



# ETUDES SUR MODELES REDUITS CENTRIFUGES EN GENIE CIVIL

J. Garnier

Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Nantes

## **ABSTRACT :**

*In civil engineering studies, reduced scale models tested under normal gravity have drastic limitations.*

*When gravity is a major factor in the equilibrium, forces due to mass have to be well simulated on the models. To obtain this similitude, the reduced scale models have to be placed into a centrifugal acceleration field. This method is now used in many countries and the growth of the centrifuge modelling is phenomenal. The paper deals with the conditions of similitude, describes the LCPC centrifuge and presents various applications in civil engineering and geotechnical fields.*

## **1 - INTRODUCTION**

E. PHILLIPS a été le premier à proposer, dans un compte rendu à l'Académie des Sciences de janvier 1869, l'utilisation de la force centrifuge pour assurer un meilleur respect des conditions de similitude lors d'études sur modèles réduits. E. PHILLIPS projetait même de recourir à cette méthode pour l'étude de très grands ponts métalliques comme celui qui était envisagé à l'époque pour le franchissement de la Manche.

En fait, la modélisation par centrifugation n'a été effectivement mise en oeuvre comme moyen d'étude en génie civil que depuis environ 20 ans. Elle connaît ces dernières années un essor considérable comme en témoigne le développement actuel du parc mondial des centrifugeuses. L'Europe et la France sont maintenant bien équipées, puisque sur la douzaine de machines de plus de 3 mètres de rayon utilisées en génie civil dans le monde, 6 sont installées en Europe et 2 sont situées en France (LCPC Nantes et CEA/CESTA).

## 2. INTERET DES ESSAIS SUR MODELES REDUITS EN GENIE CIVIL

Il existe plusieurs voies complémentaires pour aborder l'étude des ouvrages de génie civil et des interactions sols-structures.

- Approche théorique qui nécessite de connaître la loi de comportement des matériaux utilisés et de disposer de méthodes de calcul performantes. Les limites actuelles sont dues précisément à la complexité de la rhéologie des géomatériaux, et en particulier des sols, et aux capacités de calcul nécessaires pour traiter par exemple les problèmes tridimensionnels.
- Approche expérimentale, soit en instrumentant des ouvrages en vraie grandeur, soit en ayant recours aux essais sur modèles réduits. Le comportement des structures réelles constitue évidemment la référence, mais leur instrumentation et leur suivi présentent de nombreuses difficultés (coûts et délais élevés, conditions d'expérience difficiles à contrôler, hétérogénéité des matériaux surtout dans le cas des sols, impossibilité de reproduire certaines sollicitations du fait de leur nature ou de leur amplitude, d'effectuer des études paramétriques, de pousser les ouvrages à la rupture). Dans la plupart de ces cas, l'étude sur modèles réduits devient la seule approche expérimentale possible, puisqu'elle ne souffre pas de ces limitations.

Le recours aux modèles réduits est d'ailleurs une pratique courante et ancienne en mécanique des fluides. Les résultats obtenus servent à la résolution d'innombrables problèmes (aménagement fluviaux et portuaires, comportement des navires, recherches de forme en aéronautique et dans l'automobile, etc.).

En génie civil, et particulièrement en géotechnique, cette méthode nécessite, par contre, le respect de certaines conditions qui rendent sa mise en oeuvre plus complexe. En effet, les forces dues aux masses propres jouent alors un rôle essentiel dans les équilibres en jeu, et doivent être simulées correctement sur le modèle ce qui est obtenu en plaçant ce modèle dans un champ d'accélération centrifuge (cf. paragraphe 3).

Cette nouvelle méthode d'essai connaît ces dernières années un développement considérable comme en témoigne l'accroissement du parc mondial des grandes centrifugeuses de génie civil (cf. paragraphe 5).

