

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.

Simulation en Centrifugeuse de Fondations Marines

Simulation by Centrifugation of Offshore Foundations

P.LE TIRANT Institut Français du Pétrole,

M.P.LUONG,

P.HABIB and

G.GARY

Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole Polytechnique, Paris, France

SYNOPSIS : Offshore gravity platforms are subject to wave effects, with very great cyclic loads whose influence on stability during storms, is poorly understood to date.

Preliminary tests on saturated fine sand have determined the behaviour of this type of foundation material according to cyclic punching and rocking.

A model study of gravity platform foundations has been built, in which the stresses at the corresponding points of the model and the structure are the same. Mass forces are increased by centrifugation in a $\frac{g^*}{g} = \frac{l^*}{l}$ ratio, where l and g indicate respectively length and mass force scales.

The tests performed with this study model reveal the horizontal and vertical displacements of the structure and how pore pressure evolves in the soil foundation in relation to the number cyclic loads.

I.- INTRODUCTION

I.1) Plusieurs plates-formes à embase poids ont été mises en place ces dernières années en Mer du Nord, pour la production et/ou le stockage des hydrocarbures par des profondeurs d'eau de 70 mètres à plus de 150 mètres. L'embase de ces structures, constituée généralement d'un caisson de 100 à 140 mètres de diamètre ou de côté, d'une surface au sol de 8000 à 12000 m² environ, est le plus souvent munie de bèches de géométrie et de dimensions très variables suivant la nature et la résistance au cisaillement des sols superficiels. Le poids déjaugé de ces plates-formes est compris entre 2GN et 3,5 GN et la contrainte moyenne (supposée uniforme) au sol varie de 0,25 à 0,35 MPa.

I.2) Sous l'action de la houle, ces structures induisent des contraintes cycliques dans le sol de fondation dont les conséquences sur la stabilité demeurent encore mal connues. La principale difficulté du problème réside probablement dans la détermination de l'influence de l'histoire des chargements, de différentes amplitudes, l'application aux sols du principe de superposition ne pouvant être, a priori, retenue.

I.3) De très nombreuses études expérimentales de chargements cycliques des sols, au triaxial ou à la boîte de cisaillement, ont permis de mettre en évidence le rôle essentiel, d'une part de la densité relative ou de la résistance au cisaillement, d'autre part de l'amplitude des sollicitations sur les phénomènes de liquéfaction des sables ou de fatigue des sols argileux. Cependant, malgré leur intérêt phénoménologique, ces résultats ne permettent pas de prévoir le comportement des fondations des structures de grandes dimensions soumises à des sollicitations répétées.

Les modèles numériques de calcul de la stabilité des fondations ne valent que dans la mesure où les résultats sont contrôlables par des modèles physiques. Il apparaît que le modèle réduit réalisant une similitude acceptable de la fondation d'une structure constitue probablement la meilleure approche de l'étude de la stabilité, en permettant notamment une analyse approfondie des différents paramètres du problème.

I.4) Cette communication décrit le modèle réduit d'une plate-forme à embase poids à l'échelle 1/100, tel

que les contraintes en des points homologues du modèle et de la structure sont égales, la simulation des forces de volume étant réalisée par centrifugation à une accélération de 100 . g. Les premiers essais avaient pour objet de localiser l'apparition éventuelle du phénomène de liquéfaction dans un sable lâche sous la fondation soumise à des chargements cycliques.

II.- CONDITIONS DE SIMILITUDE

II.1) Echelle des forces de masse

Le modèle réduit de la structure et de la fondation permettant de conserver le sol et les contraintes, on peut admettre que les lois rhéologiques seront les mêmes en des points homologues et que la ruine du modèle sera une bonne représentation du risque de ruine de la structure réelle.

