



# EXEMPLES DE MODELISATION EN CENTRIFUGEUSE APPLIQUEE AU GENIE COTIER

Daniel Levacher ; Jacques Garnier

Maître de Conférences, Laboratoire de Mécanique des Fluides

Section Génie Civil, LE HAVRE

Chef de Section, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, NANTES.

## **ABSTRACT**

*Centrifuge tests for coastal engineering are presented. Examples are intentionally limited here and main results from these centrifuge tests are described. Geotechnical centrifuge activities can be classed as follows : 1) Behaviour of complex structures studies, 2) Checking of calcul and design methods and 3) Parametric studies. An example of each type is given, much more for the type 1 because the type of researches are more relevant of coastal engineering.*

*Examples of gravity platform stability, of offshore caisson or storm surge barrier design, of bearing capacity of shallow foundation under eccentric or not loadings are approached to explain some difficulties and some results. In conclusion, the centrifuge testing for coastal engineering are feasible in respect with some similitude laws, and feasibility studies. Centrifuges are a good tool for geotechnical applications which will certainly know in future great developments in the coastal engineering and offshore areas.*

## **I. INTRODUCTION**

L'utilisation de modèles à échelle réduite est une pratique courante en géotechnique. Ils permettent effectivement l'étude du comportement d'un sol et d'une structure, dans des conditions complexes où les méthodes de calcul n'existent pas ou ne sont pas appropriées au cas étudié. De plus, ils fournissent directement, les informations nécessaires à la compréhension du comportement.

Des difficultés surviennent lors du transfert des résultats obtenus sur modèles à l'ouvrage réel ou prototype. Ceci en raison, du comportement du sol qui dépend de l'état de contraintes. Un autre inconvénient se présente quand il s'agit d'études paramétriques. En effet, dans ce cas les modèles doivent être reconstitués pour chaque configuration. Ces essais sur modèle coûtent chers et nécessitent des délais d'études très longs. Pour pallier, au premier inconvénient, des modèles semi-grandeur, sont envisagés ou les échelles géométriques sont supérieures au 1/10 (par exemples : la station de fondations profondes du C.E.B.T.P. à St Remy de Chevreuse, la station de mur de soutènement du L.C.P.C. à Nantes, la station d'essai d'un élément de barrage anti-tempête aux

Pays-Bas ...). Ces grands modèles restent onéreux et les paramètres étudiés sont peu nombreux.

L'apparition des centrifugeuses [1, 2] comme outil pour les recherches menées en géotechnique a considérablement bouleversé les méthodologies expérimentales et leur a donné un nouvel essor. Si l'échelle d'un modèle et la vitesse de rotation de la centrifugeuse sont judicieusement choisis, l'état de contraintes au sein du modèle et du prototype est équivalent. Les avantages, devant la modélisation à 1 g, sont les suivants :

- la taille du modèle est réduite
- les essais sont rapides
- les études paramétriques sont possibles dans des délais raisonnables
- l'état de contraintes est identique et les forces de masses sont correctement simulées.

Les applications sur modèles centrifugés en géotechnique peuvent être classés ainsi :

- 1. Etudes et recherches sur les comportements complexes d'ouvrages fondés ou enterrés** où les autres approches sont inadaptées.
- 2. Justification des méthodes de calcul**, et surtout des hypothèses requises pour leur utilisation.
- 3. Etudes paramétriques** qui peuvent conduire par exemple à des abaques utiles aux géotechniciens des bureaux d'études. Rappelons que bon nombre de formules actuellement utilisées sont de caractère empirique.
- 4. Simulation d'ouvrages particuliers.** Des exemples tirés de l'activité internationale dans le domaine de la géotechnique portuaire et du littoral et dans celui de l'offshore illustrent les différentes applications. En raison des sollicitations et actions complexes agissant sur de telles structures ou ouvrages, les études sur modèles réduits centrifugés sont bien adaptés et les travaux dans ces domaines réalisés à ce jour sont très nombreux [3]. Ils concernent :
  - a) La géotechnique marine et sous-marine : consolidation, stabilité des ouvrages immergés, stabilité de pentes, ...
  - b) Les fondations profondes : problèmes de fondations de plate-formes, de capacité portante d'ouvrages immergés ou semi-immergés
  - c) Les îles artificielles, lagons artificiels...