### 3. RAPPEL DES CONDITIONS DE SIMILITUDE

Pour observer les mêmes phénomènes sur un ouvrage en grandeur réelle et sur son modèle à échelle réduite, il est nécessaire de respecter, entre les différentes grandeurs physiques qui interviennent, certaines relations dites conditions de similitude. Ces conditions se présentent sous la forme de relations auxquelles doivent satisfaire les «échelles», notées  $f^*$ , c'est-à-dire les facteurs définis comme le rapport de la grandeur physique de la maquette  $f_m$ , à la grandeur homologue du prototype,  $f_p$ . Pour les milieux continus, les équations indéfinies d'équilibre de la mécanique sont :

$$\sum_j \frac{\delta \sigma_{ij}}{\delta x_j} + \rho \left( g_i - \frac{d^2 \xi_i}{dt^2} \right) = 0$$

$x_j$  désignant les coordonnées,  
 $\sigma_{ij}$  les composantes du tenseur des contraintes,  
 $\xi_i$  celles du déplacement,  
 $g_i$  celles des forces de masse,  
 $\rho$  la masse volumique et  $t$  le temps.

Si l'on modifie les unités, on obtient :

$$\sigma^* l^{* -1} \sum_j \frac{\delta \sigma'_{ij}}{\delta x'_j} + \rho^* \rho' \left( g^* g'_i - \xi^* t^{* -2} \frac{d^2 \xi'_i}{dt'^2} \right) = 0$$

$l^*$  étant l'échelle de réduction des longueurs.

L'équation restera formellement vérifiée si les échelles satisfont aux deux conditions :

$$\sigma^* = \rho^* g^* l^* \quad (3)$$

$$\xi^* = g^* t^{*2} \quad (4)$$

## SESSION II

Lorsque les efforts pondéraux tiennent un rôle essentiel dans les équilibres en jeu, il est indispensable de satisfaire au mieux la condition de similitude (3). Les deux conditions supplémentaires sont :

$\sigma^* = 1$  car les niveaux de contrainte doivent être identiques sur le prototype et sur le modèle.

$\rho^* = 1$  car il n'existe pas de matériaux de substitution à la plupart des géomatériaux, et en particulier aux sols du fait de la complexité de leur rhéologie.

La condition de similitude (3) devient alors :

$$g^* l^* = 1$$

Autrement dit, un modèle réduit à l'échelle du 1/100 ( $l^* = 1/100$ ) devra être soumis à cent fois l'accélération de la pesanteur ( $g^* = 100$ ) pour que cette condition soit satisfaite. Les centrifugeuses récentes permettent de soumettre des modèles de plusieurs tonnes à des accélérations de 100 ou 200 G (cf. paragraphes 4 et 5).

Les autres facteurs d'échelle se déduisent des relations précédentes et sont présentés dans le tableau I ci-dessous.

Grandeur du modèle Grandeur du prototype	
Masse volumique	1
Longueur	1/N
Déplacement	1/N
Déformation	1
Contrainte	1
Vitesse	1
Accélération	N
Temps	1/N (problème dynamique)
Temps	1/N <sup>2</sup> (problème de diffusion)

Tableau I - Facteurs d'échelle pour des essais en centrifugeuse faits à  $Ng$  avec les mêmes matériaux que dans l'ouvrage prototype.

#### 4. CARACTERISTIQUES DE LA CENTRIFUGEUSE DU LCPC

La centrifugeuse du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées est un outil de recherche national en service depuis 1986 sur le centre de Nantes. Ses caractéristiques présentées ci-dessous la placent parmi les 5 plus grandes centrifugeuses de génie civil actuellement en service dans le monde.

##### 4.1. La machine

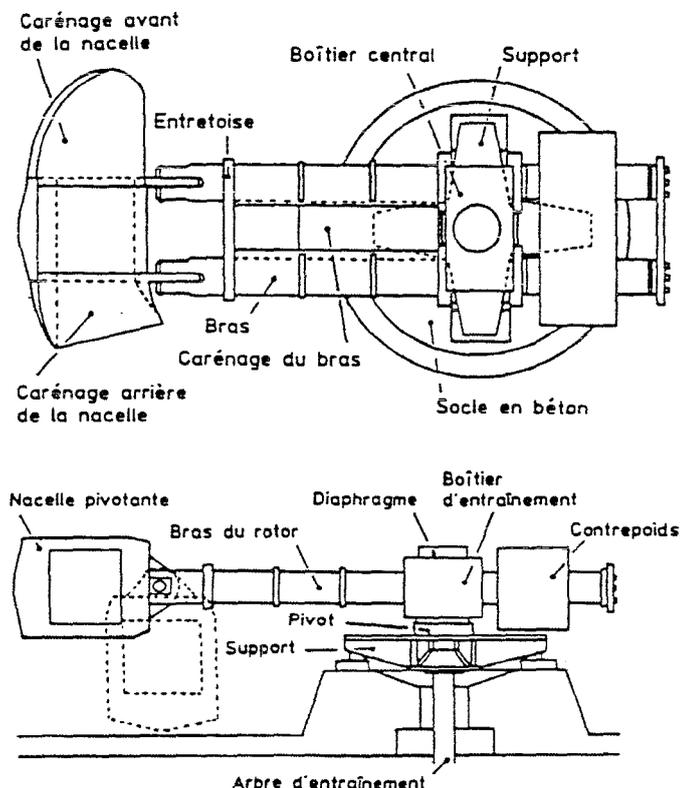
Elle a été conçue et réalisée par la société française ACUTRONIC sur la base d'un cahier des charges élaboré par le LCPC et est installée sur le centre de Nantes du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Elle est décrite en détail dans l'article CORTE J.F., GARNIER J. (réf. 1).

