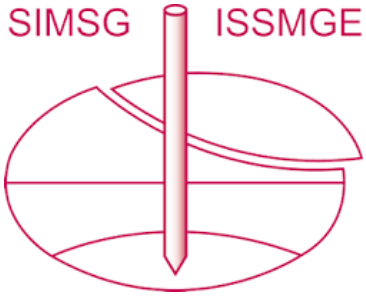
INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING



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.

Sollicitation des écrans souples de soutènement sous l'effet de charges extérieures localisées, appliquées en surface du massif soutenu

Stresses in Flexible Sheet Pile Bulkheads due to Concentrated Loads Applied to the Surface of the Retained Mass

J. VERDEYEN, INGÉNIEUR CONSEIL A.I.BR., *Professeur à l'Université de Bruxelles, Directeur du Laboratoire de Mécanique des Sols, Bruxelles, Belgique*

V. ROISIN, DOCTEUR EN SCIENCES APPLIQUÉES, *Assistant à l'Université de Bruxelles, Directeur Technique à la s.a. Les Entreprises Ed. François & Fils, Bruxelles, Belgique*

SOMMAIRE

Cette communication rapporte les essais exécutés au Laboratoire de Mécanique des Sols de l'Université de Bruxelles, pour déterminer la sollicitation d'un écran souple de soutènement lorsque le massif soutenu reçoit une charge extérieure verticale, localisée sur une étroite semelle filante parallèle à l'écran. Les essais à l'appareil à rouleaux Taylor-Schneebeli ont permis de reconnaître les figures de rupture du massif, et les essais dans la cuve à sable ont permis de mesurer les pressions sur le rideau, ceci à l'aide de capteurs de pression du type Redshaw. Ces diagrammes de pression montrent la grande discordance entre la réalité physique et les théories adoptées pour l'évaluation de ces effets lesquelles ne tiennent pas compte de la nature du soutènement.

Les auteurs ont établi une corrélation entre les résultats expérimentaux et les éléments fournis par la formule de Terzaghi.

SUMMARY

This paper refers to the tests carried out at the Soil Mechanics Laboratory of the University of Brussels to determine the pressures transmitted to a flexible sheet pile bulkhead, when a vertical force is applied to the top of the retained mass through a narrow footing running parallel to the bulkhead. Qualitative tests made with Taylor-Schneebeli apparatus, using rollers, made it possible to recognize the rupture lines in the soil mass. Tests made on a model using sand and Redshaw pressure cells provided diagrams of the pressures applied to the bulkhead. These pressure diagrams show the wide disagreement between the actual values of the pressure and the theoretical approach which does not take into account the nature of the bulkhead.

The authors have established a correlation between the experimental results and the data supplied by the Terzaghi formula.

LORS DU V^{ème} CONGRÈS de la Société Internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations tenu à Paris en 1961, les auteurs ont présenté les premiers résultats d'une étude expérimentale sur l'action des charges extérieures verticales et concentrées sur des semelles filantes appliquées à un massif de terres soutenu par un rideau de palplanches métalliques flexibles (Verdeyen et Roisin, 1961). Des essais effectués à l'aide de l'appareil à rouleaux Taylor-Schneebeli ont montré que les caractéristiques du dispositif de soutènement—déformabilité de l'écran, nature de l'appui dans le sol, déformabilité des appuis rapportés—jouent un rôle capital dans le transfert des charges extérieures vers cet écran et influencent largement la loi de répartition des contraintes transmises à l'écran par suite de l'application de ces charges extérieures.

RECHERCHE DE LA RÉPARTITION DES CONTRAINTES TRANSMISES À UN ÉCRAN FLEXIBLE, PAR SUITE DE L'APPLICATION D'UNE CHARGE CONCENTRÉE AU TERRE-PLEIN

La méthode photographique utilisée pour mettre en évidence le processus de la rupture d'équilibre dans le modèle analogique à rouleaux fournit aussi une image de la déformée du rideau. Un essai d'application des méthodes analytiques a été réalisé à partir d'une déformée relevée par points équidistants, mais la nécessité d'adopter pour cette déformée une équation de degré élevé complique rapidement les calculs.

Les difficultés rencontrées dans l'établissement de la loi des pressions à partir de la déformation de l'écran ont donc orienté les recherches vers des essais sur modèle réduit avec mesure directe des pressions. La description de ces essais et l'exposé des résultats obtenus font l'objet des paragraphes suivants.

TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE

L'appareil utilisé est une cuve à sable dont une longue face est constituée par une glace qui permet de photographier ou de filmer les déformations du massif (fig. 1). L'écran se compose de trois tôles verticales jointives. La tôle centrale a 30 cm de large, les tôles latérales ont 20 cm de large. Le comportement des éléments latéraux en contact avec les parois de la cuve est susceptible d'être influencé par des effets de bord, mais on peut admettre que la partie centrale répond aux conditions d'un équilibre bidimensionnel.

La tôle utilisée a une épaisseur de 3,5 mm et elle est en acier doux pour lequel $E = 2{,}15 \times 10^6$ kg/cm.ca. Le facteur de flexibilité du soutènement vaut $\rho = H_t^4/EI =$ 31,3 cm.ca./kg/mètre linéaire d'écran, la hauteur totale de palplanche H_t en contact avec le sol étant égale à 70 cm.

Pendant le remplissage de l'appareil, l'écran est maintenu en place sur sa partie libre, par une pièce de butée (fig. 1). Lorsque le remplissage est terminé, cette butée est supprimée de manière à ce que le transfert des contraintes dans le massif vers l'écran s'effectue comme dans la réalité. C'est à ce stade que la flexibilité du rideau et la plus ou moins grande déformabilité des appuis entrent en jeu.

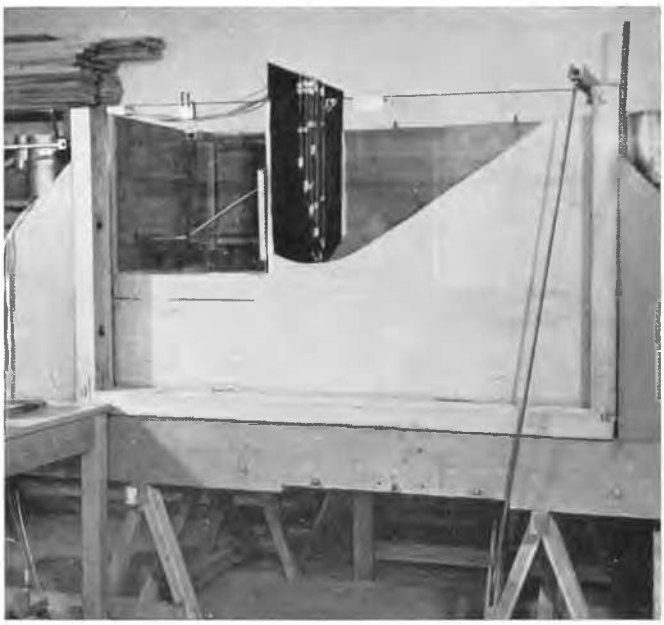


FIG. 1. Cuve à sable avec modèle de rideau équipé de cellules de pressions.

Le matériau utilisé est du sable dénommé "sable de Mol" qui répond aux caractéristiques suivantes: poids spécifique apparent du sol sec, $\gamma_d = 1{,}5$ tonnes/m.cu.; cohésion, $c = 0$; angle de frottement interne, $\phi = 30°$; Granulométrie, refus sur le tamis (A.S.T.M.) n° 20 = 98,99 pour cent; n° 40 = 77,20 pour cent; n° 70 = 16,90 pour cent; n° 140 = 0,40 pour cent; n° 200 = 0,20 pour cent.

La mise en charge du terre-plein s'effectue à l'aide d'une semelle scindée en trois parties indépendantes (fig. 2) correspondant chacune aux sections respectives de l'écran. Ce scindage est réalisé pour soustraire aux effets de bord la partie centrale de la semelle. Un dispositif isostatique répartit entre les trois semelles une charge extérieure transmise et amplifiée par un système de leviers. Les organes essentiels de l'appareil sont les capteurs de pression répartis en hauteur sur l'écran central et cela sur la face en contact avec le sol. A la suite d'une étude comparative, c'est le capteur de pression mis au point par le professeur S. C. Redshaw (Redshaw, 1954) de l'Université de Birmingham qui a été retenu, en raison de ses nombreuses qualités: encombrement réduit, sensibilité suffisante pour les faibles pressions produites dans le modèle réduit, reproductibilité des résultats.

