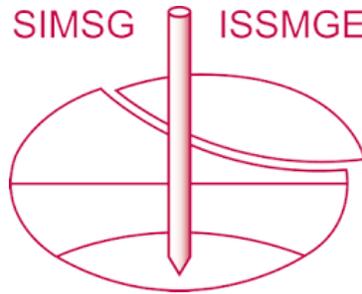


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



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.

Contribution à l'étude de la rotation des fondations

Contribution to the Study of the Rotation of Foundations

par J. BIAREZ

et

J. F. CAPELLE, Faculté des Sciences de Grenoble, Laboratoires de Mécanique des Fluides et Mécanique des Sols

Sommaire

L'observation photographique de la rotation de massifs de fondation dans un milieu à deux dimensions montre l'existence d'une zone piriforme, solidaire de la fondation. Le centre de rotation se trouve environ aux trois-quarts de la profondeur, et légèrement déplacé dans le sens où s'exerce la force. Des graphiques donnent le moment en fonction de la profondeur moyenne et de la dénivellée pour un sol présentant une différence de niveau de chaque côté de la fondation. Le moment croît avec le poids de la fondation, mais passe par un maximum si le poids est égal aux sept dixièmes de la force portante.

Rotation de fondations

Nous avons étudié expérimentalement l'équilibre limite plan (dans un plan vertical) d'un massif avec angle de frottement non nul, soumis à l'action d'un corps rigide ; la planéité du phénomène étant réalisée grâce à l'emploi des rouleaux de M. SCHNEEBELI.

La rupture d'équilibre a été réalisée sur deux modèles :

(1) Un cylindre de révolution à surface rugueuse, à génératrice horizontale, soumis à un couple donné de même axe.

(2) Un massif de fondation, soumis à une force horizontale d'intensité connue.

Nous avons déterminé, dans chaque cas, quelques propriétés cinématiques de la déformation et tracé les diagrammes des efforts limites en fonction des caractéristiques du modèle.

Signalons que le second modèle a fait, dans des hypothèses plus restrictives, l'objet des recherches théoriques de M. NEGRE.

I. Appareillage

L'appareil, dû à M. SCHNEEBELI, réalise une analogie avec un sol pulvérulent homogène et isotrope.

Les rouleaux, en duralumin, de section circulaire, étaient de deux diamètres différents pour éviter l'anisotropie. Les expériences ont été faites avec deux modèles.

L'angle de frottement des rouleaux a été mesuré par diverses méthodes : appareil triaxial classique transformé pour que l'échantillon soit composé d'un empilage de rouleaux de 10×20 cm dans une capote en caoutchouc habituelle ; il semble que celle-ci ne perturbe que faiblement la mesure en s'appuyant sur les extrémités des rouleaux ; appareil de Casagrande ; mesure par cinématographie de l'angle maximum de stabilité d'un talus ; mesure de poussée et butée sur un écran vertical rugueux. Ces résultats concordent bien, si l'on prend des échantillons assez grands par rapport à la dimension des rouleaux.

Les variations de volume en cours de cisaillement sont du même type que celles observées dans les sables. Il se produit un très léger compactage puis une dilatation. Evidemment,

Summary

By photographing the rotation of foundation masses in a two-dimensional medium, the existence of a pear-shaped zone joined to the foundation can be established. The centre of rotation lies at about three-quarters of the depth and is slightly displaced in the direction in which the force is acting. For a soil with different levels to either side of the foundation, the moment is given in terms of mean depth and level difference by graphs. This moment increases with the weight of the foundation and passes through a maximum when the weight is equal to seven-tenths of the bearing capacity.

	Modèle 1	Modèle 2
Diamètre des rouleaux (50 pour cent en poids, de chaque sorte)	2 et 3 mm	3 et 5 mm
Longueur	40 mm	60 mm
Poids spécifique	2,7	2,7
Densité de l'empilage : γ_d	En moyenne : 2,1 1,89 à 2,25	
Angle de frottement des rouleaux	29° pour $\gamma_d = 2,12$	26° pour $\gamma_d = 2,21$ 27° pour $\gamma_d = 2,25$
Angle de frottement des rouleaux sur le bois	$\delta = 20^\circ$	
Angle de frottement des rouleaux sur le métal poli	$\delta = 17^\circ$	
Angle de frottement des rouleaux sur la fondation rugueuse	$\delta = 29^\circ$	$\delta = 27^\circ$
Dimensions du modèle	0,50 x 0,70 m	1 x 2 m

les variations de volume sont plus faibles qu'à trois dimensions ; elles sont ici de l'ordre de 5 pour cent pour une densité initiale de 2,1.