Elle peut être caractérisée par quelques paramètres :

- Rayon 5,50 m (plus ce rayon est grand, plus sont réduits les gradients d'accélération sur la maquette).
- Accélération maximale 200 G (G est l'accélération de la gravité terrestre soit  $9.81 \text{ m/s}^2$ ).
- Masse maximale de la maquette embarquée 2000 kg à 100 G et 500 Kg à 200 G.
- Volume utile de la nacelle pivotante 1.4 m x 1.15 m x 1.5 m.

La figure 1 montre les vues de dessus et en élévation de la centrifugeuse.

Fig. 1 - Centrifugeuse du LCPC.



Compte tenu de ces caractéristiques, les échelles de réduction les plus couramment utilisées vont de 1/10 à 1/100.

Un bâtiment spécial a été conçu pour cet équipement et 900 m<sup>2</sup> sont maintenant consacrés à cette activité (fig. 2).

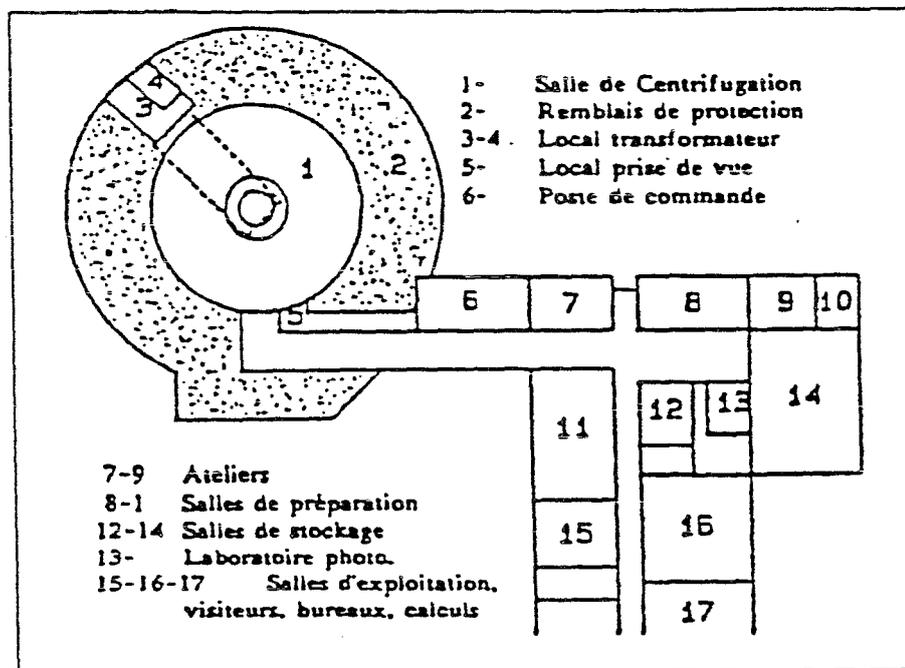


Fig. 2 - Plan des locaux.

Dans les salles de préparation, des équipements ont été installés pour la reconstitution des massifs d'essai (malaxeur et presses de consolidation pour les argiles, trémie automatique de pluviation pour les sables).

Outre les salles de préparation des modèles, on dispose aussi d'ateliers mécanique et électronique, d'un hall de stockage des maquettes et matériaux d'essais, d'un laboratoire photographique.

