

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.

Expérimentation en laboratoire de la capacité portante des sols

Laboratory Experiments on the Bearing Capacity of Soils

R. L'HERMINIER, INGÉNIEUR E.P., *Directeur Technique du Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, France*

Y. TCHENG, DOCTEUR ÈS-SCIENCES, *Ingénieur en Chef au C.E.B.T.P., Paris, France*

Y. LEBEGUE, INGÉNIEUR E.T.P., *Chef de la Section "Recherches de mécanique des sols" du C.E.B.T.P., Paris, France*

SOMMAIRE

La communication porte sur deux sujets. Dans le premier, on étudie la capacité portante du sol sous des semelles filantes superficielles et semi-enterrées en insistant sur le terme de profondeur. Le dispositif expérimental original est décrit, puis les résultats sont exposés. Trois milieux, pulvérulent, cohérent et stratifié, sont expérimentés. Dans la gamme des milieux sableux étudiés, le coin formé sous la semelle et la vague de refoulement sont peu influencés par les variations de φ ; N_γ est plus élevé que sa valeur théorique, mais N_q en est voisin. Dans les milieux cohérents et dans certains cas de milieux stratifiés, on retrouve pour N_q la valeur théorique de 1. Enfin quand la profondeur de fondation est différente de part et d'autre de la semelle, la force portante correspond à la plus faible profondeur.

La deuxième partie concerne les efforts d'arrachage étendus au frottement négatif en milieu pulvérulent. Des sables différents et des écrans verticaux variés sont essayés. Avec des surfaces rugueuses, la courbe effort-déplacement comporte un maximum suivi d'un palier moins élevé indépendant de la densité originelle du milieu; le maximum qui est fonction de φ , est atteint après un déplacement relativement faible. Le phénomène tridimensionnel a été relié au phénomène plan.

SUMMARY

This paper deals with two subjects. In the first, the bearing capacity of soil under shallow strip footings is studied with special reference to the influence of depth. The original experimental apparatus is described, then the results are given. Three media, cohesionless, cohesive, and stratified, are tested. In the range of the sand media tested, the wedge under the footing and the length of the failure surface at ground level are not greatly influenced by variations of φ ; N_γ is higher than its theoretical value, but N_q agrees with the calculation. In cohesive media and in certain cases of stratified media, N_q is found to be equal to 1, its theoretical value. When the foundation depth is different on both sides of the footing, the bearing capacity agrees with the smaller depth.

The second part deals with pulling strength and negative friction in cohesionless material. Different sands and various vertical screens were tested. With rough surfaces the stress-displacement curve presents a maximum followed by a lower constant value independent of the density tested; the maximum which varies with φ is reached after a comparatively small displacement. The three-dimensional phenomenon was also studied.

CETTE COMMUNICATION COMPORTE DEUX PARTIES. Dans la première on étudie le terme de surface et surtout celui de profondeur dans le cas de fondations peu enterrées. La seconde partie concerne l'effort d'arrachage qui a été étendu au phénomène du frottement négatif.

I. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES FONDATIONS SUPERFICIELLES ET SEMI-ENTERRÉES

Selon la théorie de Caquot et Kérisel (1956) ou encore de Terzaghi (1943), lorsqu'on exerce un effort vertical poussé jusqu'à la rupture sur une semelle horizontale posée sur le sol, la résistance totale sous une semelle filante est avec les notations internationales:

$$q = \gamma(B/2)N_\gamma + \gamma DN_q + cN_c.$$

Bien des chercheurs et en particulier au C.E.B.T.P. (Habib et Tcheng, 1957 et 1961) ont étudié expérimentalement les fondations superficielles reposant tant sur un sol homogène que sur un terrain stratifié; l'influence de la profondeur de fondation est maintenant examinée dans notre laboratoire.

La formule rappelée plus haut montre que, pour une semelle de largeur fixée reposant sur un milieu donné, les points représentatifs de la contrainte de rupture en fonction de la profondeur doivent s'aligner sur une droite dont l'ordonnée à l'origine correspond au seul effet de surface et dont la pente est proportionnelle au coefficient du terme de profondeur.

Dispositif expérimental

On fonce une section de mur infini limitée par deux parois verticales d'une cuve remplie de matériau. Mais le mur se coince facilement entre les parois et son frottement latéral sur le terrain encaissant s'ajoute à la résistance propre du sol sous la semelle. Ceci nous a conduits à un modèle de semelle indépendante des parois latérales et divisée en trois parties, une centrale et deux latérales égales; ainsi la mesure des efforts sur la section centrale est affranchie des frottements parasites. La largeur des semelles varie de 2 à 10 cm.