II. Rotation de cylindres rugueux à axes horizontaux (Modèle 1)

r : rayon du cylindre ; on pose $d = 2r$.

D : dénivellation de l'axe par rapport à la surface du massif.

α : angle de rotation du cylindre.

m : moment résultant par rapport à l'axe du cylindre des efforts appliqués au cas limite.

M : valeur maxima du moment m .

Les cylindres étaient en bois, avec denture de telle manière que $\delta = \phi$.

Les courbes $m(\alpha)$ montrent que le moment maximum est obtenu pour une rotation de 3° ; le tiers de ce moment est atteint pour $\alpha = 0^\circ.6$. A l'origine, on obtient approximativement $m = k_2 D \alpha$, k_2 étant une constante.

L'influence de la profondeur est indiquée sur la Fig. 1. Le moment maximum est pratiquement fonction linéaire de D ; dès que la profondeur relative D/d dépasse quelques unités, on peut admettre que $M = k_1 D$, k_1 étant une constante.

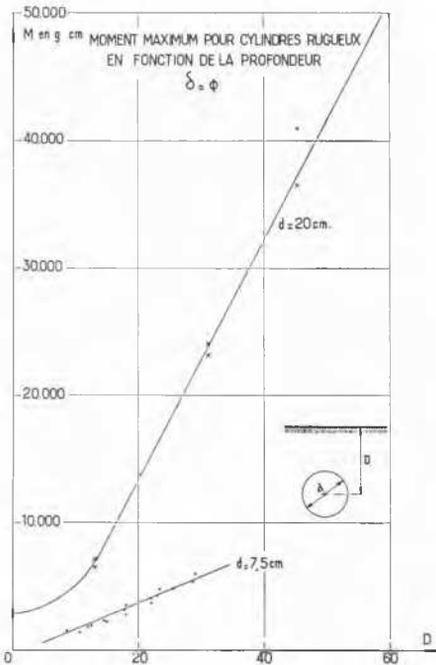


Fig. 1 Moment maximum pour cylindres rugueux en fonction de la profondeur.

Maximum bending moment for rough cylinders as a function of the depth.

Le moment maximum est proportionnel au carré du rayon fictif $(r + \epsilon)$, qui correspond au rayon du cercle au long duquel se produit le cisaillement; les photographies montrent en effet l'existence d'une couronne de rouleaux, d'environ 1 centimètre d'épaisseur, solidaire du cylindre (Fig. 2). La valeur de ϵ diminue avec le diamètre des rouleaux.

Si l'on admet que la moyenne des contraintes sur le cylindre est proportionnelle à D , on peut écrire :

$$M = k \gamma D t g \delta \ 2\pi(r + \epsilon)^2$$

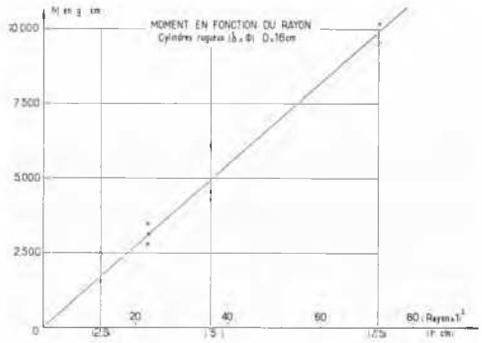


Fig. 2 Moment en fonction du rayon. Bending moment as a function of radius.

En première approximation, cette formule est en accord avec l'expérience si l'on prend $k \neq 1,1$. L'augmentation de densité fait croître k .

III. Rotation des massifs de fondation

Les modèles des fondations étaient réalisés en bois. Des photographies avec pose permettent la mise en évidence des propriétés cinématiques du mouvement; un appareil photographique est fixe, l'autre est solidaire de la fondation (Photographies 1, 2, 3, 4).