En appelant σ^* et ρ^* l'échelle des contraintes et l'échelle des masses volumiques, conserver les contraintes et le matériau revient à écrire : $\frac{\sigma^*}{\sigma} = 1$, $\frac{\rho^*}{\rho} = 1$

Les conditions de similitude d'après les équations de l'équilibre :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho \left(g_i - \frac{\partial^2 \xi_i}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (\xi = \text{déplacement})$$

donnent : $\frac{\sigma^*}{\sigma} \frac{l^*}{l} = \frac{\rho^*}{\rho} \frac{g^*}{g}$ et $\frac{g^*}{g} = \frac{\xi^*}{\xi} \frac{t^*}{t}^{-2}$

La première relation donne : $\frac{g^*}{g} = \frac{\xi^*}{\xi} \frac{t^*}{t}^{-1}$

Les essais doivent être effectués en augmentant l'accélération de la pesanteur et, si on travaille en centrifugeuse, l'échelle des accélérations est fixée par l'échelle des longueurs.

II.2) Echelle des déplacements

Dans le cas de déplacements non négligeables, l'équation de continuité appliquée à tous les stades de la déformation impose :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad \text{où } \vec{V} = \frac{d\xi}{dt} \text{ vitesse des éléments de l'ossature solide}$$

$$\frac{\rho^*}{\rho} \frac{t^*}{t}^{-1} = \frac{\xi^*}{\xi} \frac{t^*}{t}^{-1} \frac{l^*}{l} \text{ soit } \frac{\xi^*}{\xi} = \frac{l^*}{l}$$

L'échelle des déplacements est la même que celle des longueurs.

II.3) Echelle des temps

II.3.1) La conservation de la loi de dissipation hydrodynamique $C_v = \frac{Th^2}{t}$, où C_v désigne le coefficient

de consolidation de Terzaghi, conduit à la relation :

$$C_v^* = \lambda^2 t^*^{-1} = 1,$$

de sorte que :

$$t^* = \lambda^2$$

II.3.2) Le respect des phénomènes dynamiques entraîne, à partir de la relation $g^* = \xi t^*^{-2}$, la condition :

$$t^* = \xi$$

Sous l'action des sollicitations cycliques, la structure transmet des efforts dans le sol de fondation, partie par l'eau incluse, partie par les contacts entre les grains. La surpression interstitielle qui en résulte dépend de la vitesse de variation de l'effort. L'eau interstitielle et les grains solides étant supposés incompressibles, l'équation de continuité s'écrit : $\text{div}(\vec{V}_f + \vec{V}) = 0$ où V_f , vitesse de filtration

du liquide, obéit à la loi de Darcy $\vec{V}_f = K \vec{i}$ (\vec{i} = gradient hydraulique), dans le cas d'un écoulement laminaire lent. Il en résulte : $\vec{V}_f = K = \vec{V} = \xi t^*^{-1} = 1$

Par suite :

- le coefficient de perméabilité K est conservé,
- le coefficient de consolidation $C_v = \frac{K(1+e_0)}{a_v \gamma_f}$

(avec $a_v = \frac{\partial e}{\partial \sigma}$) est réduit comme les longueurs : $C_v^* = \lambda$

II.3.3) Le phénomène de liquéfaction semble peu sensible à la période des cycles de chargement : les sollicitations de la structure par la houle sont quasi-statiques. On peut donc également écrire :

$$t^* = 1$$

II.3.4) On aboutit ainsi à des contradictions pour le paramètre t^* , suivant les aspects considérés. On s'efforcera d'éviter ces difficultés en abandonnant certains aspects du phénomène :

- en vérifiant qu'ils sont négligeables,
- ou en jouant sur l'échelle des temps, indépendamment de l'échelle des perméabilités.

On peut, par exemple, respecter les phénomènes dynamiques en conservant $t^* = \lambda$ et essayer de respecter les phénomènes hydrodynamiques en modifiant la perméabilité du sol, de façon que $K = \lambda$, par addition de fines, en s'assurant toutefois que ses propriétés mécaniques sont peu modifiées. En effet, $K = \lambda$ entraîne $C_v^* = \lambda^2$, d'où

$t^* = 1$: la dissipation de la pression interstitielle s'effectue en temps réel. La tolérance sur le temps est justifiée par le caractère quasi-statique du phénomène.

III.- APPAREILLAGE ET MODELE

Les conditions précédentes de simulation peuvent être satisfaites au moyen d'un modèle réduit de fondation de plate-forme à embase poids, disposé sur la centrifugeuse Latécoère 265 du C.E.S.T.A. (Commissariat à l'Energie Atomique).