- d) La conception des structures portuaires : digues, talus, rades, quais ...
- e) Les structures légères : pose de pipelines, câbles, ancrages ...

## II. MODELE REDUIT CENTRIFUGE

Pour pouvoir transposer les observations obtenues sur le modèle (m) en prototype (p), il faut que des conditions dites de similitude soient respectées et qu'en particulier l'état de contraintes soit identique.

Ces conditions sont illustrées à la figure 1, dans le cas d'une simple structure posée sur une couche de sable d'épaisseur D et de poids volumique  $\gamma$ . Le modèle est réalisé à l'échelle 1/n. Les contraintes  $\sigma_m$  (modèle) et  $\sigma_p$  (prototype) sont données au point A du massif.

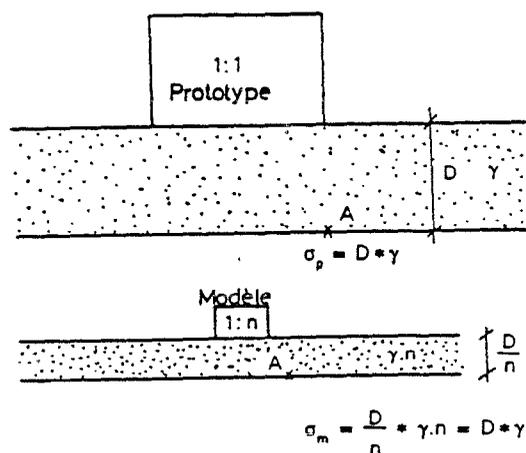


Fig. 1 : niveau de contrainte identique

Pour obtenir l'équivalence des contraintes, au niveau A du modèle, il a fallu multiplier par le facteur n le poids du sol. Grâce à la rotation du modèle ( $\omega$  vitesse angulaire, R rayon), la force appliquée sur le modèle (force centrifuge) réalise cet accroissement. Alors le nombre requis de révolutions par seconde est :

$$f = \frac{1}{2\pi} (n \cdot g / r)^{1/2} \quad (1)$$

Cette condition préliminaire sur l'équivalence des niveaux de contraintes s'accompagne des conditions dites de similitude [2].

## III. JUSTIFICATION DE METHODE DE CALCUL

Pour illustrer ce type d'application, nous pouvons citer le cas de la formule, bien connue, du calcul de la portance d'une fondation superficielle. Dans le cas d'un sol pulvérulent, l'expression de la portance ultime proposée par Brinch Hansen s'écrit :

$$\sigma_u = c \cdot N_\gamma \cdot \gamma \cdot B \quad (2)$$

avec les notations suivantes :  $c$  constante,  $N_\gamma$  facteur de capacité portante,  $\gamma$  poids volumique du sable,  $B$  diamètre de la fondation. Cette formule (2) s'écrit encore, dans le cas d'un état de compacité défini :

$$\frac{\sigma_u}{\gamma \cdot B} = \text{constante} \quad (3)$$

Or les essais relatifs à cette étude, menés en centrifugeuse en particulier à Delft, ne vérifient pas cette formule, voir figure 2.