Cette disposition conditionne la mesure des efforts sur la semelle. L'enfoncement, dont la vitesse est d'environ 1 mm par minute, est obtenu à l'aide d'un vérin mécanique et mesuré avec des comparateurs. Un premier anneau dynamométrique mesure la résistance totale opposée par le sol et transmet l'effort à une "contre semelle" constituée par une barre d'acier très rigide; de celle-ci partent trois tiges fixées aux trois sections de semelle. Un deuxième anneau dynamométrique fournit la réaction sous la partie centrale.

La semelle est disposée dans le plan axial de la cuve d'essais et perpendiculairement aux deux faces frontales qui sont en verre pour pouvoir observer le phénomène à l'intérieur du milieu. Les dimensions des cuves sont telles que les surfaces de rupture n'en atteignent ni le fond, ni les parois latérales. Leur largeur a la longueur des semelles, 20 cm; la plus grande cuve a 2 m de longueur et 1 m de hauteur. Enfin elles sont tapissées de caoutchouc.

Le milieu étudié est soit cohérent, grasse consistante, soit pulvérulent, sable de Leucate desséché, soit stratifié, en alternant ces matériaux. Le sable est constitué de grains arrondis, quartzeux de 0,4 à 0,8 mm de diamètre; il est mis en place par couches de 5 cm aux densités correspondant aux angles de frottement de 31, 35 et 38°; on opère par déversement avec un léger damage pour la plus forte compacité.

Résultats dans le cas du milieu pulvérulent

Observation. Grâce aux faces vitrées nous avons pu bien suivre le phénomène et avons pris des photos en cours d'essai. Au début se produit toujours un certain enfoncement de la semelle qui fait tasser le sol, la première couche de sable est légèrement poinçonnée à la limite de la fondation; certaines fois, avec des sables très lâches, la semelle agit en emporte-pièce. Peu à peu sous la fondation se forme un coin dont la pointe est dirigée vers le bas et qui refoule le milieu de part et d'autre; ce coin est toujours observé et subsiste même lors d'enfoncements considérables. L'angle de la pointe est à peu près constant quel que soit l'angle de frottement interne du milieu: habituellement compris entre 35 et 40°, il descend parfois à 30°; ces valeurs sont nettement inférieures à celles de la théorie: $\pi/2 - \varphi$.

Mais le refoulement du sol par le coin peut ensuite se présenter sous deux formes différentes. Avec les faibles profondeurs de fondation le déplacement des grains atteint la surface libre et les vagues de refoulement sont d'autant plus nettes que le milieu est plus serré; toutefois pour que le phénomène soit bien visible, un enfoncement important, de l'ordre de la largeur de la semelle, est nécessaire. Si le phénomène est toujours symétrique au début, il l'est rarement à la fin; souvent un basculement se produit et la surface de rupture n'apparaît nettement que d'un seul côté. Enfin il est curieux d'observer sur les poses que souvent une zone reste immobile au milieu des sections de massif refoulées.

Mais lorsque la semelle est fondée à plus grande profondeur, le déplacement des grains de part et d'autre du coin solidaire de la semelle ne se répercute plus jusqu'en surface; il est complètement absorbé par la déformabilité du milieu. Ceci se produit d'autant plus vite que le milieu est moins serré.

Surfaces de rupture. Leur allure correspond à peu près à la théorie, du moins lorsqu'elles sont visibles, et alors leurs dimensions sont mesurées.

A cause de la perturbation due au frottement sur les glaces et de la nécessité d'un enfoncement important pour voir apparaître le refoulement, la mesure de la profondeur maximale de la zone perturbée n'est pas précise. En général celle-ci semble descendre plus profondément que la théorie ne le ferait prévoir; ceci concorde avec le fait que sous la semelle le coin est plus effilé et descend plus bas.

Par contre la longueur de la vague de refoulement à la surface libre a pu être mesurée, du moins pour les semelles fondées directement en surface et à faible profondeur. Pour les fortes densités, sa longueur est sensiblement inférieure à la valeur théorique

$$L = B \sqrt{N_q} + D \tan(\pi/4 + \varphi/2)$$

par contre pour les sables peu compacts, elle est de même ordre de grandeur. En fait elle ne semble guère varier en fonction de l'angle de frottement interne; ainsi que le montre la fig. 1 donnant le rapport L/B en fonction de φ dans le cas de semelles filantes superficielles. Cette particularité s'accorde assez bien avec la constance de l'angle du coin formé sous la semelle.