Les essais sont conduits en quatre stades: 1) libération de l'écran par escamotage de la butée extérieure ménagée sur sa face libre pendant les opérations de remplissage, l'appui de tête

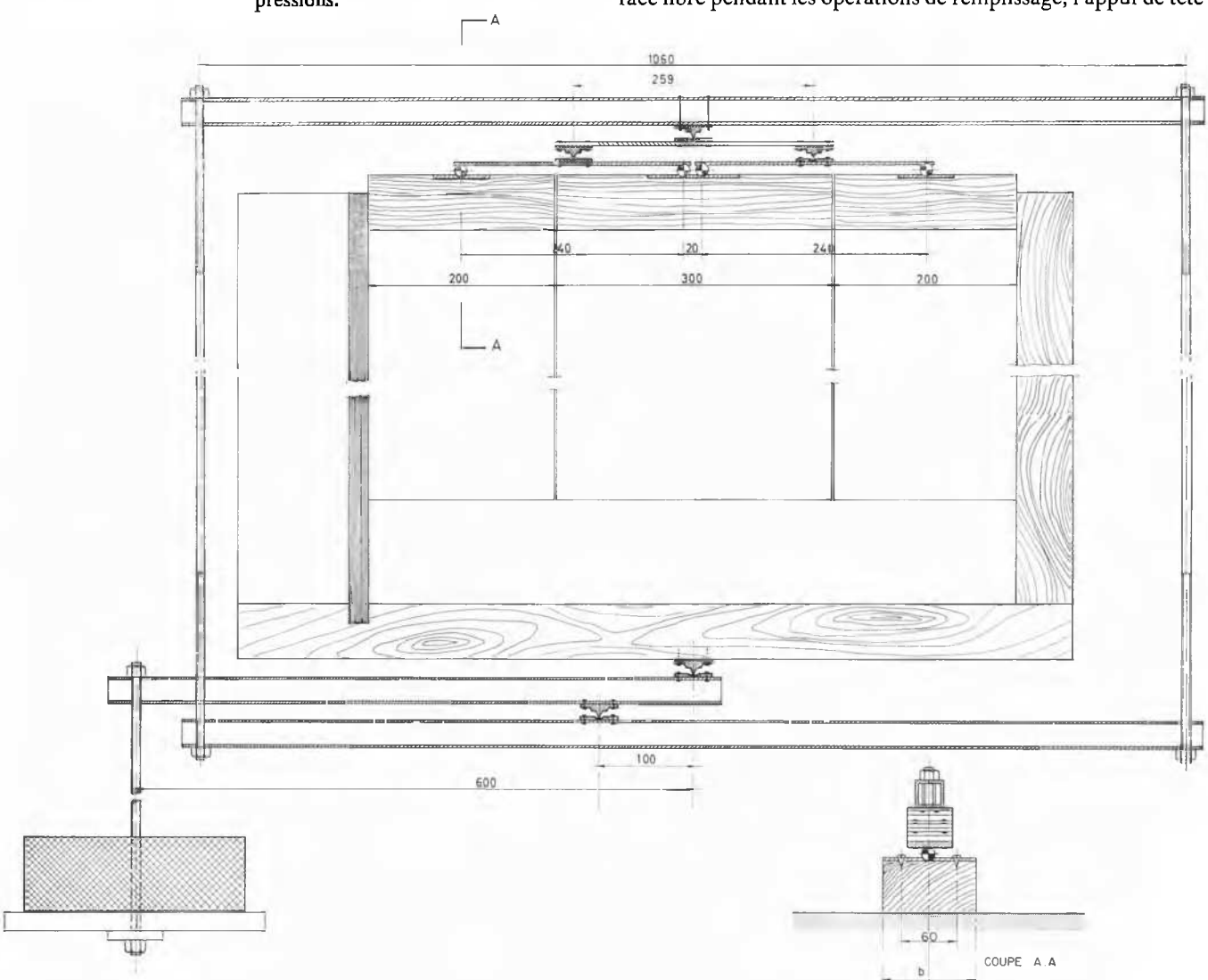


FIG. 2. Dispositif d'application de la charge extérieure.

étant maintenu parfaitement fixe; 2) relevé des indications des cellules; 3) application de la charge concentrée à la surface supérieure du massif, l'appui de tête étant toujours fixe; 4) relevé des indications des cellules qui, par différence avec les indications relevées au stade 2, donnent la valeur de la contrainte normale à l'écran, due à la charge concentrée.