III.1) Caractéristiques de la centrifugeuse

III.1.1) Les principales caractéristiques de la centrifugeuse Latécoère 265 sont :

- . Longueur du bras tournant : ≈ 11 mètres ;
- . Distance de l'axe de rotation de la centrifugeuse au centre de gravité de la charge utile : ≈ 10 mètres ;
- . Accélération maximale atteinte pour une masse de 2000 kg : 100.g (1000m s⁻²) ;

- . Vitesse de rotation pour une accélération de 100. g : ≈ 96 tr/mn.

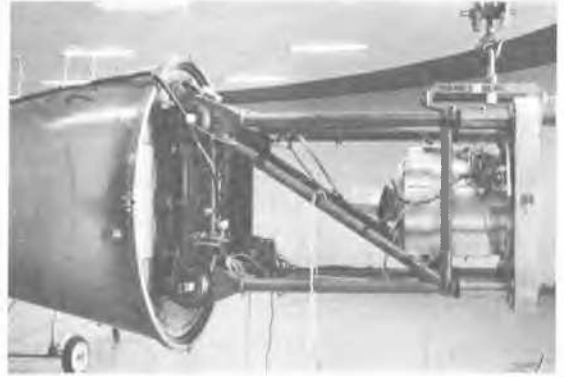


Fig.1 - Modèle disposé sur la centrifugeuse Latécoère 265 du C.E.A.)

III.1.2) L'ensemble modèle-plate-forme de base, d'un poids total de 15 kN environ, est fixé à l'extrémité du bras de la centrifugeuse par l'intermédiaire de la plaque. L'axe du modèle de la plate-forme est disposé horizontalement suivant la direction du bras de la centrifugeuse (Fig.1).

Les liaisons électriques entre le modèle et la salle de mesure sont assurées par l'intermédiaire de contacts tournants.

Des bouteilles d'air comprimé pour l'alimentation du modèle sont disposées à proximité du pivot de la centrifugeuse.

III.2) Description du modèle de fondation de plate-forme à embase poids

III.2.1) Un modèle d'une plate-forme réelle de 100 m de diamètre à la base, à l'échelle 1/100, ne peut être disposé sur la centrifugeuse du CESTA pour des raisons d'encombrement et de poids. Une échelle de similitude plus petite aurait présenté des difficultés de réalisation et d'interprétation. En définitive, il a donc semblé raisonnable d'adopter une échelle 1/100 pour une plate-forme gravitaire de 25 m de diamètre de base. Les résultats obtenus sont ensuite étendus à des ouvrages de dimensions quatre à cinq fois plus grandes, tant pour la force portante que pour la stabilité de la fondation.

	Modèle	Structure homologue	Structure réelle
- Diamètre (ou largeur) de la base B	25 cm	25 m	100 m
- Force verticale F_V (poids apparent)	14,7 kN	147 MN	$\approx 2,3$ GN
- Force horizontale F_H appliquée à une hauteur H	3,1 kN	31 MN	$\approx 0,5$ GN
	10 cm	40 m	40 m

III.2.2) Le modèle se présente sous la forme d'une cuve axisymétrique (en alliage léger), d'un poids de 5 kN environ (y compris le matériau) (Fig.2). Le diamètre intérieur \emptyset de la cuve est de 65 cm et le volume du matériau en place est voisin de 125 dm³. Le rapport $\frac{\emptyset}{B} = 2,6$.

Une membrane mince en caoutchouc, disposée au-dessus du massif, permet l'application nécessaire d'une pression dans l'enceinte supérieure pendant la manutention du modèle.

