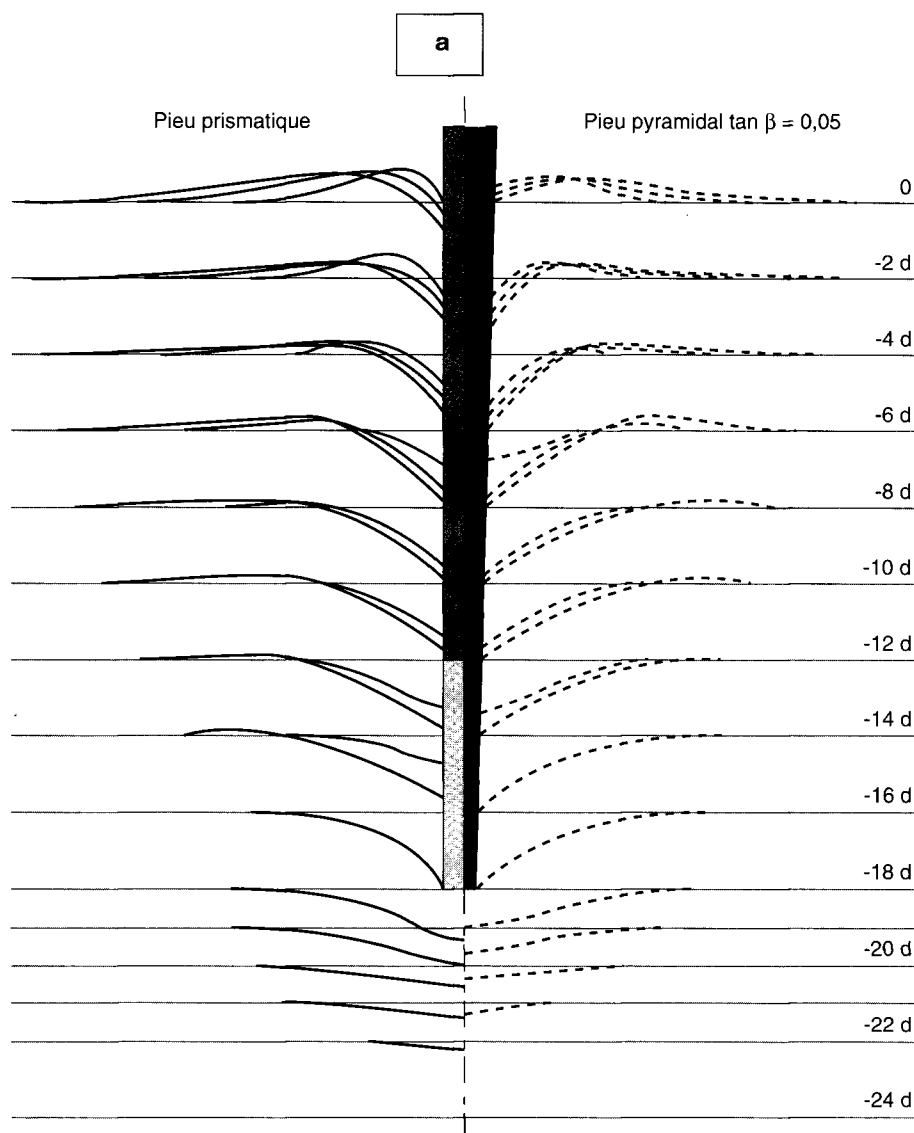


Fig. 2 -
Zones de déformations du sol lors du fonçage de modèles de pieux dans du sable (cube bidimensionnelle)

a - Déplacements verticaux observés (les couleurs correspondent aux trois profondeurs du pieu).

b - Zones de sol compacté ① et de sol refoulé ② autour des pieux.



Le domaine ② est constitué par les prismes plans de refoulement, qui se forment à cause de la pression exercée sur le sol par le corps du pieu en cours de fonçage. Les surfaces limites de ces prismes commencent au-delà de la zone de compactage et diffèrent de celles qui sont généralement admises dans la théorie du calcul des pieux par le modèle de l'équilibre limite.

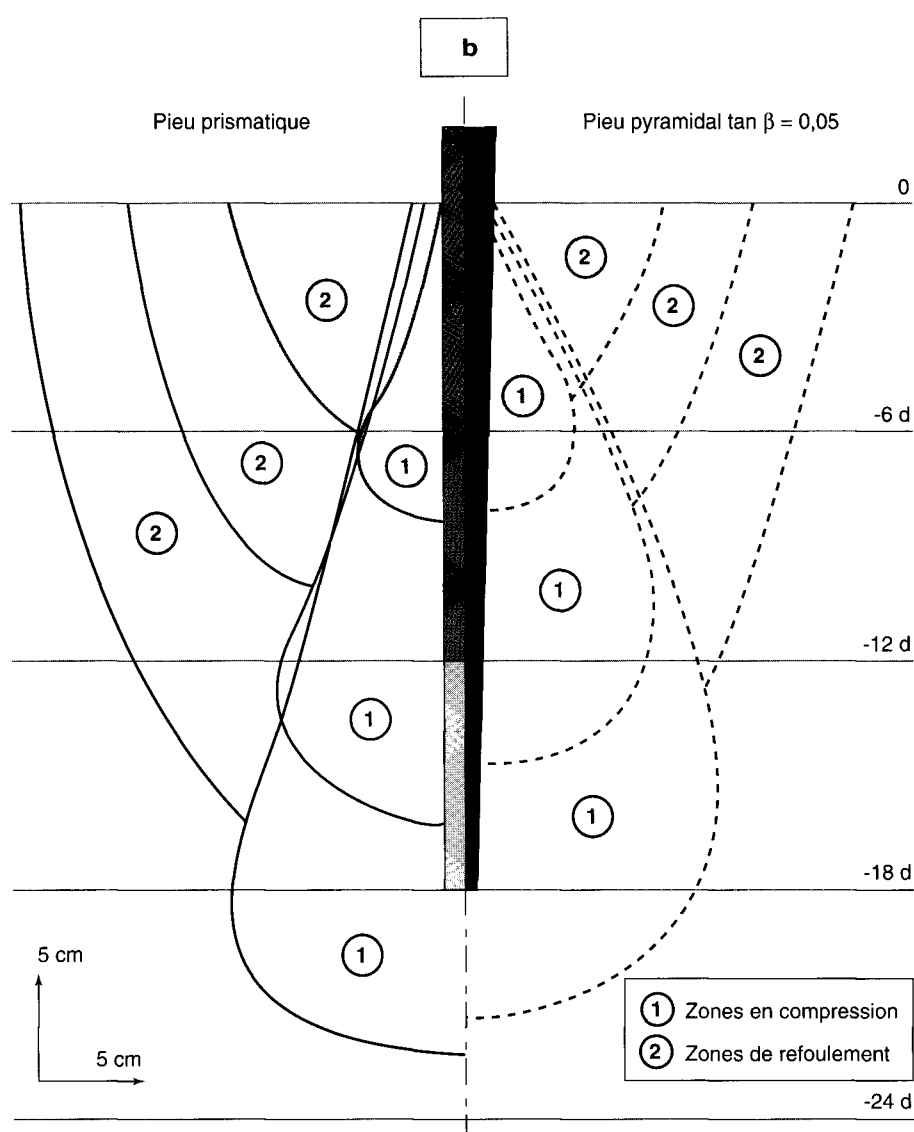
Lorsque l'enfoncement du pieu augmente, les dimensions radiale et verticale de cette zone de refoulement diminuent par rapport à celles de la zone de sol comprimé. Le bourrelet de sol refoulé, qui se situe au tout début du fonçage du pieu à proximité immédiate de ce dernier, diminue de hauteur quand la profondeur de fonçage augmente et son *extremum* s'éloigne horizontalement du pieu. On observe une évolution semblable à

l'intérieur du massif de sol. Cela indique que le volume du sol comprimé augmente lors de l'enfoncement du pieu. La géométrie de la frontière de la zone de sol compacté, qui a une forme de poire, en témoigne également.

Ainsi, sous la pointe d'un pieu se forme une zone de sol qui joue un rôle décisif dans l'établissement de la capacité portante du pieu.

Cette situation est caractéristique aussi des pieux de forme pyramidale, dont la cinématique de fonçage est représentée en fonction de l'enfoncement du pieu sur la partie droite des figures 2a et 2b.

Si l'on compare les déformations du sol lors du fonçage d'un pieu de section constante et d'un pieu de section variable, on note d'abord le rôle différent des forces de frottement sur la surface



latérale du pieu, dans la formation de la capacité portante. Pour les pieux de forme pyramidale, la largeur (dans la direction radiale) de la zone compactée le long de la surface latérale du pieu devient plus importante, tout en diminuant relativement à la partie inférieure du pieu. Le volume de la zone de refoulement du sol diminue tant en hauteur qu'en étendue. Globalement, le volume de la zone compactée, par comparaison avec un pieu de section constante, devient sensiblement plus fort, ce qui explique la valeur plus forte de la capacité portante des pieux de forme pyramidale par rapport aux pieux de forme prismatique, toutes les autres conditions étant égales par ailleurs.

L'installation de repères cylindriques en bois dans la cuve plane remplie de sable a permis

d'obtenir non seulement les déplacements verticaux, mais aussi les déplacements horizontaux du sol que provoque le fonçage du pieu. La figure 3 présente une vue générale de la cuve, avec les repères mobiles et le quadrillage fixe sur la paroi externe.

Les repères ponctuels donnent une idée plus précise des amplitudes des déplacements verticaux et horizontaux du sol. Toutefois, les repères disposés à proximité immédiate du fût du pieu se déplaçaient de façon groupée lors du fonçage du pieu à cause de déplacement du sol et il était difficile de déterminer à quelle couche appartenait un repère particulier. C'est pourquoi, lors de la construction des courbes de distribution des déplacements verticaux du sol, on a tenu compte des résultats obtenus avec les deux types de repérage.

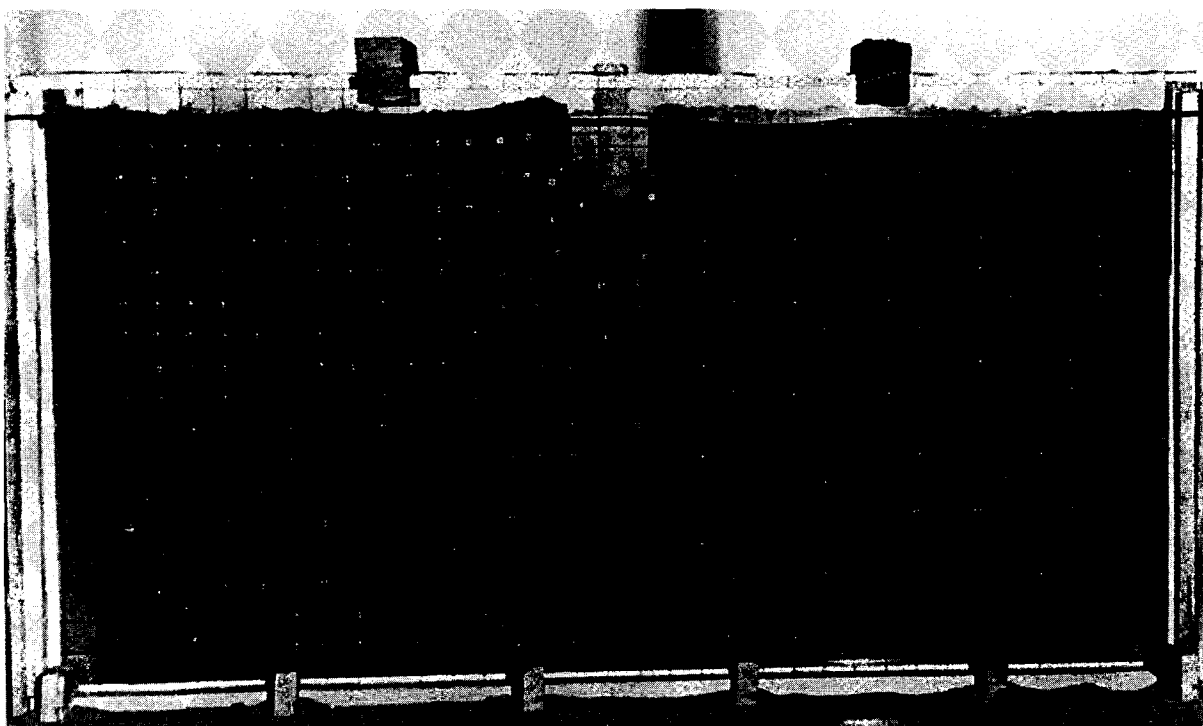


Fig. 3 - Vue générale de la cuve plane avec le réseau de repérage des déplacements.