#### 4.2. Interventions, observations, mesures

Toutes les expériences se déroulent en deux phases. Dans un premier temps, on porte le modèle au niveau d'accélération centrifuge requis par le respect des similitudes (paragraphe 3). Sous cette accélération centrifuge, et sans arrêter la

centrifugeuse, on doit alors solliciter le modèle et suivre son comportement et sa réponse aux sollicitations.

Les actionneurs équipant le modèle (vérins, moteurs, servovalves, électrodistributeur) sont alimentés en énergie au moyen de contacts tournants électriques ou de joints tournants pour l'huile, l'air comprimé, l'eau. Les commandes sont effectuées depuis la salle de contrôle, soit manuellement, soit par le calculateur via une liaison IEEE.

Les modèles sont également équipés de capteurs divers (force, pression, déplacement, température,...) et les mesures sont réalisées au moyen de plusieurs chaînes d'acquisition embarquées sur la centrifugeuse et pilotées par l'intermédiaire du bus IEEE (chaînes HBM UPM 3200, HP 3852, KRENZ TRM 4010). Enfin, le modèle peut être observé à l'aide d'un appareil photographique et d'une caméra CCD à optique déportée installée sur le conteneur d'essai.

Il est aussi possible d'appliquer, après essai, les techniques de traitement numérique des images enregistrées. Les champs de vitesse et de déplacement sont ainsi obtenus automatiquement. Cette méthode a été récemment mise en oeuvre sur plusieurs programmes expérimentaux (Etude des écoulements de matériaux en trémie, étude des déformations dans le sol au voisinage du front de taille d'un tunnelier à bouclier de boue).

## **5 - PARC MONDIAL DES CENTRIFUGEUSES DE GÉNIE CIVIL**

Les études sur modèles réduits centrifugés connaissent actuellement un développement très rapide. Il est vraisemblable que cet essor va encore s'amplifier dans les années à venir puisque de nouvelles installations bénéficiant de tous les progrès de l'informatique, de l'électronique et de la métrologie sont régulièrement mises en service.

Ainsi, sur le tableau II où sont recensées les centrifugeuses de génie civil de plus de 4 m de rayon, 5 datent de moins de 5 ans et 3 sont à l'état de projet.

SESSION II

Tableau II - Parc mondial des grandes centrifugeuses de génie civil (rayon supérieur à 4 m).

Pays	Organisme	Année de mise en œuvre	Rayon (m)
France	CEA-CESTA	1964	10,0*
USA	Lab. Sandia	1968	7,5*
GB	Univ. Cambridge	1974	4,3
URSS	AZNIISM	1974	5,5
Chine	CHIDI	1980	10,8*
France	LCPC	1986	5,5
RFA	Univ. Bochum	1987	4,1
USA	Univ. Boulder	1988	6,0
Pays-Bas	Delft Geotechnologies	1989	6,0
USA	Univ. Davis	1989	9,0
Canada	C. Core	projet	6,5
USA	US Corp Eng.	projet	6,5
Chine	NHRI	projet	5,5
Japon	Takenaka	projet	6,5

\* installations non spécifiques au génie civil.

A ce parc en extension rapide des grandes centrifugeuses de génie civil, il convient d'ajouter les installations de taille plus modeste dont le nombre ne cesse également de croître. Des universités s'équipent de ce moyen d'essai en Europe, aux USA, en Australie, ainsi que de grands groupes industriels au Japon.

De nouveaux domaines d'utilisation sont explorés, et il devient maintenant possible de modéliser des structures et des problèmes de plus en plus complexes tels que, par exemple :

- Séismes,
- Formation de glace (plates-formes offshore),
- Effet des vagues et des tempêtes,
- Chargements cycliques (servovérins)
- Battage de pieux,
- Ancrage par succion.

## 6 - DOMAINES D'UTILISATION

L'expérimentation sur modèles réduits centrifugés constitue une troisième voie d'étude et de recherche en complément des approches théoriques (modèles numériques) et des essais sur ouvrages en vraie grandeur.

Ce paragraphe présente, à partir d'exemples tirés des expériences conduites au LCPC depuis la mise en service de l'équipement en 1986, les différents domaines d'utilisation en génie civil :

- Etude de phénomènes complexes,
- Calage de modèles numériques,
- Etudes paramétriques,
- Modélisation d'un ouvrage réel.