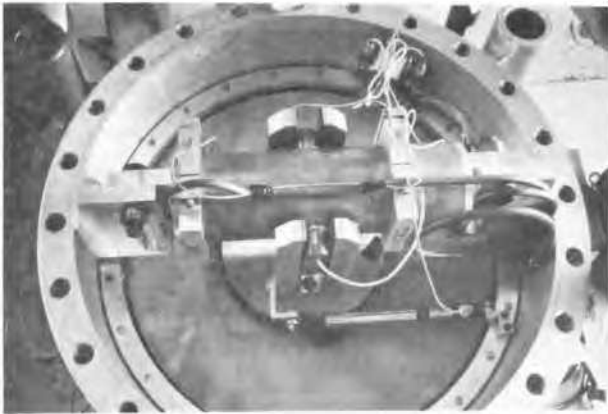


Fig. 2 - Modèle réduit de fondation de plate-forme à embase poids

La force verticale F_v sur la base de la fondation est appliquée par centrifugation (accélération communiquée par la rotation de la centrifugeuse).

La force horizontale F_H alternée, appliquée au moyen d'un vérin pneumatique à double effet, à une fréquence maximale de 5 Hz environ, est indiquée par un capteur de force travaillant en flexion.

De nombreux capteurs de pression interstitielle, de contrainte totale, de déplacement horizontal et vertical de la fondation, équipent le modèle. Une caméra de télévision permet de visualiser en continu le comportement de la fondation.

IV. - RESULTATS EXPERIMENTAUX

IV.1) Essais préliminaires

IV.1.1) Comportement du matériau sous chargements cycliques

L'action de la houle sur une plate-forme à embase poids se traduit par des chargements cycliques du sol de fondation. En l'absence de drainage suffisamment rapide, la pression interstitielle croît progressivement avec le nombre de cycles : la contrainte effective peut diminuer, jusqu'à s'annuler, entraînant la liquéfaction du sol de fondation.

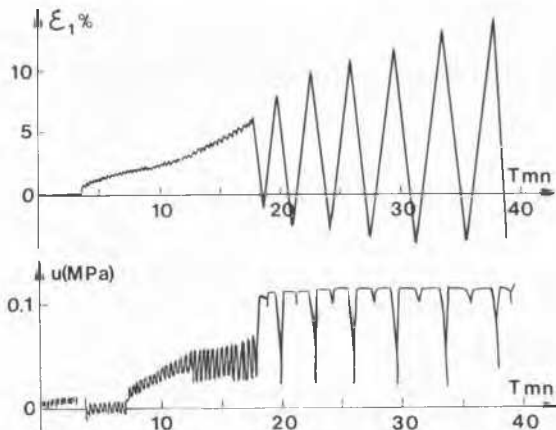


Fig. 3 - Liquéfaction du sable de Fontainebleau sous chargements cycliques au triaxial

Les essais effectués au triaxial, avec du sable de Fontainebleau (de granulométrie 100-300 μ) saturé, dans les conditions suivantes :

- densité relative D_r : 58 %
- contrainte de confinement : 0,12 MPa
- déplacement alternatif de la tête de l'échantillon cylindrique à une vitesse constante de 20 mm/mn

dont l'amplitude variable permettait d'appliquer un déviateur cyclique $\sigma_1 - \sigma_3 = 0,21$ MPa,

montrent que la liquéfaction apparaît, en moyenne, conformément aux résultats représentés sur la Fig. 3.

IV.1.2) Poinçonnements cycliques d'un massif saturé

Un massif de sable de Fontainebleau saturé, de densité relative $D_r = 78$ %, disposé dans une cuve cylindrique de diamètre $\phi = 21$ cm, est soumis par l'intermédiaire d'une plaque ($B = 7$ cm) à des poinçonnements cycliques, à vitesse constante d'enfoncement ou d'arrachement, programmés en force ou en déplacement.

Le drainage peut s'effectuer à la surface libre du massif. Dans le cyclage en force (Fig.4), le sable semble présenter une certaine "accommodation" en deçà d'une charge limite. Au-delà de cette limite, les boucles d'hystérésis se déplacent vers les grands enfoncements. Au bout d'un certain nombre de cycles, l'aire de la boucle diminue brusquement, indiquant une tendance à la disparition du mécanisme de frottement, c'est-à-dire au début de la liquéfaction du sable saturé.