Courbe effort-déplacement. Elle a une allure classique.

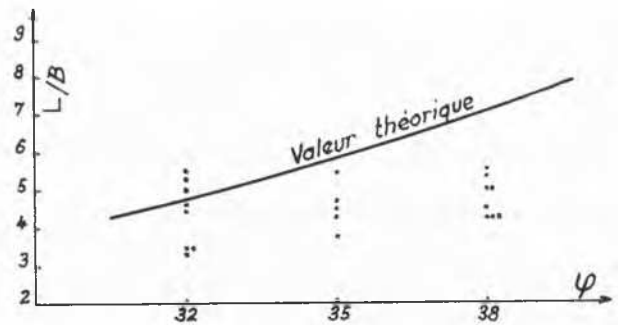


FIG. 1. Rapport L/B en fonction de φ pour des semelles superficielles.

Lorsque le milieu est serré, l'effort augmente rapidement, passe par un maximum avant de redescendre à un palier; si l'on poursuit l'enfoncement, la résistance augmente à nouveau. Par contre avec des sables peu compacts, le maximum et le palier sont à peine marqués.

L'effort maximal est atteint relativement vite. Surtout lorsque l'on a affaire à des milieux serrés, quelques millimètres suffisent, qui correspondent à un enfoncement relatif de la semelle de 5 à 10 pour cent. Par contre il faudrait plutôt avoir un enfoncement de 10 à 20 pour cent lorsque le refoulement est imparfait.

Effort maximal. Le dispositif expérimental nous a donné satisfaction et les résultats présentent une dispersion faible pour ce genre d'essais. L'effort maximal unitaire augmente bien avec la profondeur du niveau de fondation, avec la largeur de la semelle, et avec la densité du milieu, c'est-à-dire avec l'angle de frottement interne.

Les efforts maximaux mesurés ont toujours été supérieurs aux valeurs calculées. Une première analyse des courbes montrent que les points expérimentaux se groupent approximativement sur une parallèle à la courbe théorique; ceci indiquerait que le terme de profondeur correspond bien à sa valeur calculée, tandis que l'effet de surface dont la valeur est l'ordonnée à l'origine de la droite représentative, serait sous estimé. Ce dernier fait a du reste déjà été remarqué par de nombreux expérimentateurs.

Interprétation des essais. Pour mieux analyser les résultats, nous les avons groupés en faisant apparaître des coefficients sans dimension. Le rapport de la capacité portante limite au produit de la largeur de la semelle par le poids spécifique du

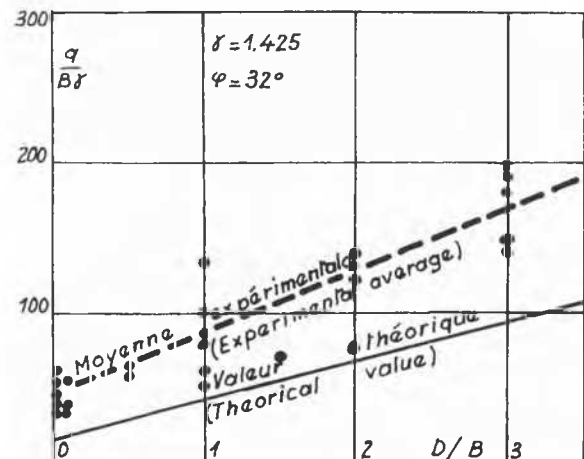


FIG. 2. Résultats des essais comparés avec les valeurs théoriques pour $\varphi = 32^\circ$.

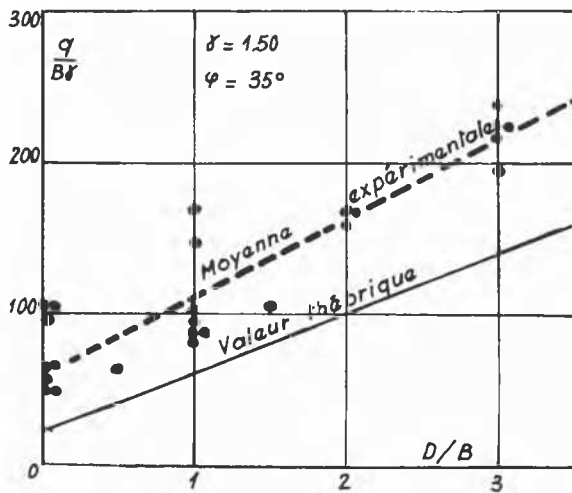


FIG. 3. Résultats des essais comparés avec les valeurs théoriques pour $\varphi = 35^\circ$.