Il convient d'ajouter que lorsque ces centrifugeuses sont installées dans des universités comme cela est souvent le cas à l'étranger, elles sont en outre utilisées pour la formation et l'enseignement.

### 6.1. Etude de phénomènes complexes

Certaines interactions sols-structures ne peuvent être étudiées, ni sur modèles numériques, ni sur ouvrages réels.

Dans le premier cas, les limites sont liées aux capacités de calcul (insuffisantes pour les problèmes à trois dimensions) et à la méconnaissance de la loi de comportement des matériaux (cas des sols, des matériaux localisant les déformations, cas des grandes déformations, cas des écoulements des milieux granulaires...).

Dans l'étude sur ouvrages réels, les limites viennent le plus souvent des dimensions des ouvrages (structures offshore, groupes de fondation) et de la nature ou de l'intensité des chargements (tempête, séisme, charges verticales trop importantes, chocs).

Exemple 1 : Ecoulement des matériaux granulaires en trémie (réf. 2)

Un modèle réduit de trémie bidimensionnelle à faces transparentes a été utilisé pour étudier les modes d'écoulement de sables de Loire roulés ou broyés, à différentes teneurs en eau. La géométrie pouvait être modifiée de façon à simuler des trémies à extraction ou à écoulement, proches des configurations des trémies réelles SAE et BIP DIFFUSION de la station d'essai des matériels routiers de Blois. Un maillage régulier de taches de sol colorées était visualisé à l'aide d'une caméra CCD embarquée. Les images étaient digitalisées et traitées

## SESSION II

numériquement pour déterminer les trajectoires et les champs de vitesse (fig. 3b).

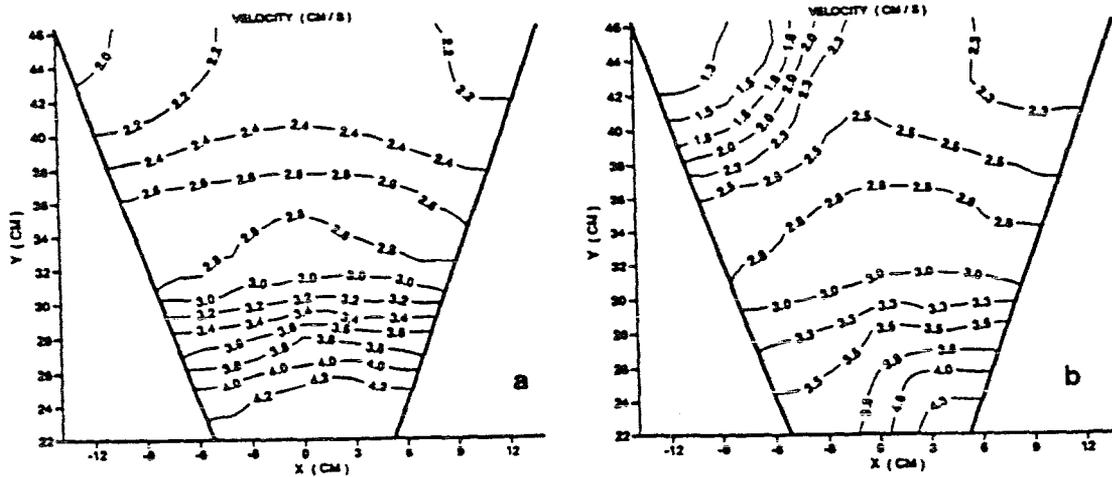


Fig. 3 - Ecoulement en trémie.  
Champ de vitesse théorique (a) et expérimental (b)  
pour un sable de Loire roulé ( $t = 3$  s).

Près de 60 essais ont ainsi été réalisés et traités permettant d'étudier l'influence des caractéristiques et de l'origine du matériau (teneur en eau, sable roulé ou sable broyé) et de la géométrie de la trémie (inclinaison des faces, ouverture à la base, ouverture de la trappe) sur le débit et sur la nature de l'écoulement (en masse, alterné en cheminée, voûte stable).

Ces résultats sont présentés dans la thèse de RANAIVOSON (réf. 2) et ont été utilisés pour la validation d'un modèle théorique d'écoulement en trémie (fig. 3).