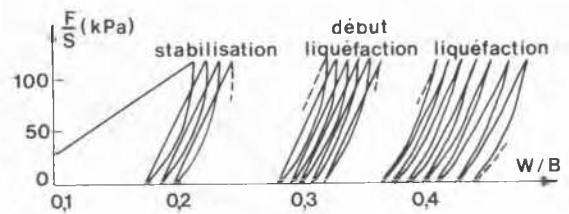


Fig. 4 - Liquéfaction du sable de Fontainebleau par poinçonnements cycliques ($T = 1$ s) - Cyclage en force

Dans le cyclage en déplacement, d'amplitude constante (Fig.5), on constate très rapidement, d'après les boucles d'hystérésis, l'apparition du phénomène de liquéfaction du sable saturé.

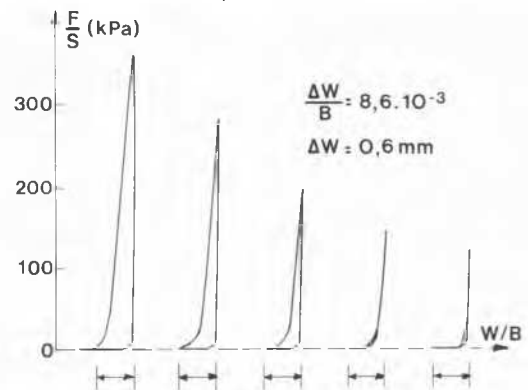


Fig. 5 - Liquéfaction du sable de Fontainebleau par poinçonnements cycliques - Cyclage en déplacement

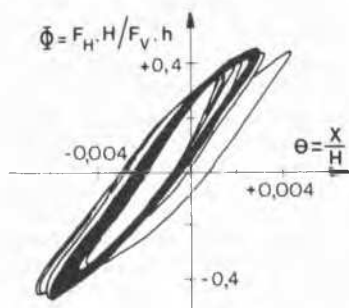
IV.1.3) Basculements cycliques sur un massif saturé

Sur le même massif de sable saturé ($D_r = 78$ %), des essais de basculements cycliques d'une fondation superficielle ($B = 7$ cm) ont été conduits à vitesse constante de basculement.

Le cyclage en forces F_H a montré que l'hystérésis du sable saturé se manifeste par des boucles fermées dans le diagramme effort-déformation (Fig.6) où :

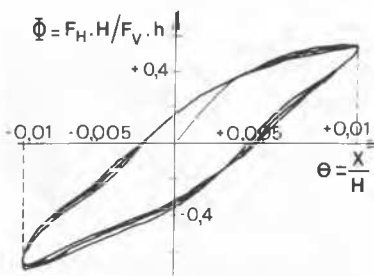
- le rapport $\phi = F_H \cdot H / F_v \cdot h$ traduit l'importance relative des forces verticale et horizontale par rapport à leurs points d'application repérés à partir de la base de la fondation ;
- la déformation $\theta = \frac{\Delta X}{H}$ donne la rotation par rapport à la base.

Fig. 6 - Comportement du sable de Fontainebleau sous l'effet de basculements cycliques
Cyclage en force.



De même, le cyclage à déformations imposées $\pm \theta$ indique que la réponse du massif de sable fin saturé est parfaitement accommodée (Fig.7). L'aire de la boucle traduit le frottement intérieur du sable saturé et détermine l'amortissement des vibrations naturelles non entretenues de la fondation.

Fig. 7 - Comportement du sable de Fontainebleau sous l'effet de basculements cycliques
Cyclage en déplacement



Une série d'essais de basculement sur du sable sec et du sable saturé de même densité relative a nettement mis en évidence la résistance visqueuse due à la présence de l'eau dans le massif de sable fin saturé.

IV.2) Essais en centrifugeuse

IV.2.1) Préparation du modèle

Du sable de Fontainebleau a été mis en place dans la cuve d'essai à la densité relative $D_r = 21\%$. Consolidé par le vide, puis par une pression extérieure additionnelle d'air comprimé de 0,6 MPa, le massif présente alors une densité relative $D_r = 34\%$. Il a été ensuite saturé après une circulation de CO_2 . Le modèle est équipé de :

- quatre capteurs de pression interstitielle disposés dans le massif à différentes profondeurs et distances de l'axe,
- deux capteurs de déplacement vertical donnant le tassement et la rotation de la structure,
- un capteur de déplacement horizontal contrôlant le ripage.