Dans une première série d'essais, la charge extérieure est appliquée au terre-plein par l'intermédiaire d'une semelle filante de largeur $b = 5$ cm, tandis que dans une seconde série d'essais, la dite semelle est de largeur double, soit $b = 10$ cm. Pour chacun de ces deux cas, on relève la valeur des contraintes normales transmises à l'écran, en prenant en considération des positions successives de la charge concentrée. Ces essais ont été exécutés par M. Jean Boom, Ingénieur Civil des Constructions, alors qu'étudiant en dernière année à la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Bruxelles, il élaborait un travail de fin d'études sur le sujet (Boom, 1964).

ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les courbes expérimentales mises en parallèle aux figs. 3 et 4 traduisent très nettement l'évolution de la loi de répartition des contraintes transférées à l'écran par le massif, suite au déplacement sur le terre-plein d'une charge extérieure verticale concentrée.

Il y a lieu de distinguer deux types de courbes de pression: (*a*) les courbes présentant un maximum très accusé aux environs de la profondeur relative $n = 0{,}35$, et qui sont en outre caractérisées par un léger renforcement des pressions à l'approche de l'encastrement; (*b*) les courbes possédant un maximum très accusé aux environs de la profondeur relative $n = 0{,}15$ et un second maximum, moins marqué toutefois, aux environs de la profondeur relative $n = 0{,}5$.

Lorsque la charge extérieure se trouve proche du rideau ($m < 0{,}4$), on se trouve en présence de courbes du type (*a*). Cette règle est absolue pour la semelle la plus large, soit $b = 10$ cm, mais pour la semelle de 5 cm par contre, c'est seulement une règle de plus grande probabilité. Si la charge est écartée du rideau d'une distance relative, rapportée à la hauteur de soutènement H, $m = x/H = 0{,}4$ ou supérieure, on constate que le maximum de pression se relève vers le sommet de l'écran, tandis qu'un second maximum apparaît, qui évolue vers l'encastrement dans le sol, au fur et à mesure que la distance $x = mH$ croît; ce sont des courbes du type (*b*).

Le maximum inférieur s'atténue toutefois rapidement lorsque la distance x croît au-delà de $x = H$, le maximum supérieur se trouve localisé de plus en plus haut, soit entre 0,12 et 0,08 H. Pour la semelle de 10 cm de largeur et pour un éloignement supérieur à 1,3 H, la charge localisée n'in-