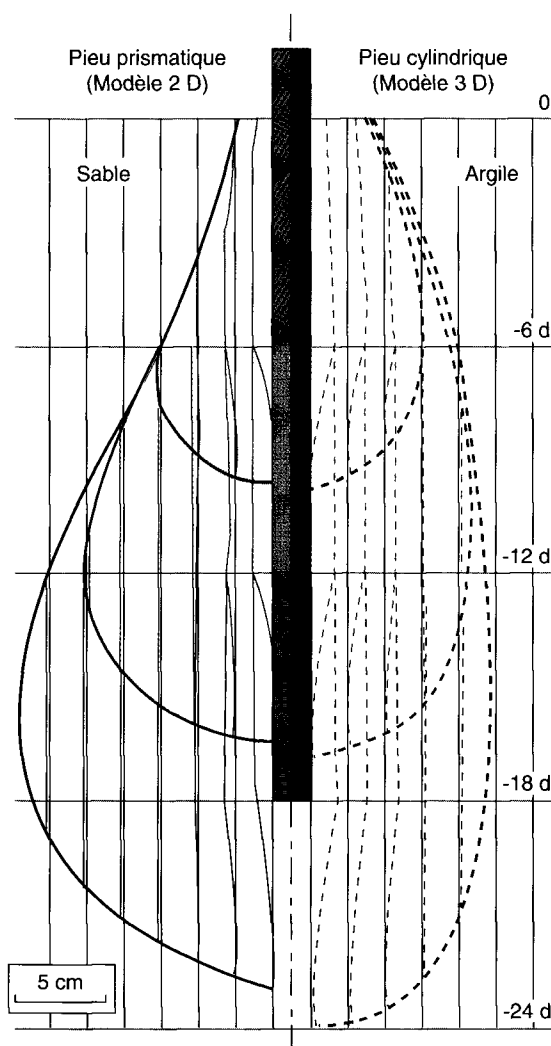


Fig. 4 - Zones de déplacements horizontaux du sol lors du fonçage de modèles réduits de pieux prismatiques dans du sable (côté gauche) et dans de l'argile (côté droit).

La figure 4 montre, dans sa partie gauche, les résultats des mesures des déplacements horizontaux du sol dans la cuve plane remplie de sable lors du fonçage des pieux pyramidaux. On peut voir que la forme de la frontière de la zone comprimée dans la direction horizontale est très semblable à celle de la zone comprimée dans la direction verticale (① sur la partie gauche de la figure 2b), mais que cette zone est un peu plus grande si l'on y englobe toutes les déformations horizontales observées. Par ailleurs, aux différentes étapes de l'enfoncement du pieu, la zone des déplacements horizontaux ne dépasse jamais une certaine largeur dans la direction radiale et se développe vers le bas à mesure de l'enfoncement du pieu.

Pour sa part, la zone globale des déplacements verticaux du sol (ensemble des zones ① et ② de la figure 2b, partie gauche) est plus grande que la zone des déformations horizontales, ce qui témoigne du fait que dans la zone ② peuvent se produire des phénomènes de déconsolidation du sol à cause de son refoulement.

Lorsque l'on commence à enfoncer le pieu dans la partie supérieure du massif de sable, le sol subit principalement des déplacements verticaux,

liés au refoulement du sol. Lorsque l'on poursuit l'enfoncement du pieu, une petite cuvette se forme autour du fût du pieu en surface parce que les particules superficielles de sable sont entraînées par les forces de frottement vers les couches plus profondes du sol (fig. 2a, partie gauche). Ainsi, par effet de dilatance, les déplacements horizontaux du sol au contact de la surface latérale du pieu sont supérieurs à la moitié de la dimension transversale du pieu (fig. 4, partie gauche). Ce phénomène devient particulièrement sensible au niveau de l'extrémité inférieure du pieu, où les déplacements horizontaux atteignent leur valeur maximale.

Conclusion

L'examen des zones de déformation du sol associées au fonçage d'un pieu permet de conclure que l'extrémité inférieure du pieu et le fût du pieu transmettent tous deux au sol des contraintes verticales et horizontales. Les contraintes verticales de compression, transmises au sol par le fût du pieu, sont caractérisées par l'apparition de forces tangentielles de frottement sur la surface latérale du pieu, qui sont dues au glissement du pieu par rapport au sol et aux forces de pression normales au pieu. L'extrémité inférieure du pieu pénètre pour sa part dans le sol en l'écartant sur les côtés et en l'entraînant partiellement vers le bas, et elle crée dans le sol des contraintes normales de compression, qui diminuent rapidement dans la direction radiale et en profondeur.

Essais en cuve tridimensionnelle

Matériel d'essai et de mesure

La cuve tridimensionnelle, de dimensions $240 \times 240 \times 240$ mm, était formée de deux parties de dimensions $120 \times 240 \times 240$ mm, avec des parois frontales en bois. Pour réunir les deux parties et les rigidifier, la boîte était bordée de cornières et serrée au moyen de boulons.

Cette cuve était remplie d'argile homogène plastique que l'on mettait en place par couches fines,

afin d'éviter la présence d'air dans les pores. Afin de stabiliser l'état d'humidité et de faire disparaître les contraintes locales dans le massif de sol après sa mise en place, la cuve remplie d'argile était conservée en l'état pendant deux semaines. Ensuite, on enlevait les boulons de serrage et on coupait verticalement le volume d'argile en deux parties égales avec un fil mince, parallèlement aux parois frontales, en suivant des fentes prévues à cet effet dans les parois latérales et le fond de la cuve.

Sur l'une des faces découpées par le fil, on installait une plaque de guidage en aluminium, comportant un réseau de trous de 2 mm et 3 mm de diamètre, disposés en quinconce selon une maille de 10×10 mm. Par ces ouvertures, on installait dans le sol des billes de plomb de diamètre correspondant. Ensuite, les deux parties de la cuve étaient de nouveau réunies au moyen des boulons. Après l'installation des billes de plomb, la cuve était de nouveau conservée en l'état pendant deux mois.

Les modèles réduits de pieux, de section circulaire, étaient fabriqués en acier. Leurs caractéristiques géométriques sont données dans le tableau I. Les pieux d'essai avaient tous la même longueur et le même volume, mais des inclinaisons différentes de la génératrice par rapport à l'axe longitudinal du pieu. Les modèles de pieux étaient foncés au centre du réseau plan des repères de plomb.

Compte tenu des dimensions peu importantes de la cuve et de l'impossibilité de réutiliser le sol après l'essai, on a placé chaque pieu dans un nouveau volume de sol, avec de nouveaux marqueurs. Dans chaque cas, on a utilisé le même matériau argileux, à la même teneur en eau et avec la même méthode de mise en place.

La radiographie des étapes du chargement des pieux aux rayons gamma (source de césium) a été effectuée, dans chaque cas, en l'absence de pieu et après l'enfoncement du pieu au tiers, aux deux-tiers et à la totalité de sa longueur.

TABLEAU I
Dimensions des modèles de pieux pour la cuve tridimensionnelle

Dimensions	Pieu cylindrique	Pieu conique		
		Tangente de l'angle d'inclinaison de la génératrice ($\tan \beta$)		
		0,0125	0,025	0,05
Diamètre supérieur (mm)	20	22,208	24,314	28,313
Diamètre inférieur (mm)	20	17,708	15,314	14,157
Longueur (mm)	180	180	180	180
Volume (cm ³)	56,52	56,52	56,52	56,52

Observations et mesures pendant les essais

Les résultats obtenus lors du fonçage des modèles de pieux dans une cuve contenant de l'argile, en conditions tridimensionnelles, sont un peu différents de ceux des expérimentations dans la cuve plane remplie de sable. Lors du fonçage d'un pieu cylindrique dans le sol argileux, la zone comprimée du sol a une autre allure. La zone de compression ① de la figure 5, qui se développe à proximité immédiate du pieu, a une forme presque cylindrique, avec une fermeture ellipsoïdale à ses extrémités inférieure et supérieure. Au début du fonçage du pieu, les dimensions de la zone comprimée dans la direction radiale augmentent, jusqu'à une profondeur d'environ 5d à 6d, puis elles restent pratiquement constantes quand la profondeur de fonçage augmente.

Par comparaison avec les pieux dans les sables, la zone déformée du sol sous la pointe du pieu est, à toutes les étapes du fonçage, plus étendue en profondeur et moins étendue radialement. Cela témoigne du fait que les sols argileux ont une moins grande capacité que les sables à redistribuer les contraintes dans le massif de sol et possèdent, pour cette raison, une capacité portante plus faible.

Les déformations verticales du sol, liées à son refoulement (zone ② de la figure 5), qui commencent à la limite de la zone comprimée, sont plus faibles en valeur absolue que dans les expériences effectuées dans les sables, mais sont plus étendues dans le plan. Lorsque la profondeur de fonçage augmente, la valeur maximale des déplacements verticaux du sol refoulé diminue à tous les niveaux et l'extremum de la courbe s'éloigne du pieu.

Lors du fonçage des pieux de forme conique, pour différentes valeurs de l'angle de la génératrice du cône par rapport à la verticale β , il a été noté, dans les conditions de la présente expérience, que la forme des pieux, comme dans le cas des sables, provoque une augmentation de la capacité de redistribution des contraintes lorsque l'angle β augmente.

On voit sur la partie droite de la figure 5 les zones caractéristiques des déformations du sol lors du fonçage d'un pieu conique pour $\tan \beta = 0,05$ (tableau I). La forme conique du pieu, comme pour les pieux pyramidaux des expériences précédentes, améliore sensiblement les conditions de transmission des contraintes au sol par le fût du pieu, ce qui fait travailler un volume beaucoup plus important de sol autour du pieu, mais limite le fonctionnement de la pointe du pieu, dont les dimensions sont plus faibles. Néanmoins, le volume total du sol argileux qui travaille dans le cas d'un pieu de forme pyramidale (ou conique) reste sensiblement plus grand

que dans le cas d'un pieu de forme constante (prismatique), ce qui se reflète dans la capacité portante plus grande des pieux pyramidaux par rapport aux pieux prismatiques. De plus, lors du fonçage des pieux de section constante, il peut se former dans différents types de sols un vide entre le pieu et le sol dans la partie supérieure du pieu, vide qui peut s'étendre jusqu'à une profondeur importante à partir de la surface du sol et qui diminue la résistance des pieux aux charges tant verticales qu'horizontales. Lorsque l'on utilise des pieux de forme pyramidale, il ne se forme pas de vide de ce type, le pieu a un contact fiable avec le sol sur toute sa longueur et le volume de sol soulevé est beaucoup plus faible.