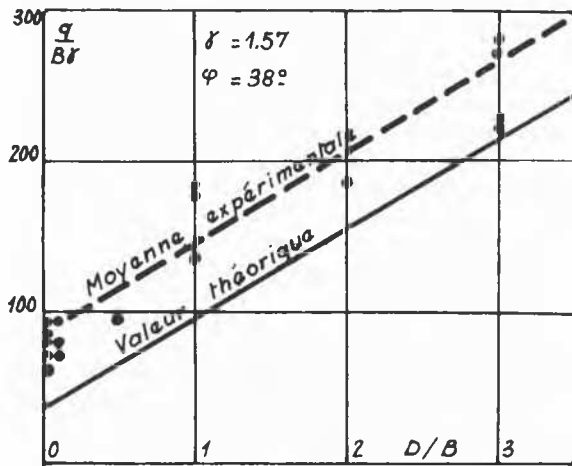


FIG. 4. Résultats des essais comparés avec les valeurs théoriques pour $\varphi = 38^\circ$.

milieu est dans un milieu purement pulvérulent une fonction linéaire de la profondeur relative dont l'ordonnée à l'origine a la valeur $N_\gamma/2$:

$$q/\gamma B = N_\gamma/2 + (D/B)N_q$$

Tous les résultats concernant les trois angles de frottement expérimentés 32, 35 et 38°, ont pu ainsi être groupés sur les figs. 2, 3 et 4. Une certaine dispersion apparaît encore; mais la statistique peut donner une définition plus précise de l'ensemble des points figuratifs. Nous avons déterminé la droite de régression correspondante.

Le "coefficient de corrélation," qui permet d'apprécier dans quelle mesure la liaison entre les deux variables peut être représentée par une droite, est supérieur à 0,9 dans les 3 cas, ce qui indique un bon degré de liaison linéaire. Les coefficients des termes de surface et de profondeur ainsi

TABLEAU I. LES COEFFICIENTS DES N_γ ET N_q

φ	N_γ		N_q	
	théorique	mesuré	théorique	mesuré
32°	31	92	26	41
35°	49	120	39	51
38°	81	170	59	59

obtenus sont résumés dans le tableau I sur lequel ont en outre été rappelées leurs valeurs théoriques; ils sont fort élevés: leur rapport avec les valeurs théoriques est compris entre 2 et 3 pour le terme de surface, et entre 1 et 1,5 pour celui de profondeur.

La première tentative serait de déterminer les angles de frottement correspondant à ces valeurs. Pour la plus faible densité utilisée, l'écart entre l'angle de frottement interne mesuré en laboratoire, 32°, et celui qui est fourni par le coefficient du terme de surface, 38° 1/2, est trop élevé. D'autre part on obtient des angles différents suivant que l'on part de l'un ou l'autre des coefficients mesurés. Cette comparaison ne mène donc à rien.

Les valeurs des termes de surface mesurés sont également nettement supérieures à celle que fournit l'analyse mathématique en tenant compte d'un angle de 40° à la pointe du coin formé sous la semelle; en ce cas les coefficients sont alors supérieurs d'environ 20 pour cent seulement à ceux que l'on obtient par le calcul. Par contre on atteindrait pratiquement les valeurs mesurées, si en pointe l'angle est seulement 30°, minimum observé au cours des essais.

Enfin l'augmentation de la densité intervient peut-être. Toutefois cette explication est insuffisante surtout pour les fortes densités; mais on remarque que c'est précisément dans ce cas que la différence entre les valeurs théorique et expérimentale est la plus faible.

Cas où la surface libre se trouve à des niveaux différents de part et d'autre de la fondation. Il est souvent rencontré; la plupart des bâtiments possède une cave et par suite la fondation des murs extérieurs se trouve à une profondeur différente par rapport au niveau de la cave et à celui de la rue.