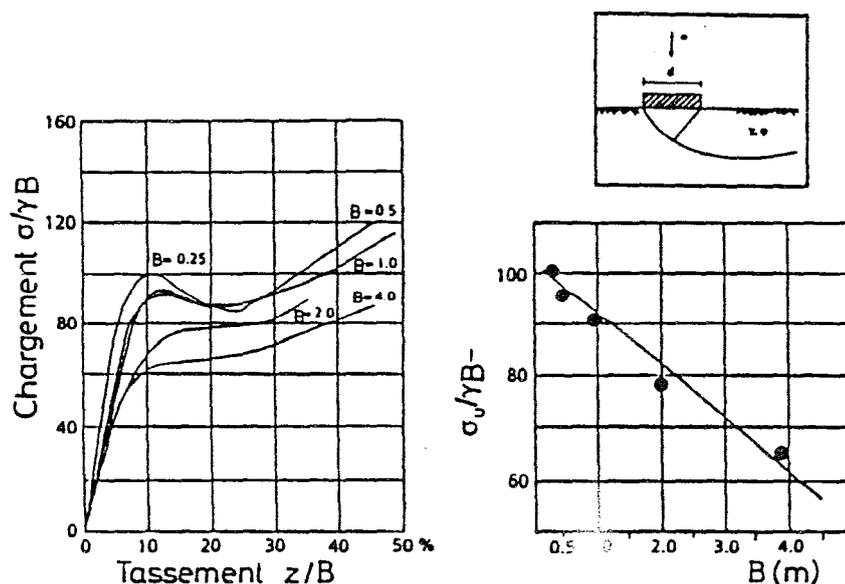


Fig. 2 : cas d'une semelle circulaire

D'autres exemples tirés d'expériences réalisées en France sont relatés par ailleurs [2]. Ils concernent le comportement en mer d'une fondation sur sable carbonaté (Institut Français du Pétrole [2]) et la consolidation sous poids propre de vases de dragage (Port de La Rochelle).

#### IV. ETUDE PARAMETRIQUE

L'étude du comportement des groupes de pieux, sous chargement axial et/ou latéral est complexe. Pour les raisons invoquées en introduction, les modélisations à 1 g ne sont pas satisfaisantes. Les essais en semi-grandeur ou vraie grandeur sont pratiquement inconcevables, du fait du grand nombre d'essais nécessaires et de la difficulté de reprendre les efforts de chargement.

L'intérêt des modèles réduits centrifuges revêt ici toute son importance.

Dans un groupe de pieux, bon nombre de paramètres sont à considérer :

- a) la géométrie des pieux (diamètre, inertie, fiche)
- b) la configuration du groupe (espacement, direction de la charge)
- c) le sol (état de compacité, nature, bicouche...)
- d) l'environnement (proximité de pente, proximité d'ouvrages réalisés ...)
- e) les sollicitations et les actions (effet cyclique, chargements complexes).

Il convient, devant les combinaisons possibles de paramètres retenus, de procéder à de multiples essais : la centrifugeuse permet de réaliser ce type d'étude dite paramétrique. Relatons comme exemple [5] le cas de pieux sollicités latéralement en couple, dans deux directions privilégiées (0 et  $\pi/2$ ). Une notion, importante, dans l'analyse du comportement des groupes de pieux est l'effet de groupe ou l'efficacité du groupe  $E_g$  :

$$E_g = \frac{H_{g,y}}{N \cdot H_{i,y}} * 100 \quad (4)$$

$H_{g,y}$  correspond à l'effort appliqué au groupe pour une déflexion horizontale  $y$ .  $N$  est le nombre de pieux du groupe.  $H_{i,y}$  correspond à l'effort appliqué à un pieu isolé pour la même déflexion  $y$ . Si  $E_g$  vaut 100 %, il n'a pas de phénomène d'interaction. La figure 3 donne la variation de  $E_g$ , en fonction de l'espacement relatif  $s/B$  ( $s$  espacement de centre à centre des pieux,  $B$  diamètre de la fondation). Les couples sont installés dans du sable sec de Fontainebleau.