### Exemple 2 : Ancrages par succion

Deux importants contrats sont en cours de réalisation pour une compagnie pétrolière nord-américaine. Ils concernent l'étude expérimentale d'ancrage par succion de plates-formes à lignes tendues (Tension Leg Platform).

### Exemple 3 : Front de taille devant un tunnelier (réf. 3)

L'étude de la stabilité du front de taille d'un tunnelier à bouclier de boue est rendue difficile par le caractère tridimensionnel du problème. Un modèle

réduit simulant un tunnelier de 5 m de diamètre a été conçu pour l'étude des conditions de stabilité et des mécanismes de rupture (fig. 4).

L'influence de différents paramètres a pu être déterminée expérimentalement (profondeur du tunnel, présence d'une partie non revêtue et d'un vide annulaire, caractéristiques du sol). Les résultats sont détaillés dans la thèse P. CHAMBON (réf. 3).

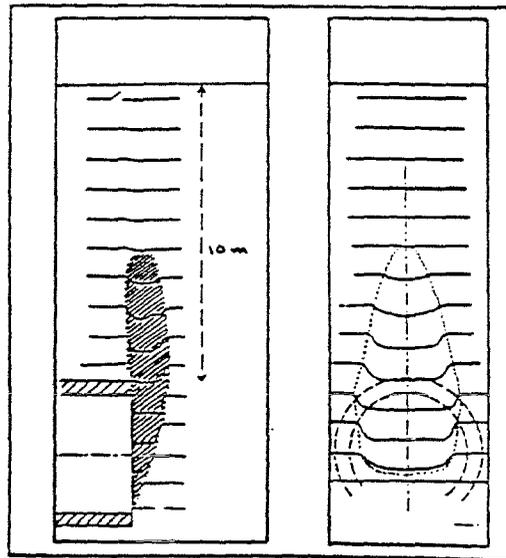


Fig. 4 - Mécanisme de rupture observé pour une profondeur de 2 fois le diamètre du tunnel (l'effondrement ne remonte pas à la surface).

## 6.2. Calage de modèles numériques

Sur modèles réduits, les conditions expérimentales sont mieux maîtrisées que sur ouvrage réel (Homogénéité et meilleure caractérisation du massif, contrôle des conditions de chargement, qualité des mesures). La modélisation en centrifugeuse est de plus en plus utilisée pour effectuer le calage de modèles numériques, tant en France qu'à l'étranger.

Exemple 1 : Plusieurs séries d'essais ont été réalisées au LCPC à la demande du groupe Validation de Modèles Numériques du GRECO CNRS Rhéologie des géomatériaux.

Pour faciliter la modélisation numérique, des essais 2D ont été retenus (chargement vertical centré de fondation superficielle circulaire rigide à base rugueuse).

## SESSION II

Le matériau était du sable d'Hostun et le diamètre de la fondation prototype était de 3.6 m (56.6 mm à 63.6 G). La très bonne répétitivité des essais apparaît sur la figure 5 où sont présentées les courbes de tassement relatif en fonction de la charge appliquée pour deux densités différentes (réf. 4).

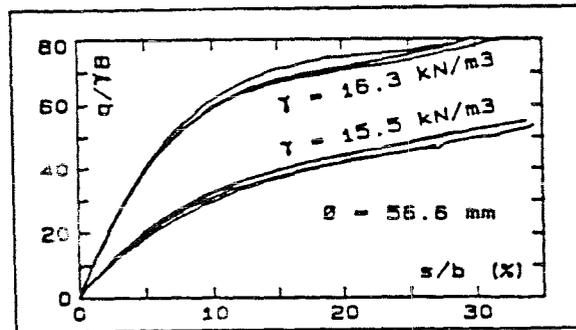


Fig. 5 - Courbes de chargement d'une fondation circulaire de 3.6 m de diamètre.

Ces résultats expérimentaux figureront dans la banque de données internationale pour la validation des modèles numériques géotechniques du comité Benchmarks for Geotechnical Modeling.