Conclusion

L'analyse des zones déformées du sable et de l'argile lors du fonçage des pieux permet de tirer deux conclusions importantes sur la façon dont s'établit la capacité portante des pieux :

➤ Les sables ont une capacité de redistribution des contraintes plus forte et reprennent mieux les contraintes normales. Le rôle principal dans la capacité portante globale du pieu est joué par la résistance du sol sous l'extrémité inférieure du pieu.

➤ Les argiles redistribuent moins que les sables la charge extérieure appliquée au sol, tant sous forme de contraintes normales sous la pointe du pieu que sous forme de contraintes tangentielles dues aux forces de frottement le long du fût du pieu. Cependant, les forces de cohésion qui s'exercent sur le fût du pieu compensent dans une certaine mesure cette insuffisance, de sorte que, dans les sols argileux, le rôle dominant dans la formation de la capacité portante globale du pieu n'est pas joué par la pointe, mais par le fût du pieu et la capacité portante augmente avec la longueur du pieu.

En conclusion, dans les deux cas, la charge extérieure appliquée au pieu est transmise au sol à la fois par le fût et par la pointe du pieu, sous forme de contraintes verticales dont l'intégrale dépend de la capacité de redistribution des contraintes par le sol et de la forme du pieu.

Étude de pieux foncés dans des sols naturels

Organisation des études expérimentales

Choix et description des sites expérimentaux

Pour obtenir une image aussi complète que possible des phénomènes induits dans le sol par le fonçage d'un pieu, nous avons choisi deux sites expérimentaux comportant des sols de forte

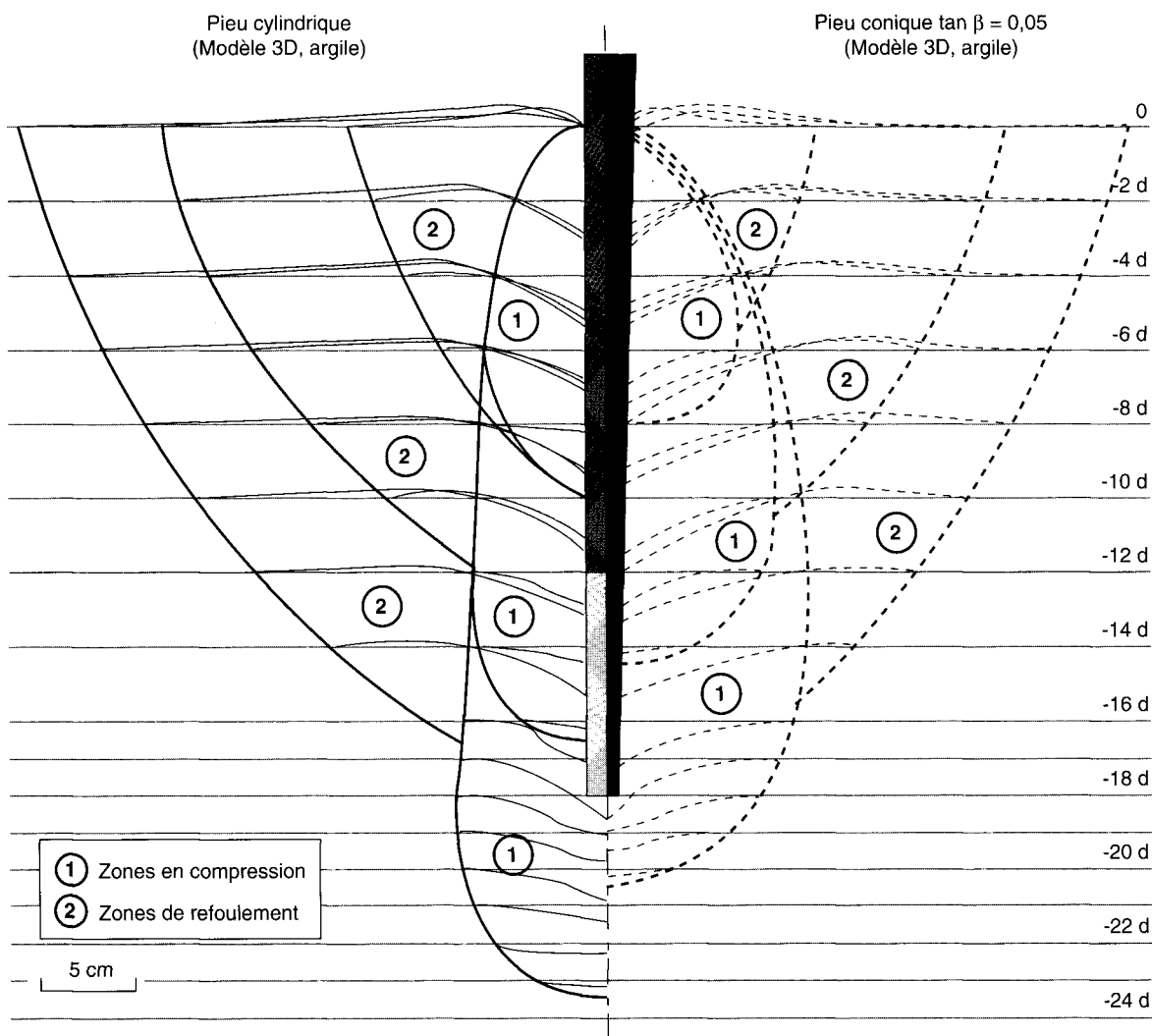


Fig. 5 - Zones de déformations du sol lors du fonçage de modèles réduits de pieux dans l'argile (cuve tridimensionnelle).

① Zones de sol comprimé - ② Zones de sol refoulé.

porosité naturelle et sans nappe d'eau dans la zone où furent exécutés les essais. Le choix de ces sites répondait à deux exigences :

- le sol doit être très compressible,
- le sol ne doit pas être saturé.

Ces conditions devaient être remplies pour que l'enfoncement des pieux produise dans le sol des modifications assez importantes pour être mises en évidence par les méthodes de mesure existantes.

Le premier site expérimental comportait des sols argileux et limoneux macroporeux, présentant des caractéristiques d'affaissabilité. La zone de l'essai comportait principalement des argiles macroporeuses de couleur jaune-brun, avec des lentilles d'argile limoneuse. Vers 19,2 à 19,4 m de profondeur, les argiles jaune-marron reposaient sur des argiles compactes vert-gris. Dans cette zone, la nappe était à une profondeur d'environ 11,6 à 13,4 m sous le terrain naturel. Les

caractéristiques physiques et mécaniques des sols du premier site expérimental sont données dans le tableau II.

Le second site expérimental comprenait principalement des argiles limoneuses morainiques de couleur marron-rouge et marron-jaune, de consistance dure à ferme, avec un pourcentage atteignant 20 % de graviers et de galets. Les eaux souterraines étaient à une profondeur supérieure à 10 m par rapport à la surface du terrain naturel.

Les caractéristiques physiques et mécaniques de ces sols sont également indiquées dans le tableau II.

L'organisation des essais de fonçage de pieux en vraie grandeur sur les sites 1 et 2 a été orientée vers l'étude de l'état du sol avant et après le battage des pieux.

TABLEAU II - Propriétés physiques et mécaniques des sols des sites expérimentaux 1 et 2

Site	z (m)	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w_p	w_L	I_p	I_L	e	c (kPa)	ϕ (degré)
1	2	22	18,6	27,4	15,2	35,7	16,6	19,1	0,28	0,8	50	18
	4	17,5	16,8	27,2	14,3	27,6	16	11,6	0,13	0,9	30	23
	6	17,8	16,5	27,1	14	27,8	17	10,8	0,07	0,94	28	24
	8	16,6	16,1	27,3	13,8	28,6	15,4	13,2	0,09	0,98	30	23
	10	17,4	16,6	27,1	14,1	25,6	15,7	9,9	0,17	0,92	32	22
2	1	20,3	18,2	26,6	15,1	25,7	22,1	3,6	-0,5	0,76	0,1	35
	2	20,2	18,4	26,7	15,3	26,2	20	6,2	0,03	0,74	0,1	35
	3	17,4	18,3	26,7	15,6	26,8	20,2	6,6	-0,42	0,70	0,1	32
	4	23,5		26,9	13,5	32,9	21,2	11,7	0,2	0,99	0,1	32
	6	12,1	18,7	26,7	16	24,6	18,6	6	-1,08	0,64	0,12	31
	7									0,64	0,08	32
	8					26,6	20,8	5,8				

Liste des paramètres du tableau :

z (m) : profondeur

w (%) : teneur en eau naturelle

 γ (kN/m³) : poids volumique du sol γ_s (kN/m³) : poids volumique des particules γ_d (kN/m³) : poids volumique du sol sec w_p : limite de plasticité w_L : limite de liquidité I_p : indice de plasticité I_L : indice de liquidité

e : indice des vides

c (kPa) : cohésion

 ϕ (degré) : angle de frottement interne

Trois pieux (1/1 à 1/3) ont été enfoncés dans le sol sur le site 1. La distance entre ces pieux a été choisie aussi petite que possible afin de limiter la dispersion des résultats que pourrait provoquer la variabilité des propriétés naturelles des sols, tout en évitant l'interaction des pieux. Les pieux d'essai en béton armé, de section 30 × 30 cm, ont été foncés par un mouton-diésel dont la partie mobile avait une masse de 1 250 kg, jusqu'à une profondeur de 3 m sous la surface du sol.

Étude des mouvements de la surface du sol (Pieu 1/1)

L'étude des phénomènes de refoulement du sol dus à son déplacement par le volume du pieu pénétrant dans le sol a été réalisée par nivellement de précision sur la surface parfaitement aplanie du site expérimental. On a placé pour cela des repères de nivellement à la surface du sol dans un quart de la zone supposée concernée par le soulèvement du sol. La disposition de ces repères par rapport au pieu d'essai est représentée sur la figure 6.

Pour éviter toute influence des charges dynamiques sur les repères de nivellement pendant les manœuvres des engins nécessaires au battage des pieux, le nivellement initial a été réalisé après la mise en place de l'engin de battage et du pieu à la position prévue. Après le battage et le retrait de l'engin de battage, on a effectué un nouveau nivellement des repères, à partir de deux stations placées sur deux repères installés à une distance de 30 m du pieu d'essai.

Afin d'obtenir des résultats de mesures fiables, le nivellement a été fait à partir de deux horizons. Le nivellement suivant a été réalisé un jour après la stabilisation du soulèvement du sol autour du pieu battu.