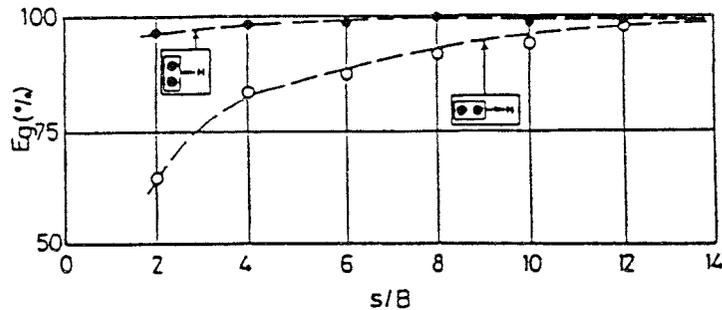


Fig. 3 : efficacité de couples de pieux

## V. ETUDE D'OUVRAGES COMPLEXES

### V.1. Essais de fondations de barrage anti-tempête sur l'Escaut

Les essais sur modèle, d'un élément de fondation (caisson) du barrage anti-tempête ont été réalisés par Rowe [6] à l'Université de Manchester. Ils constituent un exemple de référence dans le domaine de la construction d'ouvrages à la mer car d'une part, les essais ont été réalisés sur centrifugeuse mais d'autre part, les résultats obtenus lors de ces mêmes essais centrifuges ont contribué à définir le type de fondation. Une première série d'essais s'est opérée sur un sol reconstitué (sable fin,  $ID = 50$ ) et pour un ouvrage fondé sur le lit de sable. Les résultats de ces premiers essais ne furent guère concluants car les conditions réelles de sol n'étaient pas respectées. Un modèle de caisson en vraie grandeur (échelle  $\approx 1/3$ ) fut réalisé afin de comparer les informations recueillies avec celles du modèle centrifuge.

#### a) Conditions de sol

Selon les profils de sol établis, figure 4, sur le site d'essai (modèle vraie grandeur), la couche de sable n'est pas homogène et présente des zones lâches en surface. L'introduction de poches de sable lâche a été faite sur le massif reconstitué (figure 5).

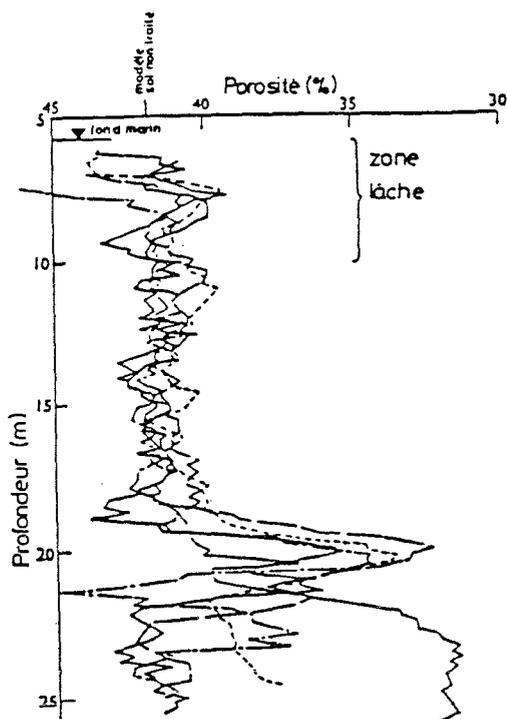


Fig. 4 : variation de la porosité - modèle 1g

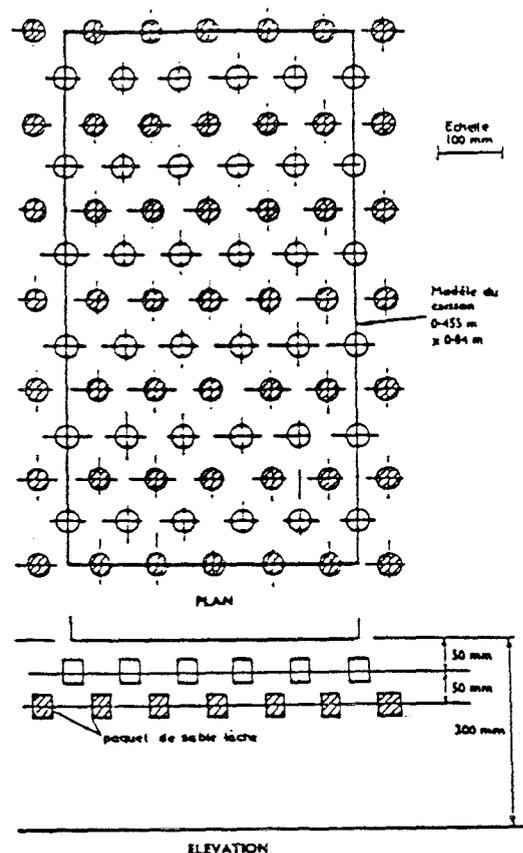


Fig. 5 : reconstitution du site d'essai massif

Par ailleurs, de précédents essais de ces fondations sur les argiles indiquent que la rupture préférentielle est le glissement (6) ce qui conduit à enterrer la structure.