### Exemple 2 : Comportement en mer d'une fondation sur sable carbonaté (réf. 5)

L'Institut Français du Pétrole a modélisé sur la centrifugeuse du LCPC, une fondation superficielle de 30 m de diamètre reposant sur du sable carbonaté saturé d'Ouessant. Ces sables rencontrés fréquemment en mer posent de difficiles problèmes de fondation du fait des incertitudes qui pèsent sur leur comportement sous charge cyclique notamment. Lors des essais, les chargements cycliques dus à l'effet des vagues sur la structure, ou à celui des tempêtes ont été simulés. La figure 6 montre le tassement observé sous l'action de quatre tempêtes successives, pour deux essais de chargement, symétrique et asymétrique. L'érouissage du sable sous l'action des chargements cycliques apparaît clairement.

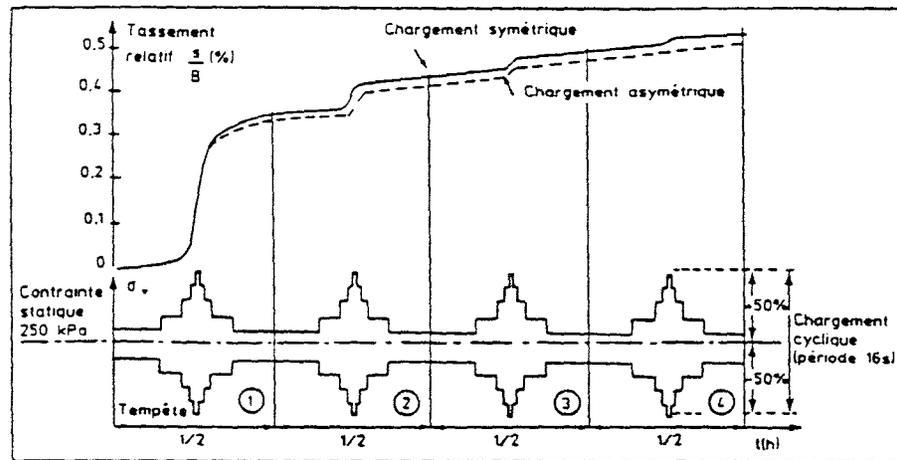


Fig. 6 - Evolution du tassement sous l'effet de tempêtes successives.

### Exemple 3 : Consolidation sous poids propre de vases de dragage (réf. 6)

Dans les travaux portuaires et maritimes, les produits de dragage vasards sont de plus en plus souvent mis en dépôt à terre. La consolidation sous poids propre de ces matériaux très mous est mal connue et difficile à étudier sur site réel du fait de la durée considérable du phénomène. Compte tenu des relations de similitude, les temps de consolidation primaire sont divisés par 10000 pour des modèles au centième.

La consolidation d'un dépôt de 5 mètres d'épaisseur sur une durée de 20 ans a ainsi pu être simulée. Les matériaux utilisés étaient des vases du port de La Rochelle Pallice. Les résultats ont ensuite été comparés à ceux de calculs effectués à l'aide du programme CONMULT développé au LCPC. Les écarts sur les tassements en fin d'essai (entre les expériences et le calcul) sont inférieurs à 9 % (fig. 7).

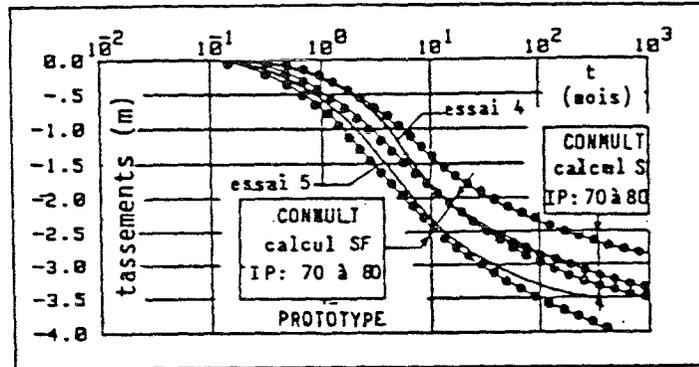


Fig. 7 - Consolidation sous poids propre de vases de la Rochelle Pallice. Comparaison calcul-expérience.

### 6.3. Etudes paramétriques

Il s'agit du domaine de prédilection de la modélisation en centrifugeuse puisqu'il est assez facile de répéter les expériences à volonté en ne modifiant que certains paramètres choisis à l'avance. Cette approche est rarement possible sur site réel du fait, par exemple, de l'hétérogénéité des massifs de sol dans le cas de problèmes géotechniques, et toujours extrêmement coûteuse.