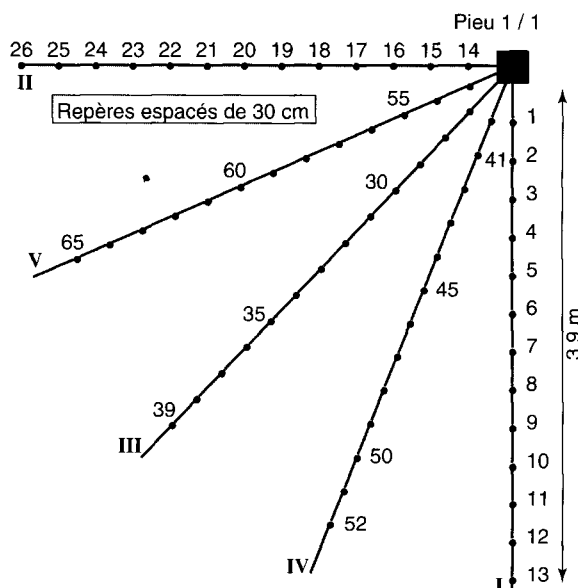


Fig. 6 - Disposition des repères de nivellement par rapport au pieu 1/1.

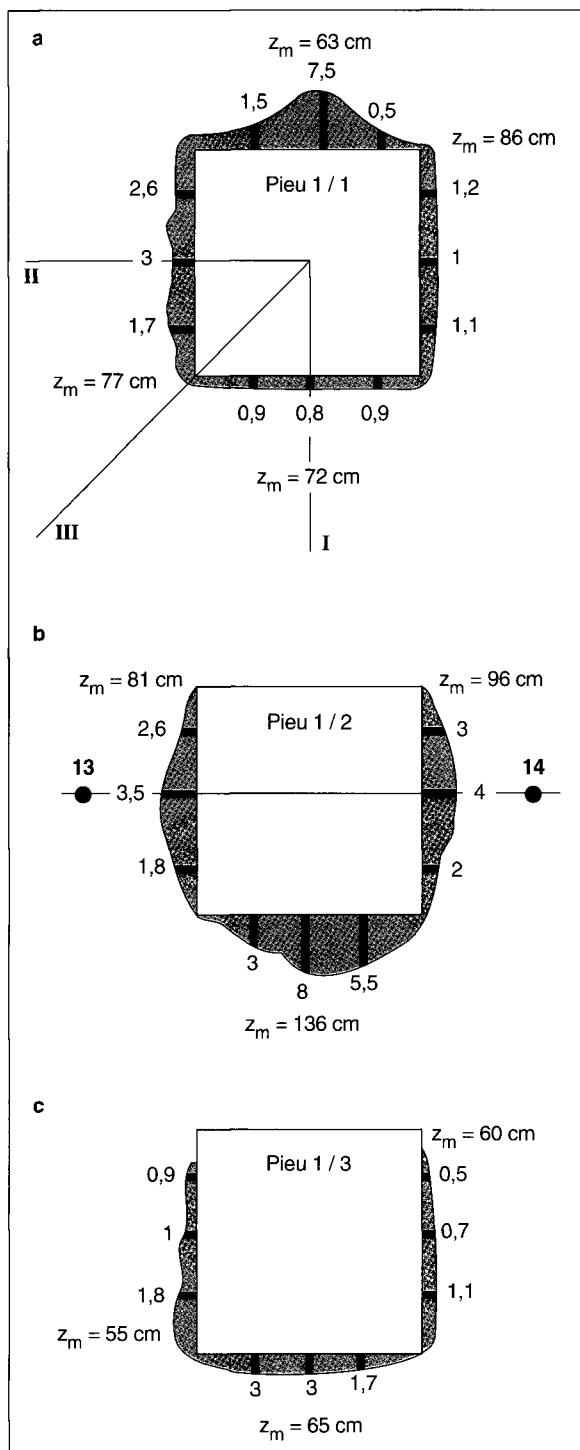
Étude des déplacements horizontaux (Pieu 1/2)

La détermination des amplitudes des déplacements horizontaux et de la zone de densification du sol lors de l'enfoncement du pieu a été effectuée autour d'un autre pieu de mêmes dimensions, battu à 10 m du premier.

À cette fin, on a réalisé sur le site choisi avant le battage du pieu, au moyen d'une installation de forage, des trous de 36 mm de diamètre et de 6 m de profondeur. La disposition des forages par rapport au pieu est indiquée sur la figure 7.



Fig. 9 - Forme et profondeur des vides observés entre les pieux et le sol



a - Pieu avec les repères topographiques de surface (1/1).

b - Pieu avec les forages remplis de résine (1/2).

c - Pieu avec les sondages de pénétration et de diagraphie (1/3)
 z_m - Profondeur maximale de l'espace séparant le pieu du sol.
 Les dimensions des vides dans le plan sont indiquées en centimètres. L'orientation des pieux est la même sur les figures 6 à 8.

Lors du battage des pieux d'essai, des vides sont apparus entre le sol et les pieux à leur partie supérieure. Les dimensions de ces vides sont représentées sur la figure 9.

Lorsque l'on utilise des méthodes de mesure de la diffusion de rayons gamma ou de neutrons dans les sols, l'interprétation repose sur l'utilisation de la relation linéaire entre l'intensité enregistrée du rayonnement gamma I_γ et la densité du milieu, d'une part, et de la relation linéaire entre la densité du flux des neutrons lents I_{nn} et la teneur en eau du milieu, d'autre part. L'étalonnage du fonctionnement des appareils de mesure a été une étape très importante de cette recherche, pour établir les relations $I_\gamma = f(\gamma)$ et $I_{nn} = f(w)$. Cet étalonnage a été effectué en place et en laboratoire sur le sol du site expérimental, en répétant de nombreuses fois toutes les mesures pour différentes densités et teneurs en eau du sol. Dans les deux cas, les mesures ont été faites dans des tubes de duralumin de mêmes dimensions que ceux utilisés pendant les essais.

Seconde étude des modifications de l'état du sol (Pieu 2/1)

Sur le second site expérimental, les travaux ont été exécutés selon les mêmes procédures que pour le troisième pieu du site 1. Les seules différences étaient que les mesures de teneur en eau et de densité du sol ont été réalisées avec des appareils de série (système neutronique de mesure de la teneur en eau et densimètre gamma-gamma) dans les trous de 36 mm de diamètre formés par l'enfoncement du pénétromètre, équipés de tubes de duralumin de faible épaisseur, et que les mesures ont été effectuées à différentes étapes du battage du pieu (enfoncement de 2, 4 et 5,5 m sous la surface du sol). Le pieu 2/1 est un pieu en béton armé de section 30×30 cm et de 6 m de longueur. La disposition des sondages de mesure par rapport au pieu est indiquée sur la figure 10.

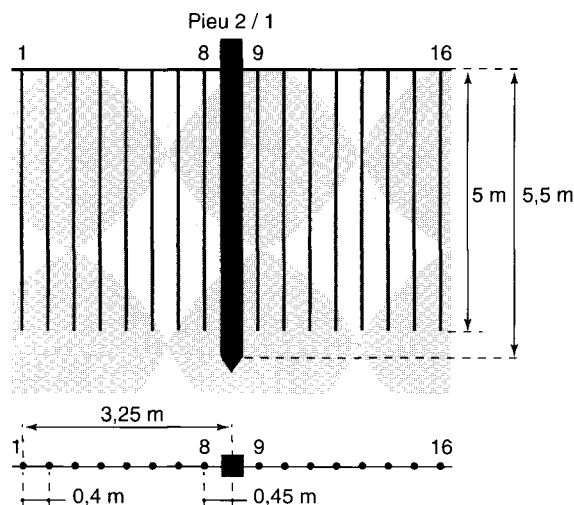


Fig. 10 - Disposition des sondages de mesure par rapport au pieu 2/1.

Résultats

Pieu 1/1

Le traitement des résultats des nivellements des repères disposés sur le site expérimental 1 dans le voisinage du pieu d'essai 1/1 (fig. 6) a permis d'obtenir les amplitudes des soulèvements de la surface du sol en fonction de la distance au pieu et leur variation dans le temps. Sur la figure 11 sont représentées les distributions des déplacements verticaux de la surface du sol sous l'effet de l'enfoncement du pieu, pour les différentes lignes de repères (I à V) disposées radialement par rapport au pieu. Comme on peut le voir sur les graphiques présentés, les déformations totales du sol ne se produisent pas immédiatement, mais évoluent pendant une assez longue période après la fin du battage du pieu, pour s'arrêter au bout de huit jours. Il faut noter que, dans les conditions de cette expérience, le soulèvement du sol est resté d'amplitude limitée, mais a concerné une assez grande surface, jusqu'à une distance du pieu de 4,05 mètres.

Le rayon de la zone de soulèvement du sol varie au cours du temps. Ainsi, par exemple, sur la ligne de mesure I, il valait 3 m juste après le battage, 3,3 m le quatrième jour, 3,6 m le sixième jour et 3,75 m le huitième jour. La croissance de la zone de soulèvement du sol au cours du temps a été observée sur toutes les lignes de mesure (fig. 11). La distance du pieu au point de soulèvement maximal du sol n'est pas non plus constante.

L'extrapolation à toute la surface du sol des résultats des mesures effectuées sur un quart de l'espace entourant le pieu permet d'établir le volume du sol soulevé par le pieu. Les résultats des calculs ont montré que ce volume, dans les conditions de l'expérience, est égal à environ $V_s = 0,025 \text{ m}^3$. Comme le volume global déplacé par le pieu est de $V_p = 0,27 \text{ m}^3$, le volume du sol soulevé représente 10 % de ce volume. Par conséquent, 90 % du volume du pieu sont absorbés par le compactage du sol autour du pieu.

L'allure générale des mouvements du sol montre qu'il existe des fissures assez importantes, en particulier dans les zones où le soulèvement du sol est maximal et où leur largeur atteint quelques millimètres, leur profondeur est de 5 à 10 cm et leur longueur de 50 centimètres.

Les données rassemblées au cours de l'expérimentation du pieu 1/1 n'ont permis de décrire que l'aspect externe du phénomène de déformation du sol lors du battage d'un pieu, tel qu'il peut être observé visuellement. Les processus qui se déroulent à l'intérieur du massif de sol n'ont pas été observés, ce qui a été l'objectif des expérimentations effectuées sur les pieux suivants.

Pieu 1/2

Pour ce pieu, la réalisation de forages remplis d'une résine urée-formol a permis de fixer l'allure de la distribution des déplacements horizontaux en profondeur à différentes distances du pieu. Après la fin de tous les travaux expérimentaux sur le site 1, le sol a été excavé soigneusement et l'on a mesuré les distances entre les positions initiales et finales des colonnes de résine, ce qui a permis d'obtenir une image qualitative des déformations horizontales du sol dans un plan diamétral du pieu.