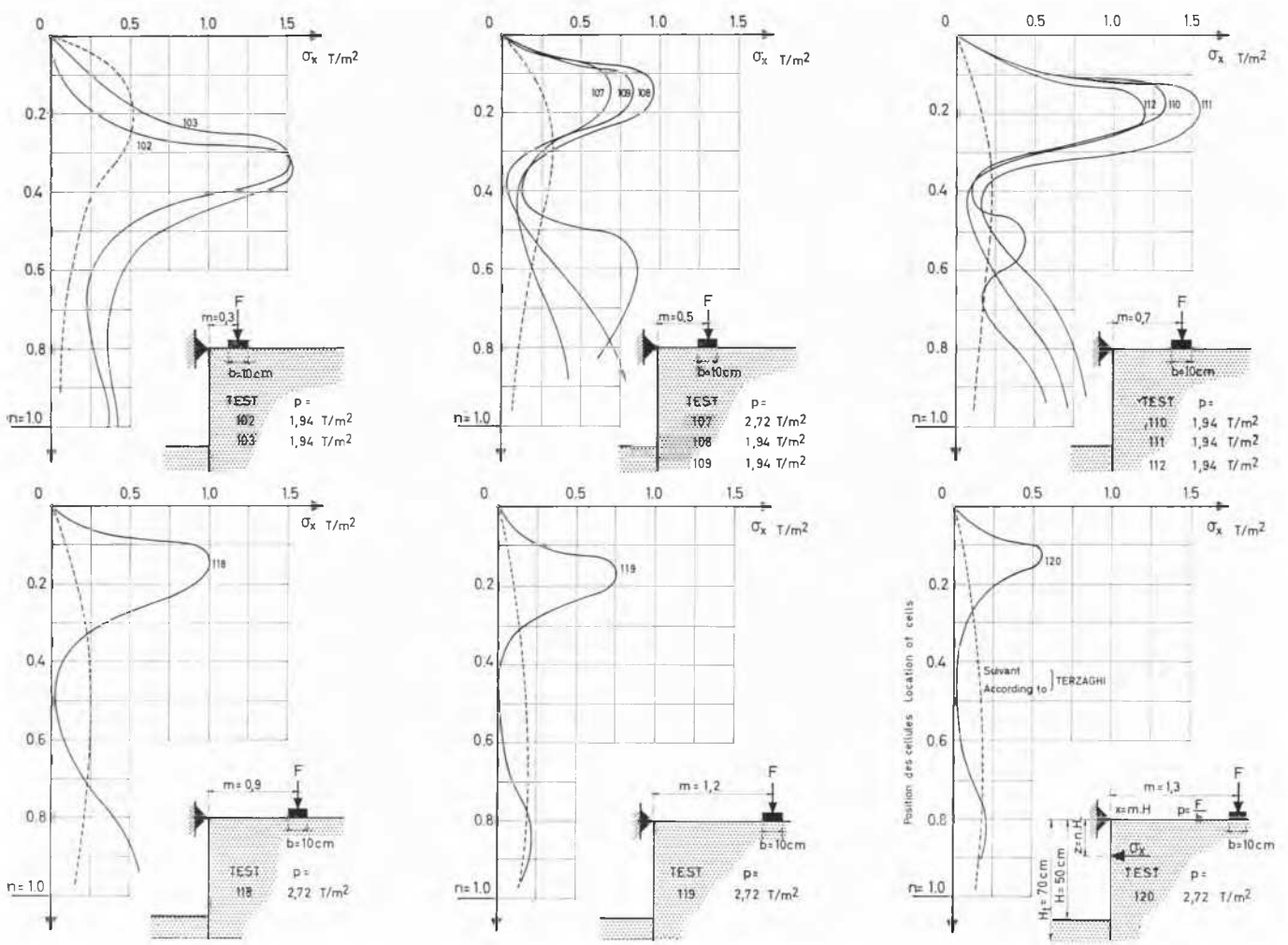


FIG. 3. Evolution du diagramme des pressions suivant la position de la charge. Semelle filante de largeur $b = 10$ cm.