*b) Conditions d'essais*

Le tableau I rassemble les principales caractéristiques des modèles de caissons (modèle à 1 g et modèles centrifugés) et le programme simplifié de chargement.

Tableau I : caractéristiques du caisson

	Test caisson	Prototype caisson	Modèle	
			Test 1/33 $N_c = 33$	Prototype 1/110 $N_c = 110$
Larg. $B$ , m	15	50	0.455	0.455
Long. $L$ , m	27.7	100+	0.84	0.84+
Application de l'effort				
Haut./base, m	6.5	27	0.2	0.25
Poids immergé	13.75 MN	9.65 MN/m	0.38 kN	0.67 kN
$EI/m$ , MN m <sup>2</sup> /m	$7.2 \times 10^4$	$20 \times 10^7$	1.75	1.75
$q$ , kN/m <sup>2</sup>	33	193	33	193

## SESSION II

### c) Principaux résultats

Les essais sur modèles centrifugés ont permis d'effectuer une étude paramétrique. L'enfoncement de la fondation peut contrarier un projet où le critère retenu est une déflexion maximale. Alors pour satisfaire ce critère de tassement, le projet a consisté à élaborer la forme et optimiser les autres paramètres tel que le poids propre. La figure 6 rassemble les principaux résultats de cette étude sur modèles.

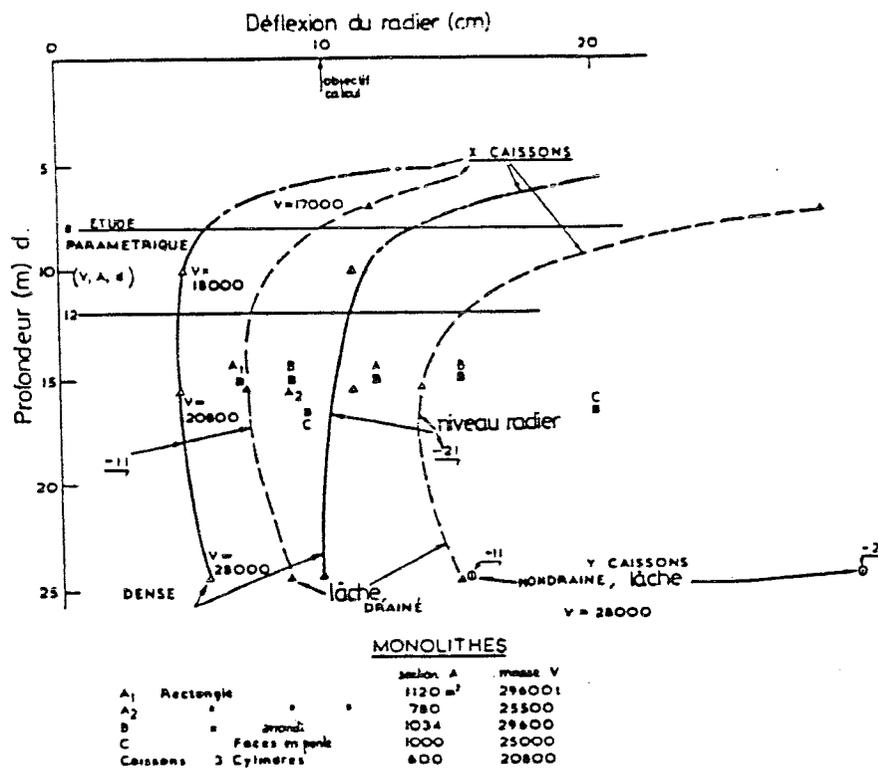


Fig. 6 : déplacement du radier, fonction de l'enfouissement

### V.2. Comportement de fondations de plateformes gravitaires

Les plateformes marines, à embase poids ou gravitaires ont été étudiées par l'Institut Français du Pétrole [7] sur centrifugeuse. Des méthodes de calcul de stabilité existent mais elles ne prennent pas en compte l'évolution des caractéristiques mécaniques du sol lors des chargements successifs. Il s'agit de définir des lois rhéologiques adaptées au problème posé.