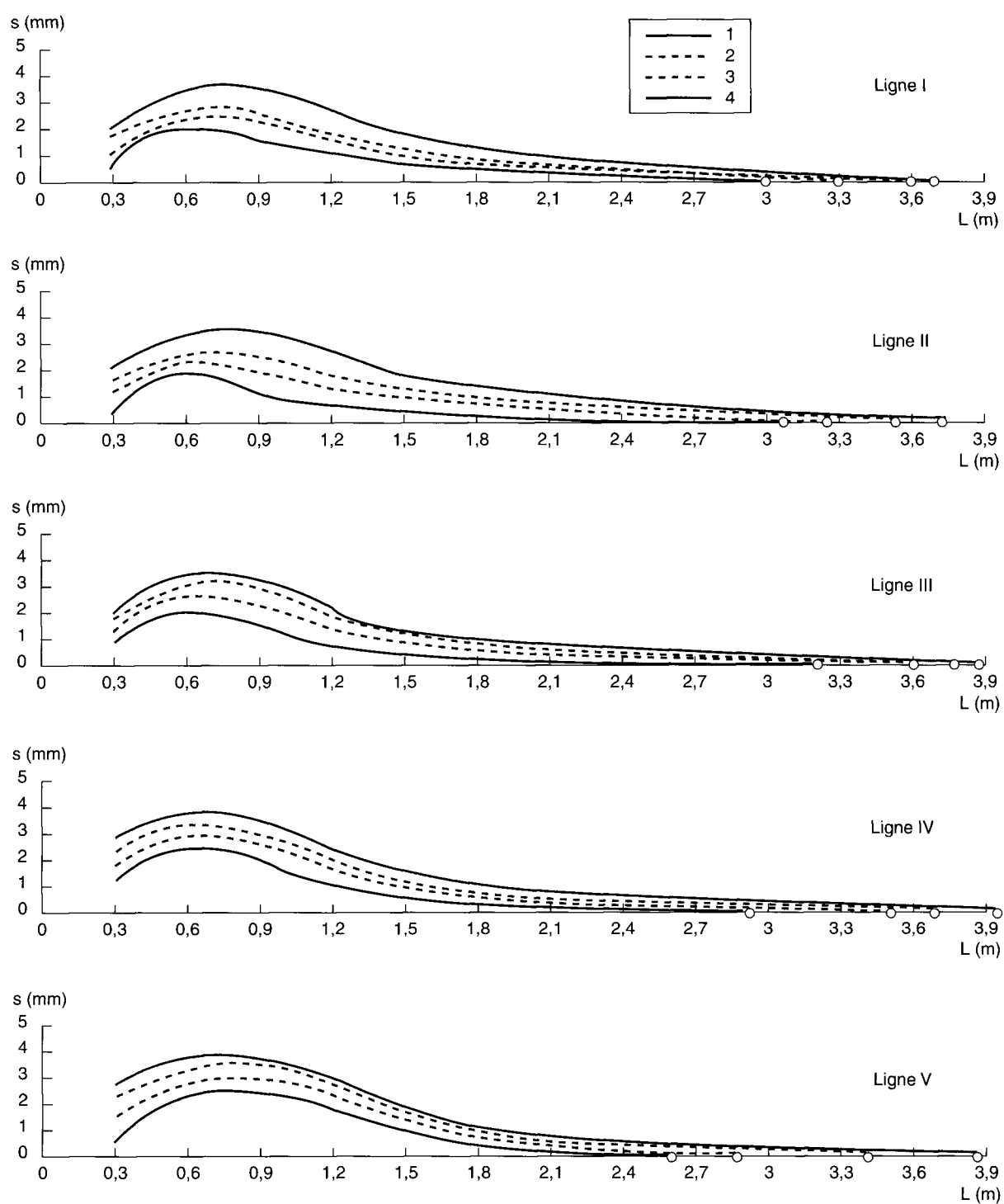
La figure 12 présente l'allure générale des déplacements horizontaux du sol provoqués par le battage du pieu (tableau III). On observe que la zone d'extension des déformations du sol est assez importante, tant verticalement qu'horizontalement. En profondeur, elle s'étend jusqu'à environ six diamètres du pieu et, horizontalement, elle s'étend sur environ huit diamètres. Il faut garder à l'esprit toutefois que ces résultats correspondent à la zone d'extension des déformations plastiques (irréversibles) du sol, qui sont les seules que l'on peut observer par cette méthode. Néanmoins, ces résultats ont une importance pratique car la zone des déformations plastiques, ainsi mise en évidence, est associée à des modifications quantitatives des propriétés physiques et mécaniques des sols qui influent réellement sur la formation de la capacité portante du pieu battu. Ces données expérimentales peuvent aussi être utilisées pour l'étude des groupes de pieux, pour évaluer l'interaction des pieux lors du battage du groupe, et aussi leur fonctionnement sous charge à l'intérieur du groupe.

L'analyse de la distribution des déplacements horizontaux dans le massif de sol montre que la valeur maximale est atteinte à proximité de l'extrémité inférieure du pieu. Ensuite, quand on s'éloigne du pieu, le maximum commence par s'enfoncer en dessous du niveau de la pointe du pieu (forages 11 à 16 sur la figure 12), puis se déplace vers le haut pour rejoindre le niveau de la pointe du pieu (forages 5 à 10 et 17 à 22 sur la figure 12).

Les expérimentations sur modèles décrites plus haut ont aussi montré que le déplacement horizontal maximal du sol se produit au voisinage de l'extrémité inférieure du pieu.

Les recherches en site réel, comme les études sur modèles, ont montré que les déplacements horizontaux du sol à proximité immédiate de l'extrémité inférieure du pieu sont supérieurs à la moitié de la dimension transversale du pieu, c'est-à-dire au déplacement maximal imposé par le pieu dans la direction horizontale. Cette constatation confirme ce qui avait été déduit antérieurement sur le fait que, lors du fonçage du pieu, les couches de sol en contact avec le pieu sont entraînées vers le bas, ce qui augmente l'effet du compactage du sol dans cette partie du massif.

Fig. 11 - Soulèvements du sol provoqués par le battage du pieu



1. Juste après le battage - 2, 3, 4. Les 4e, 6e et 8e jours après le battage.

o. Point où les déformations sont nulles.

L. Distance entre le pieu et le i -ème repère de nivellement.

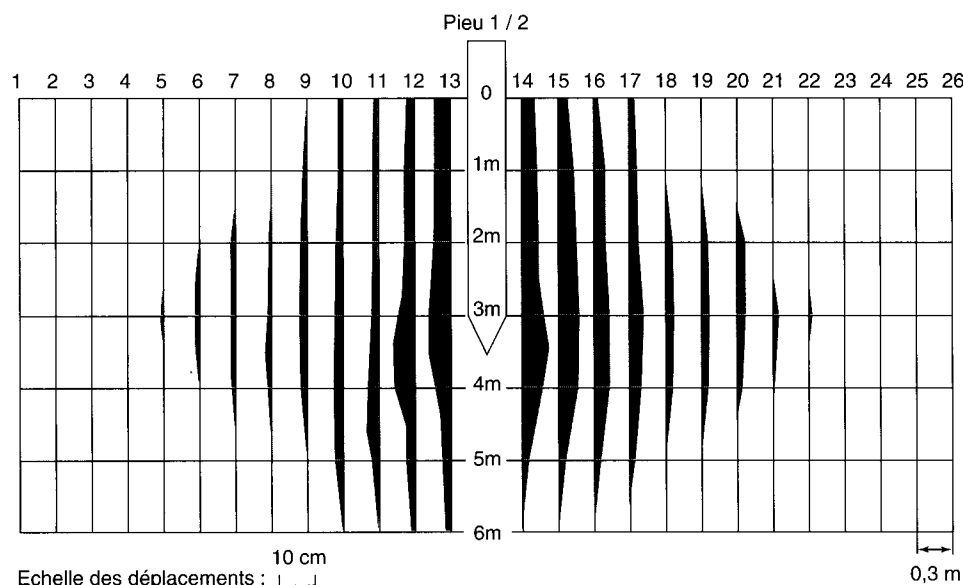


Fig. 12 -
Distribution des
déplacements horizon-
taux (en millimètres)
provoqués dans le
massif de sol par le
battage du pieu.

TABLEAU III - Déplacements horizontaux (cm) autour du pieu 1/2
(Les lignes correspondent aux 26 forages de mesure)

z (m)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
1-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	2	2	3	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	2	4	6	6	3	0	0	0	0
8	0	0	0	3	5	7	8	9	5	2	0	0	0
9	0	0	3	6	8	9	10	15	9	3	0	0	0
10	0	4	8	9	12	13	16	17	19	20	7	0	0
11	9	13	17	18	19	20	21	26	30	33	12	2	0
12	19	20	22	27	29	31	40	50	55	30	14	4	0
13	47	45	46	43	43	50	60	59	50	29	18	8	4
14	41	38	39	42	46	50	59	67	58	32	16	8	0
15	23	27	30	34	38	39	44	49	52	37	16	6	0
16	10	18	20	23	28	30	32	36	38	35	10	3	0
17	0	7	10	16	18	20	22	23	22	19	7	0	0
18	0	0	3	9	12	15	18	19	11	3	0	0	0
19	0	0	0	3	7	9	8	8	9	3	0	0	0
20	0	0	0	0	0	3	6	7	3	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	3	4	1	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
23-26													

Le dégagement du pieu a aussi montré qu'il se forme, autour de la surface de contact du pieu avec le sol, une gaine de sol fortement compacté, qui s'épaissit vers le bas pour atteindre une épaisseur de l'ordre de 2,5 à 3 cm au niveau de l'extrémité inférieure du pieu. Le sol compacté s'épaissit aussi le long des faces inclinées de la pointe du pieu. Par suite, la surface d'appui de l'extrémité inférieure du pieu et sa surface latérale augmentent, ce qui améliore la capacité du pieu à reprendre la charge qui lui est appliquée de l'extérieur.

L'attention est également attirée par le fait que les colonnes de résine situées à proximité immédiate du pieu (n° 12, 13, 14 et 15), c'est-à-dire dans la zone des déplacements horizontaux

maximaux, étaient intactes, tandis que les colonnes de résine n° 9 à 11 et 16 à 18 étaient endommagées en plusieurs endroits par le déplacement du sol. Cela indique que, à proximité immédiate du pieu, les déformations du sol ont évolué assez vite pendant la polymérisation de la résine, alors que les déformations des couches de sol plus éloignées du pieu ont continué à se développer après le durcissement, quand le matériau des colonnes de résine avait perdu sa plasticité et était devenu fragile, ce qui a provoqué sa rupture dans les endroits où les contraintes étaient maximales. Cela confirme l'évolution du processus de refoulement du sol représenté sur la figure 11.

TABLEAU IV
Variations de la teneur en eau du sol d'après les résultats des mesures effectuées
avant et après le battage du pieu

Profondeur de mesure (m)	Teneur en eau absolue w (%) (forage 1)	Variation de la teneur en eau du sol ($w_i - w_{ia}$) (%) entre les pieux i et ia								
		2 ; 2a	3 ; 3a	4 ; 4a	5 ; 5a	6 ; 6a	7 ; 7a	8 ; 8a	9 ; 9a	10 ; 10a
0,5	18,5	0,5	1,0	1,2	- 0,3	- 0,5	- 1,0	- 0,5	0	0,0
1,0	19,2	1,0	1,5	1,8	0,7	- 0,75	- 1,0	- 1,5	- 0,5	0,0
1,5	19,8	1,5	1,8	3,0	0,2	- 2,0	- 1,3	- 2,0	- 0,6	0,0
2,0	20,0	2,4	3,6	2,4	1,8	- 0,3	- 0,5	- 1,5	- 0,3	0,0
2,5	20,2	2,4	4,2	2,0	1,5	0	0,3	0,75	0,0	0,0
3,0	21,3	4,5	4,2	2,2	1,0	0,3	0,3	0,5	0,0	0,0
3,5	-	4,3	4,5	3,0	1,5	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0
4,0	-	2,4	3,2	3,5	1,0	0,75	0,0	0,0	0,0	0,0
4,5	-	1,5	2,0	1,5	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
5,0	-	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

TABLEAU V
Variations du poids volumique du sol d'après les résultats des mesures effectuées
avant et après le battage du pieu