La structure supposée rigide est représentée par un disque exerçant sur le massif de fondation une charge moyenne $\frac{F_V}{S} = 0,4$ MPa à l'accélération 100.g sur la centrifugeuse.

L'effet horizontal de la houle est simulé par un vérin à double effet, exerçant des forces cycliques $\pm F_H$, dont l'intensité et la fréquence sont télécommandées par un détendeur et un distributeur.

IV.2.2) Résultats du modèle centrifugé

Les premiers essais en centrifugeuse concernent les basculements cycliques des modèles réduits de structure à embase poids à l'échelle $\lambda = 1/100$ par des

forces horizontales $\pm F_H$, de fréquence $i = 0,2$ Hz, soit une période $T = 5$ secondes. La force F_V verticale est constante. Le rapport F_H/F_V n'a pas dépassé 10%. La réponse du massif de sable saturé est donnée par la Fig. 8 où on peut constater que le ripage (déplacement perpendiculaire au champ de pesanteur) et les rotations de basculement évoluent de façon réversible par rapport à la sollicitation. Pour une soixantaine de cycles de basculement, on observe un tassement global de 0,05mm environ, soit, pour une structure réelle, un tassement $w_{réel} = 0,05 \times \lambda^{-1} = 5$ mm. Les capteurs de pression interstitielle placés dans le massif de sable saturé ont donné des variations cohérentes au cours de l'essai.

V - CONCLUSIONS

Ces premiers essais confirment la possibilité de simuler en centrifugeuse le comportement rhéologique très complexe du massif de fondation des plates-formes pétrolières à embase poids.

Dans le cas de poinçonnements cycliques importants, la liquéfaction des sables saturés peut apparaître dans les zones relativement importantes sous la structure. Dans le cas de basculement sous des charges cycliques modérées, la liquéfaction semble ne se manifester que dans des zones très localisées, contenues par des régions plus résistantes.

Dans le cas d'une combinaison des deux types de sollicitations, sous l'effet de fortes tempêtes, le couplage peut poser des problèmes de stabilité, actuellement en cours d'étude.

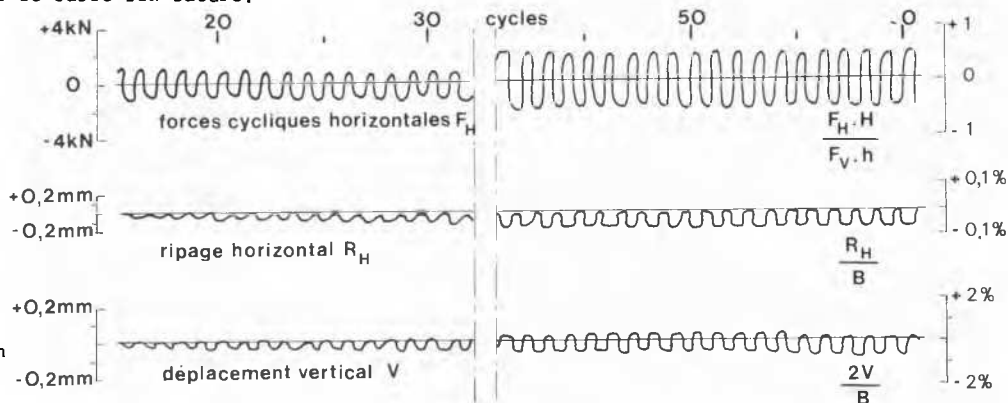


Fig. 8 - Evolution du ripage et du basculement de la structure en fonction de la force F_H .

REFERENCES

- ROWE, P.W. (1975), "Displacement and Failure Modes of Model Offshore Gravity Platforms Founded on Clay", Cong. Offshore Europe '75, Pub. Spearhead Publications Ltd.
- SEED, H.B. and LEE, K.L. (1966) "Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading". J. of the Soil Mech. and Found. Div., ASCE, Vol. 92, NO. SM6, pp. 105-134.