a) Conditions d'essais

Le modèle réduit de fondation (échelle 1/100) est la réplique d'une plateforme à embase poids. Le modèle est soumis à des forces horizontales FH (effet de la houle) et verticales FV cycliques comme indiqué au tableau II. Le massif reconstitué est un sable de Fontainebleau ( $I_D = 34$ , (essai I) et  $I_D = 44$  (essai II)) saturé.

b) Programme des essais

Il s'agit de simuler une tempête par le truchement des efforts verticaux (poinçonnement) et horizontaux (rippage et basculement). Les nombres de cycles correspondant aux phases croissantes et décroissantes d'une tempête sont les mêmes. La période des oscillations varie de 5 à 15 s. Pour des hauteurs de houle variant de 10 à 30 m le rapport  $F_H/F_V$  s'accroît de 0,05 à 0,30 environ.

		Modèle réduit	Structure homologue	Structure réelle
Base B	Essai I	25 cm	25 m	100 m
	Essai II	30 cm	30 m	100 m
Force verticale $F_v$ (poids apparent)	I	19.60 kN	196 MN	3 120 MN
	II	21.20 kN	212 MN	2 360 MN
Force horizontale cyclique $\pm F_H$	I	2.20 kN	22 MN	3.12 GN
	II	4.00 kN	40 MN	2.36 GN
appliquée à une hauteur H	I	15.0 cm	15.0 m	60.0 m
	II	20.5 cm	20.5 m	68.5 m
Moment maximal M	I	330 N × m	330 MN × m	21.0 GN × m
	II	820 N × m	820 MN × m	30.5 GN × m
Force verticale cyclique $\pm \Delta F_v$		2 kN	20 MN	223 MN

Tableau II : caractéristiques des essais

c) Principaux résultats

L'évolution, des déplacements horizontaux ( $d_h$ ) et verticaux ( $d_v$ ) est obtenue en fonction de la hauteur de houle, ce qui permet d'évaluer les déplacements cycliques prévisibles pour une plateforme de 100 m de diamètre (figure 7). L'évolution des modules de déformation a montré qu'ils étaient nettement supérieurs à ceux obtenus sous chargement statique.

De nouveaux essais ont été plus récemment entrepris par l'Institut Français du Pétrole sur la centrifugeuse du L.C.P.C. Ils concernent l'étude du comportement sous l'action de la houle et de tempêtes, d'une fondation marine de 30 m de diamètre reposant sur du sable carbonaté de mer d'Iroise et sont décrits par Garnier [2].