Profondeur de mesure (m)	Poids volumique γ (kN/m ³) (forage 1)	Variation du poids volumique du sol ($\gamma_i - \gamma_{ia}$) (kN/m ³) entre les pieux i et ia								
		2 ; 2a	3 ; 3a	4 ; 4a	5 ; 5a	6 ; 6a	7 ; 7a	8 ; 8a	9 ; 9a	10 ; 10a
0,5	17,1	0,4	0,3	0,8	0,7	- 0,2	- 0,1	- 0,1	0,0	0,0
1,0	17,3	0,6	0,5	0,4	0,2	- 0,3	- 0,4	- 0,2	0,2	0,0
1,5	17,5	1,0	1,0	0,9	0,4	- 0,4	- 0,3	- 0,1	0,0	0,0
2,0	17,0	1,2	1,0	0,8	0,5	- 0,2	- 0,1	- 0,1	0,0	0,0
2,5	16,8	1,4	1,2	0,8	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
3,0	16,6	1,5	1,1	1,1	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
3,5	-	1,4	1,5	1,4	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
4,0	-	0,6	0,7	1,5	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
4,5	-	0,2	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5,0	-	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

TABLEAU VI
Variations de la résistance du sol sous le cône de la sonde,
d'après les résultats des mesures effectuées avant et après le battage du pieu

Profondeur de mesure (m)	Résistance de cône q_p (MPa) (forage 1)	Variation de la résistance de cône ($q_{pi} - q_{pia}$) (kPa) entre les pieux i et ia								
		2 ; 2a	3 ; 3a	4 ; 4a	5 ; 5a	6 ; 6a	7 ; 7a	8 ; 8a	9 ; 9a	10 ; 10a
0,5	2,1	500	375	375	- 100	- 150	0	0	0	0
1,0	2,5	940	560	500	- 200	100	- 200	- 100	0	0
1,5	3,35	1 000	625	750	- 300	- 50	- 400	- 200	- 100	0
2,0	3,6	1 020	500	500	0,0	- 375	- 470	- 300	- 150	- 50
2,5	3,75	1 150	475	450	350	- 350	- 200	- 100	- 50	0
3,0	4,3	1 125	500	450	250	- 200	- 100	- 50	0	0
3,5	4,9	1 000	687	500	180	- 100	0	0	0	0
4,0	5,0	625	625	550	100	0	0	0	0	0
4,5	5,5	300	430	300	0	0	0	0	0	0
5,0	6,5	0	180	100	0	0	0	0	0	0

Pieu 1/3

Les conclusions de l'expérimentation réalisée sur le pieu entouré de forages remplis de résine ont été confirmées par les études effectuées sur le troisième pieu, dans les mêmes conditions de sol, afin de déterminer les variations de certaines caractéristiques physiques du sol lors du battage du pieu.

La comparaison des résultats des mesures de teneur en eau, de poids volumique et de résistance du sol à l'enfoncement de la sonde pénétrométrique, avant et après le battage du pieu, à différentes distances du pieu, a permis d'évaluer les variations de ces caractéristiques et, par suite, du compactage du sol entourant le pieu. La disposition des sondages de pénétration et de diagraphie a été fixée en spirale afin de limiter l'influence des sondages les uns sur les autres, tout en les rapprochant le plus possible pour limiter les effets défavorables de la dispersion des résultats du fait de l'hétérogénéité du sol, et aussi pour obtenir des valeurs moyennes au cas où le pieu se serait écarté de façon imprévue de la verticale lors du battage.

Les résultats des mesures des variations de certains paramètres physiques et mécaniques du sol du fait du battage du pieu sont présentés dans les tableaux IV à VI, ainsi que sur la figure 13.

Le tableau IV et la figure 13 (partie droite) montrent les variations de la teneur en eau du sol le long des sondages avant (w_i) et après (w_{ia}) le battage du pieu, sous la forme de $\Delta w = w_i - w_{ia}$. À titre de comparaison, le tableau IV donne les valeurs absolues des teneurs en eau w mesurées dans le forage 1, à l'emplacement du pieu.

Les résultats des mesures ont montré que le battage du pieu et la compression du sol par le corps du pieu font diminuer la teneur en eau du sol. La valeur maximale de Δw le long des sondages 2 et 2a vaut 4,5 % et la variation maximale de la teneur en eau w est observée au niveau de l'extrémité inférieure du pieu, avec une tendance à la diminution quand on s'éloigne du pieu jusqu'aux sondages 4 et 4a. Ensuite, on observe une diminution rapide de Δw et, à partir du sondage 6/6a, une certaine augmentation de la teneur en eau par rapport à sa valeur initiale, mesurée avant le battage du pieu. Cela signifie que la densification du sol à proximité immédiate du pieu expulse l'eau libre vers les couches périphériques du sol, en augmentant la teneur en eau dans cette zone. On peut aussi noter, dans les sondages 6, 6a, 7, 7a, 8 et 8a, que la valeur de Δw change de signe pour une profondeur approximativement égale à 2,5 m par rapport à la surface du sol et que la diminution de la teneur en eau continue au-delà.

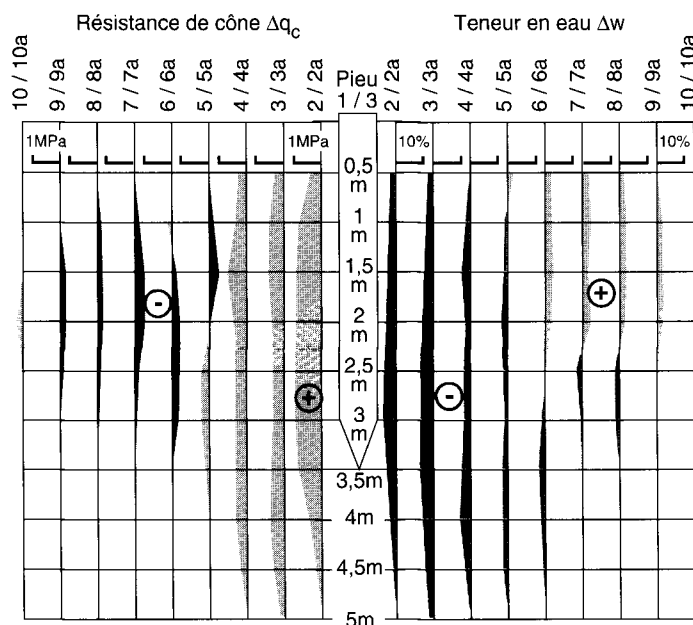


Fig. 13 - Variations de la résistance du sol sous la pointe de la sonde (q_p), de la teneur en eau (w) et du poids volumique (γ) dans le massif de sol provoquées par le battage du pieu 1/3.

L'enfoncement du pieu provoque aussi une modification du poids volumique du sol (tableau V). Ici, comme dans le cas précédent, les variations les plus importantes de $\Delta \gamma = \gamma_i - \gamma_{ia}$ sont observées au niveau de l'extrémité inférieure du pieu et diminuent quand on s'éloigne du pieu en dessous de la pointe. À partir des pieux 6 et 6a, on note une diminution du poids volumique du sol dans le volume situé entre la surface du sol et 2,5 m de profondeur, mais l'augmentation subsiste au-delà de cette profondeur.

Le tableau VI et la figure 13 (partie gauche) présentent les variations de la résistance du sol $\Delta q_c = q_{ci} - q_{cia}$ sous le cône de la sonde de 50 mm de diamètre, telles qu'elles ont été mesurées par le dispositif de pénétration et de diagraphie. À proximité immédiate du pieu (sondages 2 et 2a), ces variations atteignent des valeurs très importantes, avec un maximum de $\Delta q_c = 1\,150$ kPa. La distribution globale des variations de q_c est identique à celles de w et γ .

Conclusion

On peut affirmer que, lors du battage du pieu, la transmission des pressions dynamiques au sol est assurée par l'intermédiaire de l'extrémité inférieure du pieu, avec un certain angle β par rapport à la verticale qui dépend à l'évidence de la capacité du sol à redistribuer la charge extérieure et que ce sont ces charges qui provoquent des modifications des caractéristiques physiques et chimiques du sol.

Ceci étant, le compactage du sol à proximité immédiate du pieu provoque la formation d'un noyau de sol fortement compacté qui a une forme de poire pour les sables et une forme approximativement cylindrique pour les argiles (fig. 2 et 5), et dont l'agrandissement lors du battage du pieu conduit au soulèvement d'un certain volume de sol de forme géométrique complexe au-delà de ses limites.

Ce domaine de soulèvement du sol est caractérisé par l'existence de déplacements horizontaux de même signe (fig. 4 et 12) qui accompagnent le décompactage du sol, dont témoigne la diminution de la résistance du sol à l'enfoncement de la sonde, la diminution de son poids volumique et l'accroissement de la teneur en eau. Les variations de q_p , w et γ peuvent être considérées comme stabilisées dans la mesure

où leurs valeurs masquent l'hétérogénéité du sol avec la profondeur et en plan, qui existe dans tous les massifs de sols réels, et sont plus fortes que ces variations dans les conditions de cette expérience.

Pieu 2/1

Les tableaux VII à IX donnent les variations du poids volumique du sol aux trois étapes de l'enfoncement du pieu 2/1 (2 m, 4 m et 5,5 m). Ces variations du poids volumique du sol en profondeur et latéralement sont représentées sur la figure 14. Ces résultats confirment ceux obtenus sur le pieu 1/3 du site expérimental 1 (fig. 13), avec des indications supplémentaires sur la façon dont ces variations se développent lors de l'enfoncement du pieu.

TABLEAU VII
Variations du poids volumique du sol d'après les mesures effectuées avant et après le battage du pieu, à différentes étapes du chargement (enfoncement du pieu : 2 m)

Profondeur de mesure (m)	Variation du poids volumique du sol ($\Delta\gamma = \gamma_{oi} - \gamma_i$) (kN/m ³) dans les différents sondages															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,5				0,0	-0,48	-0,20	0,30	0,4	0,64	0,32	-0,24	-0,16	0,0			
1				0,0	-0,36	-0,32	0,36	1,2	1,48	0,3	-0,48	-0,36	0,0			
1,5				0,0	-0,24	-0,28	0,6	2,0	2,24	0,96	-0,44	-0,32	0,0			
2				0,0	-0,32	0,4	1,2	2,8	3,04	1,2	0,14	-0,20	0,0			
2,5					0,0	0,36	0,72	1,52	1,72	1,64	0,56	0,0				
3						0,0	0,56	0,64	0,80	0,6	0,2	0,0				
3,5																
4																
4,5																
5																
5,5																
6																
6,5																
7																
7,5																

TABLEAU VIII
Variations du poids volumique du sol d'après les mesures effectuées avant et après le battage du pieu, à différentes étapes du chargement (enfoncement du pieu : 4 m)

Profondeur de mesure (m)	Variation du poids volumique du sol ($\Delta\gamma = \gamma_{oi} - \gamma_i$) (kN/m ³) dans les différents sondages															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,5				-0,20	-0,88	-0,60	0,40	0,0	0,68	0,0	-0,24	-1,0	-0,16			
1				-0,20	-0,60	-0,48	0,60	1,2	1,72	0,50	-1,0	-0,8	-0,20			
1,5				-0,08	-0,30	-0,40	0,64	2,4	2,48	1,08	-0,84	-0,60	-0,08			
2				0,0	-0,32	0,72	1,08	2,24	3,48	1,72	0,20	-0,32	0,0			
2,5				0,32	0,40	0,48	1,52	2,08	3,12	2,12	1,10	0,32	0,24			
3				0,20	0,40	0,52	1,28	2,12	2,94	2,32	0,96	0,60	-0,32			
3,5				0,10	0,36	0,68	1,40	2,08	3,08	2,24	1,04	0,36	-0,10			
4				0,0	0,64	0,80	1,56	2,36	3,28	1,84	1,10	0,68	0,40			
4,5					0,56	1,12	0,40	0,88	1,64	1,62	1,16	0,72	0,16			
5							0,0	0,32	0,60	0,44	0,16	0,0				
5,5								0,0	0,0	0,0	0,0					
6																
6,5																
7																
7,5																