Le rapprochement des deux photographies montre l'existence d'une zone piriforme de rouleaux, solidaire de la fondation; celle-ci s'articule comme une rotule dans un cercle dont le diamètre est les 6/10 de la profondeur D de la fondation. Il existe, à la partie supérieure, une zone en poussée et une autre en butée (Fig. 3).

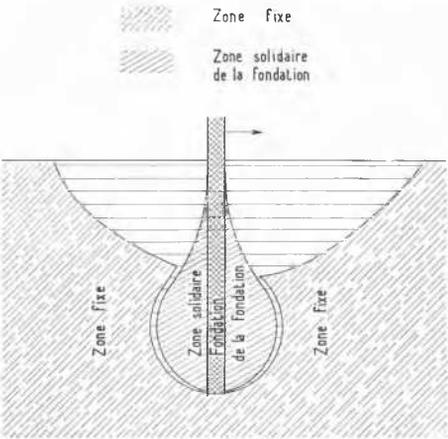
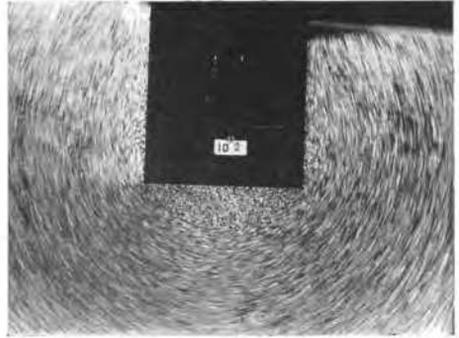
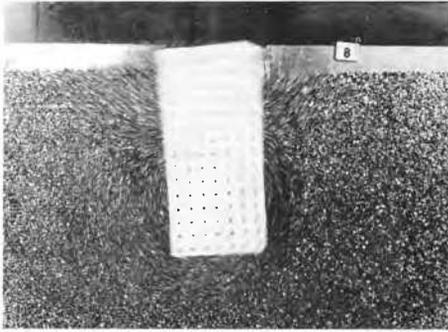
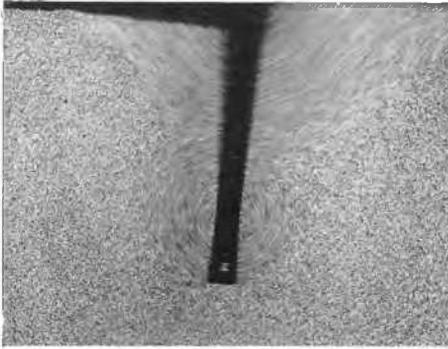


Fig. 3 Rotation de fondation. Schema de la déformation du sol. Rotation of the foundation. Diagram showing deflexion of the soil.



1

2

3

4

A notre connaissance, ce phénomène n'a pas encore été mis en évidence; signalons toutefois que M. Sokolovsky en a postulé l'existence lors de la discussion du schéma théorique de ce mouvement.

S'il existe une forte dénivellation $2a$ du sol de chaque côté de la fondation, l'une des deux zones en poussée ou en butée peut disparaître.

Si la profondeur relative D/B est faible, les deux zones supérieures peuvent disparaître.

Soient :

x : la profondeur du centre de rotation par rapport au niveau moyen du sol;

nx : (n étant un nombre sans dimension) la distance entre le point d'application de la force horizontale F et le centre de rotation;

$2a$: la dénivellation du sol de chaque côté de la fondation

$$2\lambda = \frac{2a}{D} : \text{dénivellation relative.}$$

1. — *Position du centre instantané de rotation (c.i.r.). — Sol horizontal :*

a) *Fondation mince $D/B > 10$.* — Le c.i.r. se trouve environ aux $3/4$ de la profondeur D . Un calcul simple, basé sur une répartition linéaire des contraintes normales, donne une position très voisine.

Le c.i.r. est légèrement plus haut pour les fondations rugueuses ($x/D = 0,68$ si $\delta = \Phi$; $x/D = 0,71$ si $\delta = 20^\circ$).