## SESSION II

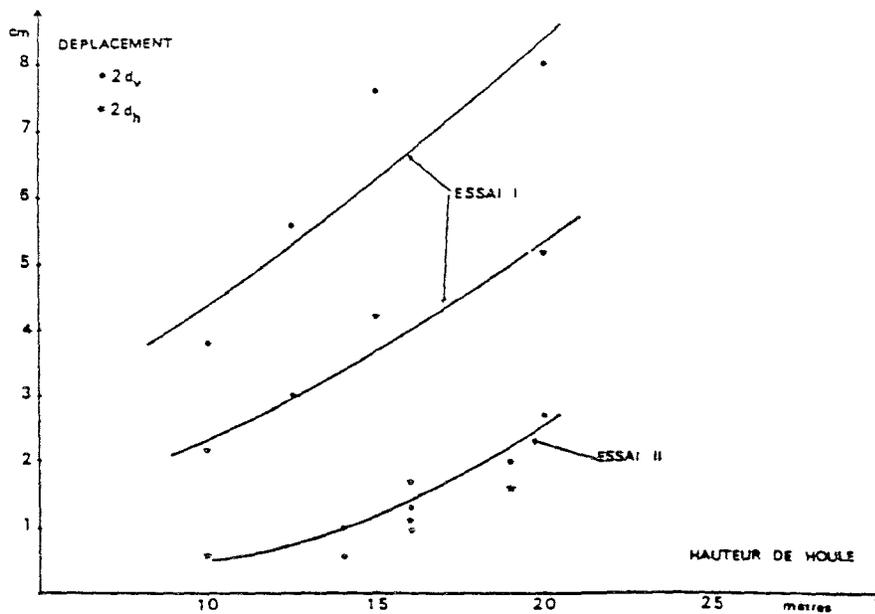


Fig. 7 : amplitude des déplacements réversibles

### V.3. Expériences de l'Institut de Recherche Portuaire Japonais

Alors que la plupart des centrifugeuses sont installées dans des universités ou des organismes liés au génie civil, une d'entre elles est construite dans un institut portuaire. Elle est située à Yokosuka au Japon. Les recherches qui y sont développées sont plus proches du génie côtier et portuaire. Parmi quelques études, citons la capacité portante d'un bicouche, cas adapté aux digues soumises à des efforts excentrés (figure 8).

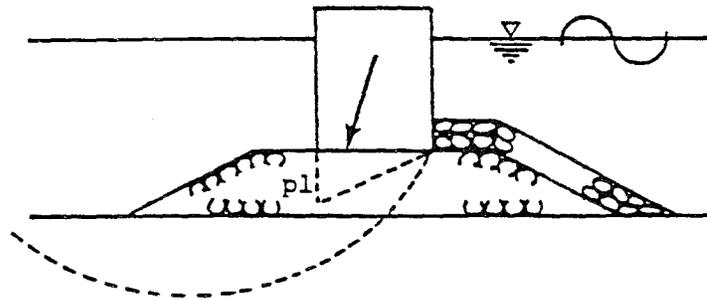


Fig. 8 : modèle de digue

Des séries préliminaires d'essais de capacité portante ont été réalisés pour un monocouche (sable dense  $ID = 95$ ) et pour des efforts centrés et excentrés. Dans le cas des efforts centrés, le facteur de capacité portante  $N_\gamma$  est exprimé en fonction de  $\gamma Bn$  (figure 9). Ces essais constituent la modélisation de modèles puisque  $B$  varie de 2 à 4 cm sous un niveau d'accélération adéquat pour simuler

la même fondation prototype. Dans le cas présent un effet d'échelle apparaît pour des valeurs  $\gamma Bn$  inférieures à 0,1.

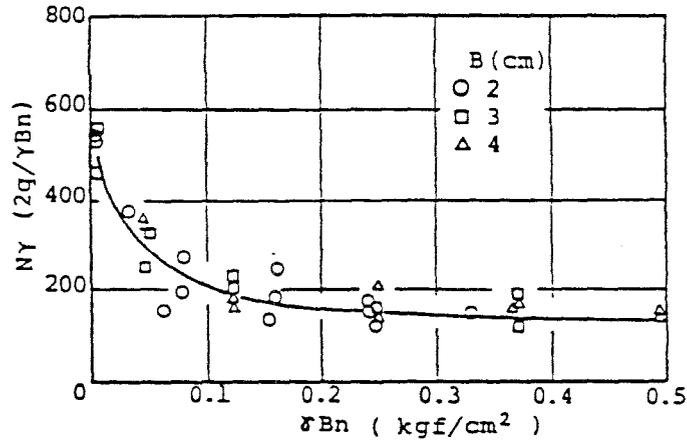


Fig. 9 : évolution de  $Ny$

Pour un excentrement  $e$  de la force appliquée, il y a une réduction de la capacité portante, définie par un facteur de réduction  $E_\gamma$ .