TABLEAU IX

Variations du poids volumique du sol d'après les mesures effectuées avant et après le battage du pieu, à différentes étapes du chargement (enfouissement du pieu : 5,5 m)

Profondeur de mesure (m)	Variation du poids volumique du sol ($\Delta\gamma = \gamma_{oi} - \gamma_i$) (kN/m ³) dans les différents sondages															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,5	0,0	-0,44	-0,40	-0,92	-0,60	-0,92	0,20	0,30	0,80	0,0	-1,08	-0,80	-0,56	-0,04	-0,08	0,0
1	0,0	-0,28	-0,04	-0,56	-0,80	-0,80	1,20	1,60	2,12	0,72	-1,40	-0,84	-0,72	-0,20	-0,28	0,0
1,5	0,0	0,0	-0,20	-0,40	-0,44	-0,76	0,56	2,68	2,88	1,32	-1,08	-0,64	-0,80	-0,44	-0,44	0,0
2	0,0	-0,16	-0,20	-0,24	-0,52	0,0	1,40	2,84	3,12	1,80	-0,64	-0,64	-0,44	-0,36	-0,44	0,0
2,5	0,0	-0,20	-0,32	-0,40	-0,56	1,12	1,88	2,96	3,64	2,60	1,76	-0,40	-0,20	0,00	-0,24	0,0
3	0,0	-0,28	-0,60	-0,48	-0,44	0,88	1,90	2,80	3,50	2,60	1,48	-0,52	-0,56	0,10	0,16	0,0
3,5	0,0	-0,48	0,16	-0,28	0,0	0,80	1,88	2,92	3,68	2,44	1,32	-0,12	-0,52	-0,48	-0,50	0,0
4	0,0	0,0	-0,32	-0,16	0,68	1,20	1,92	2,96	3,48	2,20	1,56	1,00	-0,36	-0,24	-0,24	0,0
4,5	0,0	0,40	-0,20	-0,20	0,80	1,44	1,76	2,56	3,16	2,00	1,28	-0,80	-0,32	-0,20	-0,12	0,0
5				0,0	0,80	1,32	1,60	2,56	3,20	1,60	0,80	0,64	-0,20	-0,10	0,0	0,0
5,5				0,0	0,72	1,10	1,56	3,00	3,40	1,84	0,84	0,36	0,0			
6				0,0	0,92	1,40	1,68	1,60	1,56	1,04	0,32	0,0	0,0			
6,5					0,0	0,64	0,88	0,80	0,32	0,52	0,12	0,0				
7					0,0	0,24	0,32	0,20	0,16	0,08	0,0					
7,5																

Comme on peut le voir sur la figure 14, dès le début de l'enfoncement du pieu dans le sol se forment une zone de compression et une zone de refoulement, avec un compactage du sol dans la première et une augmentation de volume du sol dans la seconde.

La zone de compression est assez homogène dans tout son volume et dans toute cette zone se produisent uniquement des phénomènes de densification du sol et d'amélioration de ses propriétés physiques et mécaniques.

Les variations en plus ou en moins du poids volumique du sol ($\Delta\gamma = \gamma_{oi} - \gamma_i$) dans la zone de refoulement témoignent du fait que cette zone n'est pas homogène en densité et qu'elle comporte des noyaux de sol compacté dans une dominante de gonflement.

Lorsque l'on enfonce le pieu dans le sol, les dimensions de la zone de refoulement augmentent tant verticalement qu'horizontalement, comme les dimensions de la zone de densification. Le poids volumique du sol varie en conséquence, en dépassant parfois un peu les valeurs maximales au niveau de la pointe du pieu lors de certaines étapes de l'enfoncement du pieu.

L'étude des variations de la teneur en eau dans le massif de sol dans les mêmes forages a montré que la teneur en eau w du sol varie en même temps que le poids volumique (tableaux X à XII et fig. 15). Dans le sol peu humide et à forte porosité du site expérimental, ces variations ($\Delta w = w_{oi} - w_i$) ont atteint des valeurs assez fortes (jusqu'à $\Delta w = 5 \%$).

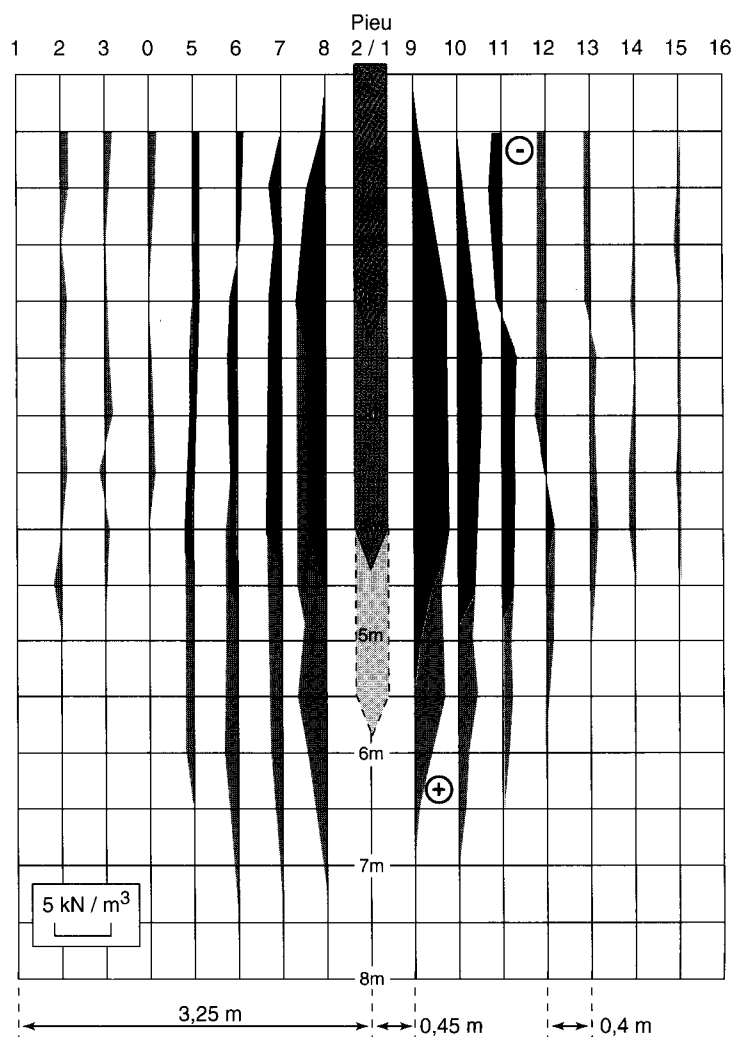


Fig. 14 - Variations du poids volumique du sol sous l'effet du battage du pieu, à différentes étapes de l'enfoncement de ce pieu.

TABLEAU X

Variations de la teneur en eau du sol d'après les mesures effectuées avant et après le battage du pieu, à différentes étapes du chargement (enfouissement du pieu : 2 m)

Profondeur de mesure (m)	Variation de la teneur en eau du sol ($\Delta w = w_{oi} - w_i$) (%) dans les différents sondages															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,5						0,0	0,4	0,9	1,5	0,2	-0,4	-1,0	0,0			
1		0,0	0,2	-0,2	-0,5	-0,2	0,6	2,0	3,1	1,3	-0,9	-1,5	0,0			
1,5		0,0	0,6	-0,4	-0,9	-0,8	1,4	2,4	3,3	1,8	-0,6	-0,9	0,2	0,4	0,0	
2			0,0	0,3	-0,8	-0,9	1,5	4,3	5,0	2,1	-1,1	-0,1	0,4	0,3	0,0	
2,5				0,0	0,5	0,0	2,0	2,0	2,7	2,2	0,3	-0,2	0,0	0,0		
3				0,0	0,1	0,5	0,8	1,0	0,7	0,3	0,0					
3,5							0,0	0,2	0,0	0,0						
4																
4,5																
5																
5,5																
6																
6,5																
7																
7,5																

TABLEAU XI

Variations de la teneur en eau du sol d'après les mesures effectuées avant et après le battage du pieu, à différentes étapes du chargement (enfouissement du pieu : 4 m)

Profondeur de mesure (m)	Variation de la teneur en eau du sol ($\Delta w = w_{oi} - w_i$) (%) dans les différents sondages															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,5			-0,1	-0,2	-1,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,2	-1,1	-1,5	-0,4	0,0		
1		0,0	-0,2	-0,4	-1,4	-0,6	1,0	2,4	3,5	1,7	-1,0	-1,4	-0,3	0,0		
1,5		0,3	0,5	-0,8	-1,0	-1,1	1,7	3,4	4,1	2,0	-1,1	-1,4	-0,6	0,3	0,4	
2		0,0	0,3	0,8	-1,1	-1,4	2,0	4,5	4,3	2,5	-1,0	-0,6	0,5	0,4	0,0	
2,5		0,0	0,2	0,3	-0,3	-0,4	2,3	3,1	4,3	2,6	-0,4	-0,6	-0,5	0,1	0,0	
3					0,2	1,1	1,4	2,1	4,0	1,8	0,3	-0,4	-0,3	0,0		
3,5					0,4	0,9	1,8	3,3	4,1	2,0	0,4	-0,3	0,0			
4					0,0	0,9	1,6	4,0	4,5	1,9	0,6	0,2	0,4	0,0		
4,5					0,0	0,9	1,9	2,0	2,5	2,2	0,4	0,3	0,0			
5					0,0	0,4	0,6	0,7	0,9	0,7	0,4	0,2	0,0			
5,5						0,1	0,1	0,3	0,4	0,3						
6																
6,5																
7																
7,5																

TABLEAU XII

Variations de la teneur en eau du sol d'après les mesures effectuées avant et après le battage du pieu, à différentes étapes du chargement (enfouissement du pieu : 5,5 m)

Profondeur de mesure (m)	Variation de la teneur en eau du sol ($\Delta w = w_{oi} - w_i$) (%) dans les différents sondages															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,5		0,0	-0,2	-0,3	-0,6	-0,5	-0,4	1,0	1,6	0,8	-1,1	-0,7	-0,5	0,0		
1		0,0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,0	0,0	2,6	3,8	2,1	-0,7	-1,0	-0,6	0,0		
1,5		0,0	-0,5	-0,9	-1,5	-0,5	1,8	4,0	4,5	2,6	-1,3	-1,6	-0,5	0,0		
2		0,0	-0,2	-0,8	-1,8	-1,8	2,8	4,4	5,0	3,0	-1,0	-0,8	-0,7	0,0		
2,5		0,0	-0,1	-0,4	-0,5	-1,0	2,1	3,4	4,6	2,5	-0,5	-0,6	-0,5	0,0		
3		0,0	-0,1	-0,4	-0,8	-0,6	2,1	3,3	4,6	2,5	-0,5	-0,5	-0,4	0,0		
3,5			0,0	-0,2	-0,4	-0,4	2,3	3,9	4,6	2,9	-0,9	-0,4	-0,3	0,0		
4			0,0	-0,2	-0,4	1,1	2,1	3,8	4,6	2,8	1,1	-0,4	-0,5	0,0		
4,5			0,0	0,4	0,6	0,8	1,7	3,9	4,0	3,0	1,1	-0,4	-0,5	0,0		
5			0,0	0,4	0,5	1,0	2,1	4,0	3,7	2,5	1,2	0,4	0,3	0,0		
5,5			0,0	0,2	0,4	1,0	2,0	4,0	4,1	1,9	0,9	0,1	0,0			
6			0,0	0,2	0,4	1,0	1,9	3,8	4,0	0,9	0,1	0,0	0,0			
6,5					0,0	0,4	2,1	0,9	1,3	0,7	0,0	0,0				
7						0,1	0,6	0,4	0,6	0,3	0,0					
7,5						0,0	0,0	0,0	0,0							