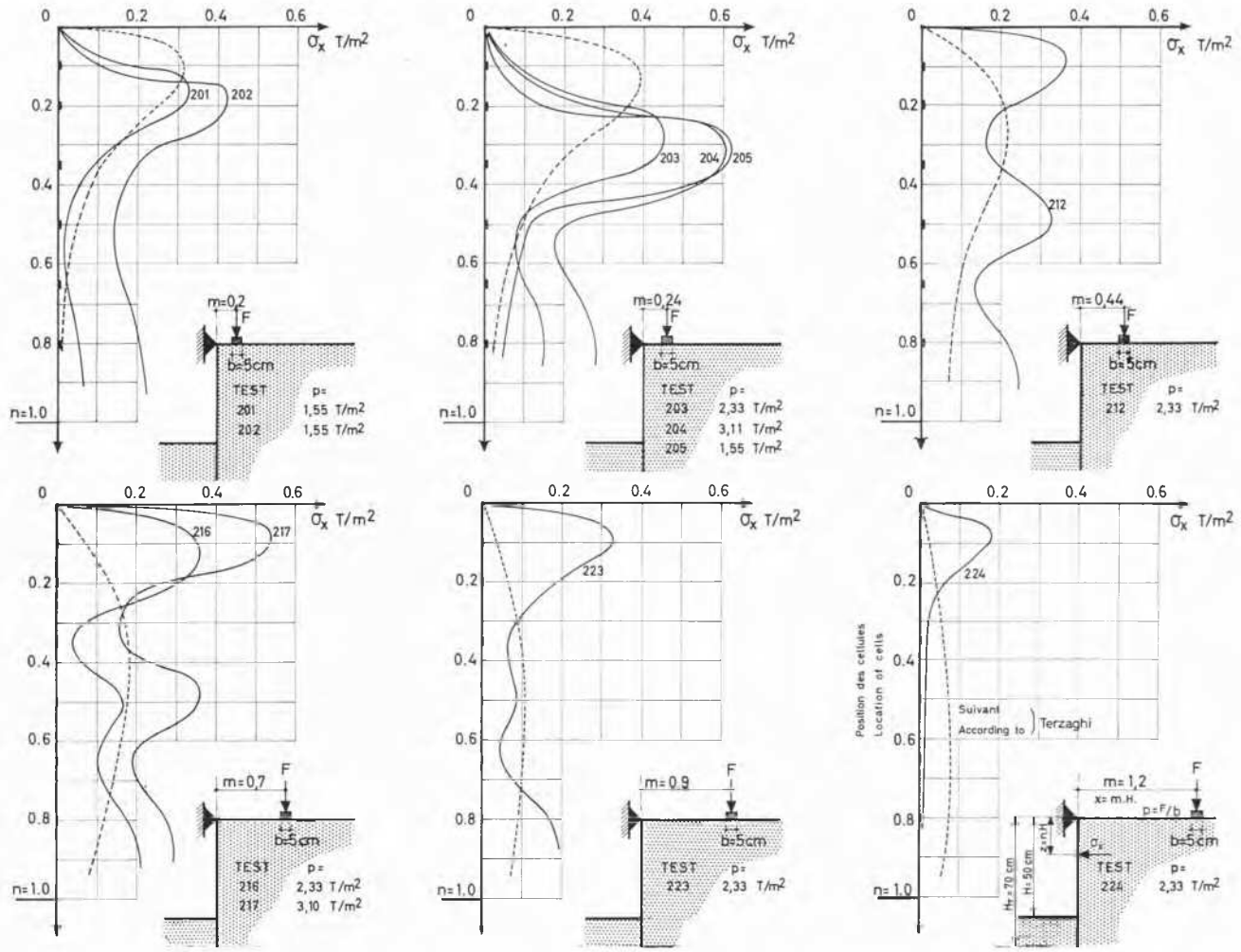


FIG. 4. Evolution du diagramme des pressions suivant la position de la charge. Semelle filante de largeur $b = 5$ cm.

fluence pratiquement plus l'écran, et pour la semelle de 5 cm de largeur, cette influence sur l'écran devient négligeable à partir de 1,15 H.

Ces constatations sont en accord avec les résultats des essais qualitatifs rappelés à l'introduction et au cours desquels on a trouvé que les lignes de rupture du massif consécutives à l'application de la charge concentrée, n'interfèrent plus avec les figures de rupture du massif au voisinage de l'écran, à partir des éloignements suivants de la charge: $x = 1{,}338\ H$ pour la semelle de 10 cm; $x = 1{,}17\ H$ pour la semelle de 5 cm.

Chaque diagramme expérimental est mis en parallèle aux figs. 3 et 4, avec le diagramme de pressions obtenu en appliquant au cas étudié la formule de Terzaghi (1954) qui s'écrit:

$$\sigma_z = \frac{F}{H} \cdot \frac{0{,}203n}{(0{,}16 + n^2)^2} \text{ pour } x < 0{,}4\,H$$

et

$$\sigma_z = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{F}{H} \cdot \frac{m^2 \cdot n}{(m^2 + n^2)^2} \text{ pour } x > 0{,}4\,H$$

la charge F étant concentrée linéairement. Dans ces formules, les facteurs n et m représentent respectivement: la profondeur relative de la facette sur laquelle est calculée la contrainte σ_x soit $n = z/H$; la distance relative de la charge F par rapport à la tête du rideau, soit $m = x/H$; H étant la hauteur libre de l'écran.

INCIDENCE SUR LA STABILITÉ DU RIDEAU DE PALPLANCHES

Une étude statique du rideau, basée sur la méthode de Blum, dite encore "méthode de la poutre de remplacement" (Verdeyen et Roisin, 1955), et qui considère un appui fictif dans le sol, a été effectuée pour chaque cas de sollicitation relevé expérimentalement. La même étude statique a été faite parallèlement, en prenant comme base la loi des pressions donnée par la formule de Terzaghi.

Pour chacun des cas étudiés, on a calculé la résultante des pressions expérimentales $(E_a)_{exp}$, la résultante des pressions suivant Terzaghi $(E_a)_{Terz}$, le moment maximum expérimental $(M_{max})_{exp}$, le moment maximum suivant Terzaghi $(M_{max})_{Terz}$. La valeur du rapport $(E_a)_{exp}/(E_a)_{Terz}$ a été portée en diagramme, en fonction de l'éloignement relatif m de la charge (fig. 5). On constate que la résultante réelle des pressions est pratiquement double de celle calculée à partir de la loi de Terzaghi, lorsque la charge extérieure se trouve au voisinage de la tête du rideau, pour se rapprocher de la résultante de Terzaghi lorsque la charge s'en éloigne.