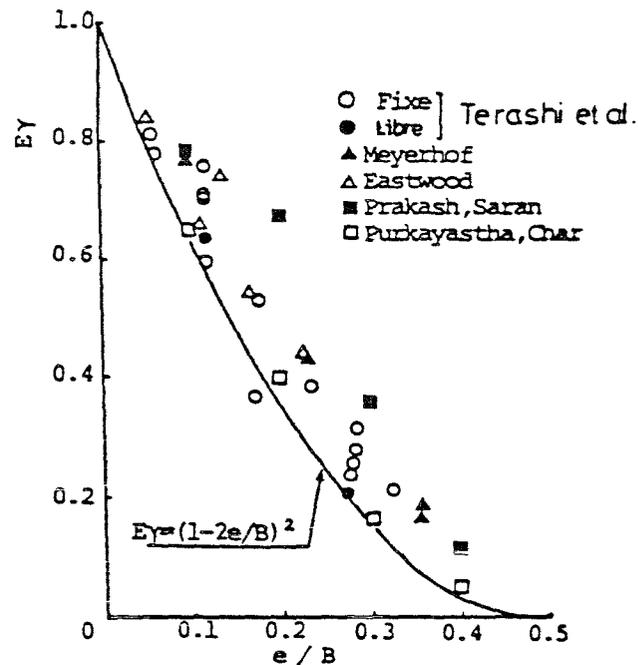
$$E_\gamma = q_e/q \tag{5}$$

$q_e$  et  $q$  sont respectivement les capacités portantes avec excentrement et sans excentrement. Selon [9], ce facteur de réduction est calculé par la relation suivante :

$$E_\gamma = (1 - 2e/B)^2 \tag{6}$$

L'ensemble des résultats sur modèles centrifugés de Terashi et al [8], et ceux obtenus par d'autres auteurs sont rassemblés à la fig. 10.

La bonne concordance des résultats obtenus sur centrifugeuse avec ceux des autres approches est à noter.

Fig. 10 : évolution de  $E_y$ 

## VI. CONCLUSIONS

Les exemples d'essais sur modèles réduits centrifugés, relatifs au génie côtier sont maintenant nombreux. Ceux présentés ici ont été choisis pour être représentatifs des différentes applications possibles de la méthode. L'accent a été mis sur quelques problèmes inhérents à ces essais : modélisation du sol, choix de paramètres représentatifs du phénomène étudié, modélisation de modèles.

Les expériences parfois complexes requièrent des études de faisabilité préalables, ou bien des études préliminaires comme celles illustrées par les travaux sur la capacité portante de digues sur bicouche.

Les études sur modèle réduit en centrifugeuse vont probablement connaître un développement important dans la décennie qui vient puisque les centres de recherches et les universités dotés de ce moyen d'essai sont de plus en plus nombreux.

## REFERENCES

- [1] - CORTE J.F., 1989 "L'essor de la modélisation en centrifugeuse en géotechnique". *Revue Française de Géotechnique*, n° 48, pp. 7-13.
- [2] - GARNIER J., 1990 "Etude sur modèles réduits centrifugés en Génie Civil". *1ères Journées Génie Côtier-Genie Civil*, LE HAVRE, à paraître.

- [3] - CRAIG W.H., 1988 "Centrifuge models in marine and coastal engineering". *Centrifuges in soils mechanics*, Craig, James & Schofield Editors, Balkema, ROTTERDAM, pp. 149-168.
- [4] - *THE DELFT GEOTECHNICS CENTRIFUGE*, document relatif a la centrifugeuse de DELFT, 7 p.
- [5] - LEVACHER D., GARNIER J., CINTRA J.C., et BOUAFIA A., 1991 "Etude expérimentale de pieux sollicités latéralement", *X European Conference on soils mechanics and foundation engrg.*, FLORENCE, 4 p., à paraître.
- [6] - ROWE P.W., CRAIG W.H., 1976 "Studies of offshore caissons founded on Oosterschelde Sand", *Design and Construction of offshore structures*, Institution of Civil Engineers, LONDON, pp. 49-55
- [7] - LE TIRANT P., NAUROY J.F., MASSON X. et LUONG M.P., 1978 "Simulation en centrifugeuse du comportement des fondations de plateformes marines à embase poids". *Annales de l'I.T.B.T.P.*, n° 152, pp. 145-151.
- [8] - TERASHI M. KITAZUME M. et TANAKA H., 1984, "Application of P.H.R.I. Geotechnical centrifuge", *Proceedings of International Symposium on Geotechnical Centrifuge Model Testing*, TOKYO, pp. 164-169.
- [9] - MEYERHOF G.G., 1953 "The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads", *Proceedings 3rd I.C.S.M.F.E.*, Vol 1, pp. 440-445.