L'allure du phénomène présente d'abord les mêmes caractéristiques que précédemment: lorsque la semelle s'enfonce, sous celle-ci peu à peu se forme un coin qui refoule le sol. Cependant le bas du mur a tendance à subir une translation vers le côté le moins chargé. La rupture a toujours eu lieu de ce côté.

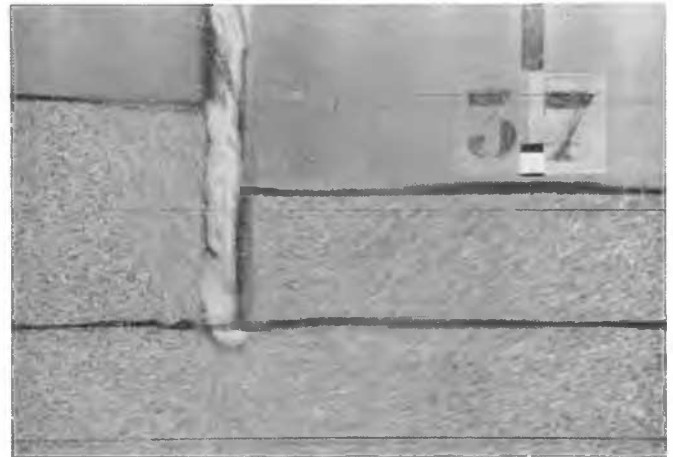


FIG. 5. Rupture dans le cas de profondeurs différentes de part et d'autre de la semelle.

De l'autre, le plus haut, se produit un effondrement. Tout un coin du massif adjacent au mur descend; sa pointe se trouve approximativement au niveau de l'arête inférieure de la fondation d'où on voit nettement partir une surface de rupture inclinée; celle-ci est à peu près plane et forme un angle de 25 à 30° avec la verticale (la fig. 5). On a un phénomène de poussée sur un mur parfaitement lisse avec déplacement des grains parallèlement au plan de rupture qui

forme théoriquement avec la verticale un angle de $(\pi/4 - \varphi/2)$; la concordance entre la théorie et l'expérimentation est donc bonne.

La résistance mesurée correspond à la plus petite profondeur; en général elle est même plus faible que si on avait cette plus petite profondeur des deux côtés de la fondation. Mais si la dénivellation est très importante, il faut calculer le mur comme un mur de soutènement.

Conclusion. Dans la gamme d'angles de frottement expérimentés, les essais semblent montrer les faits suivants. La pointe du coin formé sous la semelle est à peu près constante et plus effilée que ne le prévoit la théorie. La longueur de la vague de reflux est peu affectée par les variations de l'angle de frottement. Le terme de surface est supérieur à sa valeur théorique et celui de profondeur en est voisin. Mais les essais montrent surtout que les formules de Caquot et Kérisel fournissent la valeur minimale de la force portante.

Cas du milieu purement cohérent

La rupture est en général peu nette. Le terme de surface déjà mesuré par de nombreux expérimentateurs, correspond à un coefficient de l'ordre de 6. Le terme de profondeur est très sensiblement égal à γD , c'est-à-dire que N_q égale 1, ce qui est sa valeur théorique.

Cas du milieu stratifié horizontalement

Les recherches antérieures (Tcheng, 1957) ont porté essentiellement sur une fondation posée sur un milieu "bicoche" constitué d'un matériau pulvérulent reposant sur un corps cohérent de faible résistance. Cette dernière couche intervient en diminuant le taux de travail de façon d'autant plus importante qu'elle est plus rapprochée de la fondation. Maintenant on étudie la fondation semi-enterrée et des milieux plus complexes.

Milieu stratifié horizontalement. Le degré de complexité suivant immédiatement le "bicoche," est celui du milieu constitué par une couche cohérente située entre deux formations pulvérulentes.

L'étude, exécutée avec des semelles de 10 cm de largeur reposant sur des couches de sable d'épaisseur variable et séparées par une couche de graisse de puissance comprise entre 0,5 et 15 cm, a montré que pratiquement jamais la couche inférieure de sable n'a été intéressée; la rupture s'est toujours produite dans la couche de graisse intermédiaire. Lorsque l'on a affaire à une couche cohérente de faible résistance, le système stratifié est donc réduit au "bicoche."