La fig. 6 donne les évolutions comparées de la position du

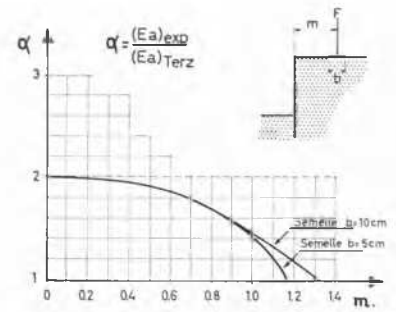


FIG. 5. Variation du rapport $(E_a)_{exp}/(E_a)_{Terz}$ en fonction de la position de la charge.

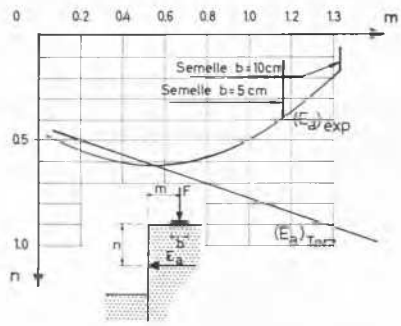


FIG. 6. Evolution du point d'application de la résultante des pressions en fonction de la position de la charge.

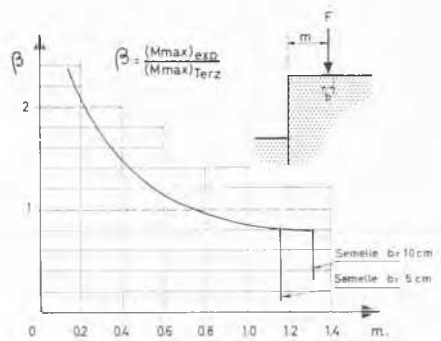


FIG. 7. Variation du rapport $(M_{max})_{exp}/(M_{max})_{Terz}$ en fonction de la position de la charge.

point d'application des résultantes de pression $(E_a)_{exp}$ et $(E_a)_{Terz}$. On y trouve la confirmation d'un résultat expérimental fourni par les recherches à l'appareil à rouleaux: à savoir que la résultante des pressions remonte vers la tête du rideau au fur et à mesure que la charge extérieure appliquée s'en éloigne. Les points relatifs aux deux types de semelles expérimentés ($b = 5$ cm et $b = 10$ cm) se placent de plus sur la même courbe.

Un troisième diagramme comparatif (fig. 7) montre l'évolution du rapport $(M_{max})_{exp}/(M_{max})_{Terz}$ en fonction de la position de la charge extérieure. On constate que pour des charges voisines de l'écran, le moment expérimental est nettement supérieur à celui obtenu à partir de la loi de Terzaghi. Ici encore, la distinction entre les deux types de semelles n'apparaît pas.

CONCLUSIONS

Les recherches expérimentales entreprises ont montré que d'appréciables discordances peuvent exister entre la sollicitation réelle d'un rideau sous l'effet des charges extérieures verticales concentrées et la sollicitation évaluée à partir des formules de Terzaghi. Il est évident que ces conclusions ne peuvent être généralisées dans l'état actuel de la question. Elles doivent être considérées comme provisoires et il est nécessaire de les vérifier en faisant apparaître l'influence de divers facteurs, tels que: la nature du sol, la nature des liaisons du rideau, la flexibilité du rideau, la plus ou moins grande concentration de la charge extérieure. Dans ce but, une importante campagne d'essais est inscrite au programme du Laboratoire de Mécanique des Sols de l'Université de Bruxelles.

RÉFÉRENCES

BOOM, J. (1964). Palplanches métalliques—Effet des charges localisées sur la loi de répartition des pressions le long de l'écran. Université de Bruxelles, Travail de fin d'études.

REDSHAW, S. C. (1954). A sensitive miniature pressure cell. *Jour. Scientific Instruments*, Vol. 31, pp. 467–9.

TERZAGHI, K. (1954). Anchored bulkhead. *Trans. American Society of Civil Engineers*, Vol. 119, p. 1252.

VERDEYEN, J. et V. ROISIN (1955). *Stabilité des terres*, pp. 218–77. Liège, Editions Desoer.

——— (1961). Relations entre les effets des surcharges extérieures concentrées et les caractéristiques des écrans souples. *Comptes-Rendus du V^e Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations* (Paris), Vol. 2, pp. 501–8.