Si le point d'application de la force s'élève de la surface du sol à l'infini, le centre de rotation remonte légèrement (0,8 à 0,7).

b) *Fondation large (Fig. 4).* — Le c.i.r. est toujours aux $3/4$ de la profondeur D sauf pour les fondations peu profondes ($D/B > 1$) et décalé par rapport à l'axe de la fondation dans le sens du vecteur F ; il est environ au $1/4$ de la largeur de la fondation pour $D/B = 2$; il est situé à l'extérieur de la fondation si $D/B > 10$. Ces résultats correspondent à un poids de la fondation égal à $5/100$ de la force portante limite; la position du c.i.r. dépend du poids.

2. — *Position du c.i.r. — Sol avec différence de niveau d (Fig. 5):*

Si la force (horizontale) F est orientée vers le niveau supérieur du sol, le c.i.r. a une cote supérieure à celle qu'il aurait pour un sol sans dénivellation, avec surface libre équidistante des deux niveaux; le fait opposé a lieu si F change de sens.

Ce déplacement du c.i.r. vers le haut ou vers le bas est plus faible que ne le laisse prévoir un calcul approché à partir de l'hypothèse de la répartition linéaire des contraintes normales; on montre que la cote x du c.i.r. est racine de l'équation:

$$2x^3(1 - 3n) + 3xD^2(1 - n)(\lambda^2 - 1 - 2\lambda k) + D^3(2 + 3\lambda k - \lambda^3 k) = 0$$

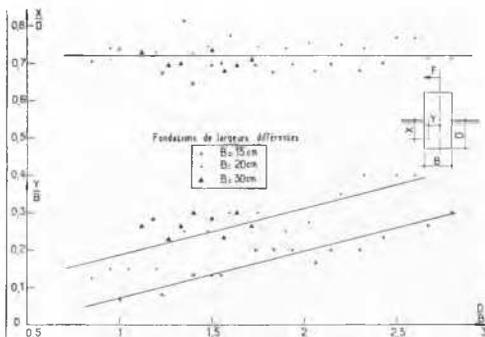


Fig. 4 Position du centre de rotation en fonction de la profondeur relative.
Position of the center of rotation as a function of the relative depth.

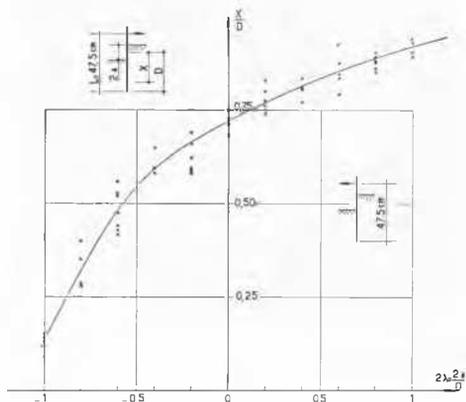


Fig. 5 Position du centre de rotation en fonction de la dénivellée relative.
Position of the center of rotation as a function of the relative difference of level.

où :

$$\lambda = \frac{a}{D}; \quad k = \frac{k_2 + k_1}{k_2 - k_1}$$

k_1 et k_2 étant les coefficients de poussée et de butée. Si n est grand, on trouve approximativement :

$$x = \frac{D}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + 2\lambda k - \lambda^2}$$

Si $n = 1$:

$$x = \frac{D}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{3}{2}\lambda k - \frac{\lambda^3 k}{2}}$$

3. — Moment de rotation :

a) *Fondation mince.* — Le moment maximum est atteint pour une rotation de 3° ; le tiers de ce moment correspond à un angle de $0^\circ 6'$.

A l'origine, $m = \lambda D \alpha$

Le moment maximum est proportionnel au cube de la profondeur de la fondation si la dénivellée relative est faible ($\lambda < 0,3$) (Fig. 6).

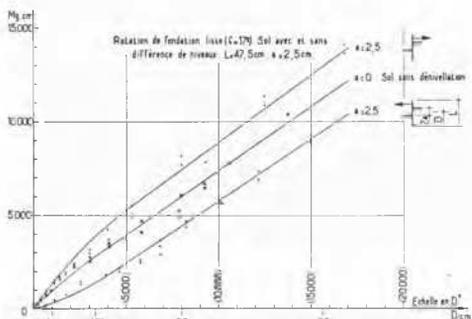


Fig. 6 Moment maximum en fonction de la profondeur.
Maximum bending moment as a function of depth.