On a aussi noté une forte diminution de la teneur en eau dans les forages 8 et 9, qui sont les plus rapprochés du pieu, et une diminution plus faible dans les forages 7 et 10. Plus loin du pieu, à partir des sondages 6 et 11, on observe une augmentation de la teneur en eau dans la partie supérieure du sol, à l'intérieur de la zone de refoulement, tandis qu'à l'extrémité inférieure de ces forages la tendance à la diminution de la teneur en eau persiste. Les valeurs maximales de Δw coïncident globalement avec les valeurs maximales de $\Delta \gamma$ et leur évolution au cours de l'enfoncement du pieu est semblable. L'attention est attirée par le fait qu'il n'y a pas d'équilibre dans le massif de sol entre les diminutions et les augmentations de la teneur en eau après la fin du battage du pieu. Cela est lié, semble-t-il, au fait qu'une quantité importante d'eau libre s'accumule au contact entre l'enveloppe de sol compacté du pieu et le reste du sol, à cause du remaniement de ce dernier sous la pointe du pieu et de la formation possible de fissures dans la zone de refoulement du sol, en dehors des zones où les mesures ont été effectuées.

Conclusion

Les recherches effectuées sur des pieux modèles dans une cuve plane et dans une cuve tridimensionnelle remplies de sable et d'argile et sur le terrain, avec des pieux en vraie grandeur, permettent de tirer les conclusions suivantes :

- ① Lors de l'enfoncement du pieu dans le sol, le volume du sol chassé par le corps du pieu produit une densification importante du sol qui entoure le pieu dans une zone qui a une géométrie différente suivant le type de sol. Pour les sols sableux, la zone de compactage a une forme de poire, tandis que pour les sols argileux elle est proche d'un cylindre.
- ② Parallèlement au compactage du sol, se produit un refoulement d'une autre partie du sol dans la partie supérieure du massif et plus loin du pieu, jusqu'à une distance supérieure à la longueur du pieu dans le sol. Le volume de cette zone dépend de la densité et de la teneur en eau du sol, ainsi que de la forme du pieu.
- ③ Pour les pieux pyramidaux, la zone de refoulement du sol est plus petite que la zone de refoulement autour des pieux de section constante, tandis que la zone de densification est plus grande, ce qui témoigne du fait que la forme du pieu influe sur le processus de compactage du sol voisin du pieu et sur la formation de sa capacité portante.

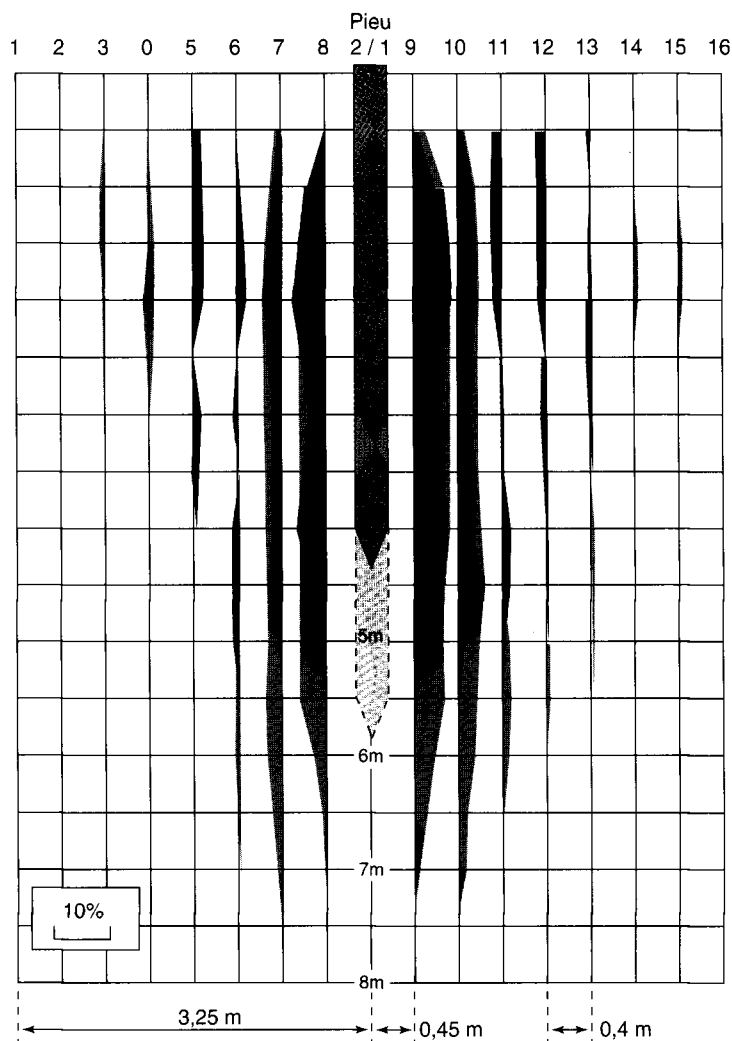


Fig. 15 - Variations de la teneur en eau w du sol provoquées par le battage du pieu à différentes étapes de son enfoncement.

- ④ Lors de l'enfoncement du pieu dans le sol, des contraintes verticales et horizontales se développent et provoquent des déformations verticales et horizontales importantes dans les couches du sol. En valeur absolue, les déformations verticales sont plus grandes que les déformations horizontales à proximité immédiate du pieu dans la zone de compactage du sol et sont dirigées vers le bas, tandis que dans la zone de refoulement elles sont dirigées vers le haut. Les déplacements horizontaux sont tous dirigés dans le même sens et diminuent rapidement quand on s'éloigne du pieu.
- ⑤ La zone compactée du sol sous la pointe du pieu s'étend jusqu'à une profondeur de l'ordre de $5d$ et, latéralement, elle s'étend jusqu'à $3d$ à $4d$. La zone déformée par l'enfoncement du pieu s'étend globalement dans la direction horizontale jusqu'à une distance de $6d$ à $8d$ dans les conditions de ces expériences.

- ⑥ Le processus de déformation du sol se prolonge pendant un temps assez long après le battage du pieu, en fonction du type et de l'état du sol (densité, teneur en eau, etc.).
- ⑦ La zone de sol compacté à proximité du pieu a une densité variable, avec un maximum au niveau de l'extrémité inférieure du pieu et une diminution quand on s'éloigne du pieu.
- ⑧ La zone de refoulement du sol est hétérogène en densité et on y trouve aussi bien des noyaux de sol compacté localement, avec des valeurs plus élevées du poids volumique, que des zones où le poids volumique du sol est plus faible, dans les zones où peuvent se former des cassures ou fissures.
- ⑨ Lors de l'enfoncement du pieu dans le sol par battage, se développent des contraintes dynamiques importantes qui provoquent une forte densi-

fication du sol à proximité immédiate du pieu et créent un gradient de charge dans l'eau interstitielle, ce qui provoque un écoulement horizontal vers les couches plus éloignées du sol et aussi vers le haut, vers les zones moins denses.

- ⑩ Lors de l'enfoncement d'un pieu dans un sol argileux, se forme autour du pieu une gaine de sol très dense, qui s'étend vers le bas du pieu et le glissement du pieu par rapport au sol avoisinant se produit de la sorte sur une surface latérale augmentée.

Ces observations expérimentales peuvent servir de référence pour la validation des modèles de calcul du comportement des massifs de sol autour des pieux et offrent une base quantitative pour la compréhension des phénomènes qui accompagnent le battage des pieux dans les sols.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAGUELIN F., BUSTAMANTE M., FRANK R., JÉZÉQUEL J.-F. (1975), La capacité portante des pieux, *Annales de l'ITBTP*, Supplément au n° 330, juil.-août, Série Sols et fondations, 116, pp. 1-22.

BRIAUD J.L., TUCKER L.M. (1988), Measured and predicted axial response of 98 piles, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 14, 9, pp. 984-1001.

BUSTAMANTE M., GIANESELLI L. (1981), Préviation de la capacité portante des pieux isolés sous charge verticale, Règles pressiométriques et pénétrométriques, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 113, pp. 83-108.

CAMBEFORT H. (1964), Essai sur le comportement en terrain homogène des pieux isolés et des groupes de pieux, *Annales de l'ITBTP*, 204, déc., Série Sols et fondations, 44, pp. 1477-1518.

HABIB P. (1953), Essais de charge portante de pieux en modèle réduit, *Annales de l'ITBTP*, 63-64, mars-avr., Série Sols et fondations, 13, pp. 361-366.

JANBU N. (1953), Une analyse énergétique du battage des pieux à l'aide de paramètres sans dimensions,

Annales de l'ITBTP, 63-64, mars-avr., Série Sols et fondations, 13, pp. 352-360.

KÉRISSEL J., ADAM M. (1962), Fondations profondes, *Annales de l'ITBTP*, 179, nov., Série Sols et fondations, 39, pp. 1053-1081.

LEBÈGUE Y. (1964), Étude expérimentale des efforts d'ancrage et de frottement négatif sur les pieux en milieu pulvérulent, *Annales de l'ITBTP*, 199-200, juil.-août, Série Sols et fondations, 42, pp. 808-822.

L'HERMINIER R. (1953), Remarques sur le poinçonnement continu des sables et graviers, *Annales de l'ITBTP*, 63-64, mars-avr., Série Sols et fondations, 13, pp. 377-386.

POGANY A. (1953), Phénomènes d'écoulement dans le cas des fondations sur pieux, *Annales de l'ITBTP*, 63-64, mars-avr., Série Sols et fondations, 13, pp. 387-389.

TCHENG Y. (1966), Fondations profondes en milieu pulvérulent à diverses compacités, *Annales de l'ITBTP*, 219-220, mars-avr., Série Sols et fondations, 54, pp. 331-360.

ABSTRACT

An experimental study of the behaviour of the soil during pile-driving

V. SHAKHIREV - J.-P. MAGNAN - H. EJJAAOUANI

The authors describe small-scale laboratory experiments and on-site experiments with real piles for the purpose of characterizing the kinetics of soil deformation during pile-driving. The laboratory experiments were conducted in flat or three-dimensional tanks filled with sand or clay, into which small-scale cylindrical or pyramidal piles were driven. They provided areas of horizontal and vertical displacement making it possible to quantify the mechanisms of the response of the soil to the large displacements of the pile. The full-scale experiments analysed changes in the surface of the soil, and its horizontal displacements, resistance to static penetration, water content and density during the driving of the full-scale piles. They revealed zones of compression and decompression of the soil, and the amplitude of the volume deformations and displacements. This data made it possible to understand the kinetics of the behaviour of the soil and can also serve as an experimental reference for testing numerical calculation procedures.