Etude du terme de profondeur. On fait varier les épaisseurs relatives des couches de graisse et de sable ainsi que la profondeur du niveau de fondation. Cette fois encore la rupture n'est pas nette. Le phénomène est évidemment plus complexe et faute de place nous ne pouvons présenter tous les résultats acquis. Toutefois on peut déjà dire que la présence de la couche cohérente molle intervient de façon primordiale en diminuant considérablement la résistance du sol. Signalons que l'on retrouve aussi γD comme terme de profondeur lorsque la base de la fondation, quoique enterrée dans du sable, repose sur une couche cohérente.

II. EFFORT D'ARRACHAGE ET DE FROTTEMENT NÉGATIF

Ces deux phénomènes sont liés par le fait qu'ils présentent le même mouvement relatif vertical. Dans le cas de l'arrachage, l'écran est tiré vers le haut, tandis que le milieu encaissant reste fixe. C'est le contraire avec le frottement négatif; en se consolidant pour une cause naturelle ou artificielle, le sol s'abaisse et engendre par frottement sur la

surface latérale un effort dirigé vers le bas ce qui surcharge la base au lieu de la soulager.

Notre recherche porte sur le milieu pulvérulent pour lequel les efforts sont mal connus, avec les phénomènes plan, puis tridimensionnel.

Phénomène plan

On a analysé systématiquement les différents éléments susceptibles d'intervenir en effectuant des essais d'arrachage d'une plaque disposée verticalement entre deux faces vitrées d'une cuve remplie de sable. Les cuves et la mise en place du sable ont été décrites dans l'étude de la capacité portante du sol. Comme milieu, outre le sable de Leucate, nous avons utilisé du sable de Seine qui possède une granulométrie plus étendue et contient un fort pourcentage d'éléments calcaires. La cuve qui est posée sur vérins, peut être abaissée. Des surfaces lisses, semi-rugueuses et rugueuses ont été expérimentées. L'ancrage dans le milieu a varié de 20 à 100 cm.

Les caractéristiques du phénomène sont les suivantes: 1) L'arrachage et le frottement négatif sont identiques. 2) Les différences de compositions granulométrique et minéralogique des matériaux n'interviennent pas. 3) Le phénomène est très sensible au type de surface de l'écran. La rugosité maximale est obtenue évidemment lorsqu'elle est enduite de sable, mais on obtient les mêmes résultats avec des surfaces cimentées; ceci semble indiquer que pour le milieu, des écrans couverts de sable ou de ciment se comportent de la même façon. Les efforts d'arrachage d'une tôle d'acier varient en fonction de l'état de sa surface. Enfin c'est le verre qui donne les résultats les plus faibles. 4) L'observation par la face vitrée montre qu'au début le milieu est soulevé, d'autant plus que φ est plus élevé et l'écran plus profond; les grains les plus proches sont les plus exhaussés. Au début on note une certaine réversibilité.

Avec les surfaces rugueuses le phénomène se poursuit par le roulement des grains le long de l'écran; ceux-ci émergent peu à peu de la surface libre originelle et viennent constituer un petit monticule de part et d'autre de l'écran. Toujours lorsque l'on a affaire à un écran rugueux, si le milieu est très serré c'est-à-dire s'il présente un frottement interne élevé, tout un volume du milieu reste soulevé; ce volume présente en section approximativement un triangle isocèle dont la hauteur coïncide avec la plaque et dont la pointe se trouve à la base de l'écran.

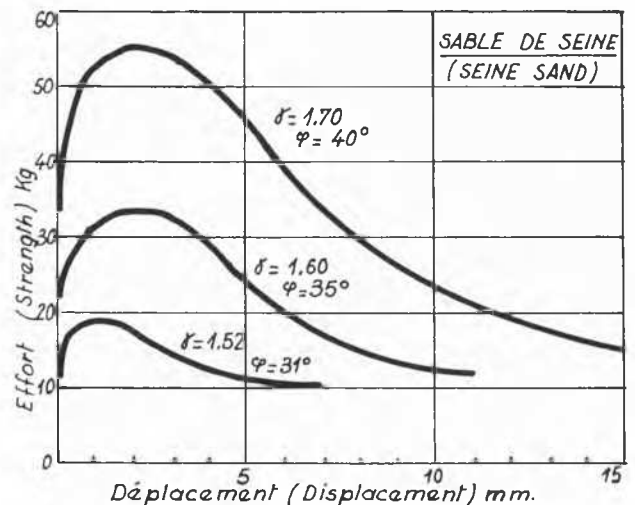


FIG. 6. Courbe effort-déplacement lors de l'arrachage de plaques enduites de sable.