On peut admettre, en première approximation, que le moment croît ou décroît proportionnellement à la dénivellée ($2a$) selon que la fondation tourne dans un sens ou dans l'autre (Fig. 7).

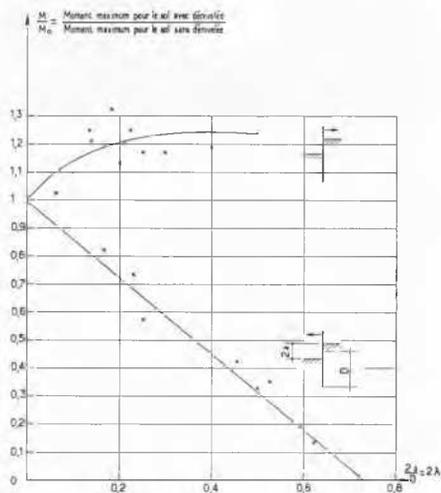


Fig. 7 Moment de rotation en fonction de la dénivellée.
Moment of rotation as a function of the difference of level.

b) *Fondation large.* — Le moment maximum n'est plus proportionnel au cube de la profondeur (Fig. 8).

Si la largeur B croît, le moment de rotation pour les faibles profondeurs relatives augmente rapidement. Pour les fondations minces ($D/B > 10$), l'influence de la largeur de la fondation est négligeable (Fig. 8).

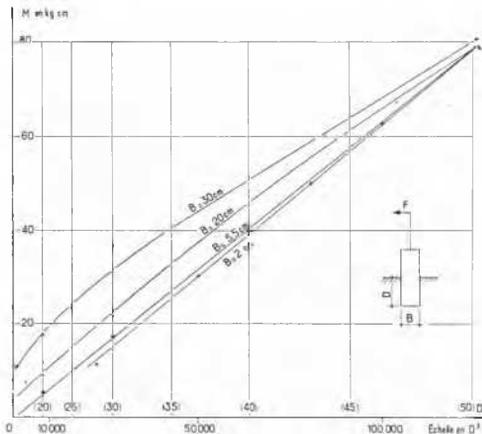


Fig. 8 Moment maximum en fonction de la profondeur.
Maximum bending moment as a function of depth.

Tous les essais précédents ont été faits avec un massif en bois de poids négligeable par rapport à la force portante limite ($P/Q = 0,05$). Si le poids augmente, le moment de rotation croît ; il double si P/Q passe de 0,1 à 0,7 ; au-delà, le moment décroît rapidement (Fig. 9).

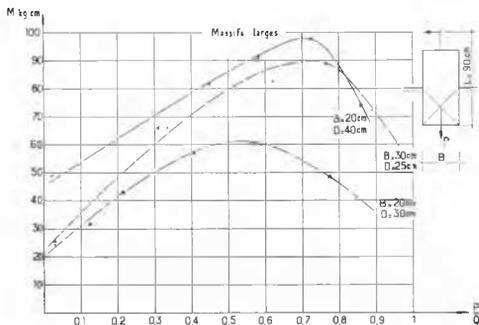


Fig. 9

Références

- [1] NÈGRE R. Etude de la rotation d'un rideau vertical rigide soumis à un moment de renversement, en contraintes normales. Thèse de 3^e Cycle, Grenoble.
- [2] CAPELLE J. F. Contribution à l'étude expérimentale des rotations de fondations.
- [3] LAZARD A. (janv. 1955). Moment limite de renversement de fondations cylindriques et parallélépipédiques isolées. *A. I. T. B. T. P.*
- [4] BIAREZ (1958). Remarques sur la cinématique des massifs enterrés. Rapports de la Conférence de Bruxelles sur les problèmes de pression des terres. Vol. III.
- [5] FAYOUX, A. (1952). Fondations des pylônes des lignes électriques à très haute tension. *Bulletin de la Société française des Electriciens.*
- [6] RAMELOT et VANDEPERRE (Fév., 1950). Les fondations de pylônes électriques. Comptes rendus des recherches de l'I.R.S.I.A., n° 2.
- [7] SCHNEEBELI, G. (1957). Une analogie mécanique pour l'étude de la stabilité des ouvrages en terre à deux dimensions. Compte rendu du cinquième Congrès international de Mécanique des Sols et de Fondations, Londres.