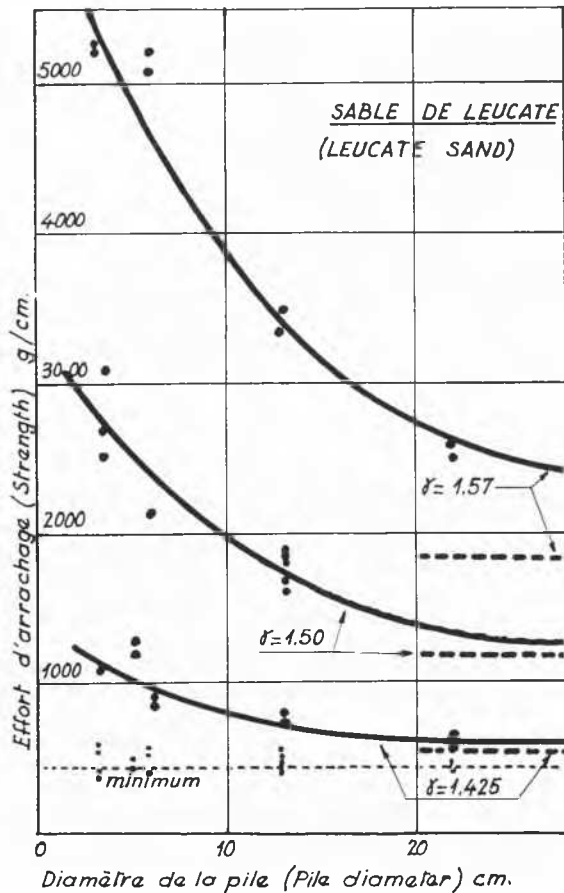


FIG. 7. Effort d'arrachage par centimètre de longueur développée pour des massifs circulaires fichés de 60 cm. dans du sable de Leucate. ——— Maximum avec des massifs circulaires. Palier minimum avec des massifs circulaires. - - - - - Valeurs en phénomène plan.

Avec les surfaces lisses les grains ne roulent pas sur l'écran. 5) L'effort en fonction du déplacement présente un maximum, puis un palier variable avec un écran lisse, mais

constant lorsqu'il est rugueux et quelle que soit la densité originelle; dans ce dernier cas le milieu semble atteindre le même état lâche limite autour de l'écran. Ceci apparaît bien sur la fig. 6 fournissant la valeur de l'effort en fonction du déplacement pour une plaque de 45 cm de hauteur. 6) L'effort par unité de longueur de l'écran est fonction de la profondeur H et suit sensiblement une loi du type $\tau = 1/2 k \gamma H^2$. 7) Le coefficient de frottement k est une fonction approximativement linéaire de $\tan \varphi$; pour des valeurs comprises entre 30 et 40°, $k \approx 2 (\tan \varphi - \tan 24^\circ)$. Le palier correspond à un frottement de roulement d'environ 28°.

Phénomène tridimensionnel

Cette étude n'a porté que sur des massifs circulaires à surface rugueuse, puisqu'ils correspondent seuls à la réalité. Leur diamètre a varié de 1 à 22 cm et la hauteur maximale d'ancrage a été de 100 cm. Ces massifs ont été mis en place dans des cuves de section carrée remplies de sable de Leucate à différentes densités. 1) L'allure des déformations observées en surface et dans le milieu grâce à une cuve à paroi de verre contre laquelle a été mis en place un demi-massif circulaire, a montré que les phénomènes plan et tridimensionnel sont analogues. 2) La loi du type $\tau = 1/2 k \gamma H^2$ a été vérifiée approximativement. 3) L'effort en fonction du déplacement présente aussi un maximum suivi d'un palier constant et égal à celui du milieu plan. Par contre le maximum est beaucoup plus élevé, d'autant plus que le massif circulaire est plus petit et l'angle de frottement interne plus grand. Toutefois il semble qu'à partir d'un diamètre d'une vingtaine de centimètres pour les milieux lâches et une quarantaine pour les milieux très serrés, l'influence due à la troisième dimension ne se fasse plus beaucoup sentir, ainsi que le montre la fig. 7.

RÉFÉRENCES

- HABIB, P., et Y. TCHENG (1961). Fondations superficielles. *Annales I.T.B.T.P.*, juillet-août nos 163-164.
 TCHENG, Y. (1957). Fondations superficielles en milieu stratifié. *Comptes-rendus Quatrième Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations*, Vol. 1, p. 449.