#### Exemple 1 : Résistance latérale de pieux isolés ou en groupe

Un important programme a été entrepris dans le cadre de la thèse A. Bouafia, en parallèle avec quelques essais sur site réel (Plancoet, Le Rheu). Pour l'étude de pieux isolés, la méthode des essais sur modèles centrifugés est maintenant très performante (réf. 7). Elle permet, en effet, la mesure des déplacements et des moments dans le pieu, mais aussi la détermination des courbes de réaction p-y très utilisées dans les méthodes de dimensionnement au modèle de réaction (fig. 8).

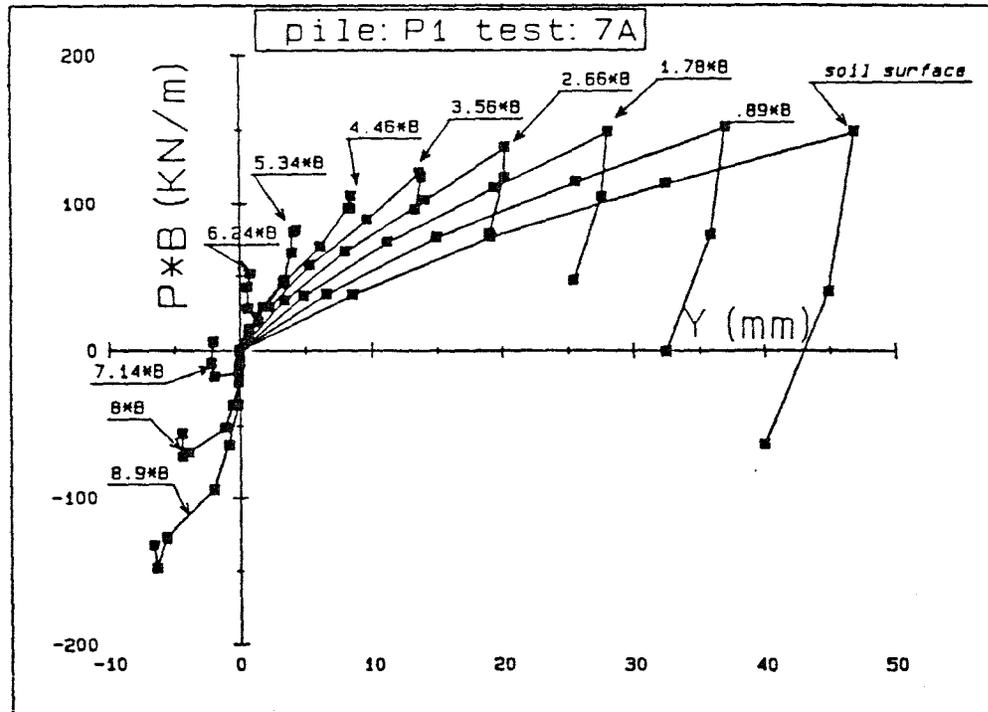


Fig. 8 - Courbes de réaction p-y déterminées expérimentalement (Sable du Rheu,  $I_D = 63\%$ ).

Pour l'étude de l'effet de groupe, les expériences sur modèles réduits centrifugés constituent la seule approche expérimentale envisageable du fait du nombre très élevé d'essais à réaliser (variation des espacements relatifs, du nombre de pieux, de la fiche, de la direction de l'effort latéral). Les résultats des premières séries d'essai sont présentés dans une autre contribution à ces journées (Mezazigh et coll.).

#### Exemple 2 : Silos métalliques céréaliers

Dans le cadre du projet national SILOS, des expériences ont été réalisées en complément des essais sur la cellule D en grandeur réelle, de la base expérimentale de CHARTRES (silo métallique cylindrique de 7.50 m de hauteur et 6.00 m de diamètre).

L'étude paramétrique proprement dite a porté sur l'influence sur le comportement du silo (mode d'écoulement, contraintes dans la paroi) du diamètre et de la position de l'orifice de vidange, de la rugosité des parois, d'un arrêt puis d'une reprise de l'écoulement (réf. 8).

Au total, 120 expériences de vidange ont été réalisées, l'écoulement était suivi à l'aide de caméras embarquées, soit en vue de dessus, soit en coupe verticale à travers une vitre placée dans le plan diamétral du silo.

#### 6.4. Modélisation d'ouvrage réel

Contrairement aux cas précédents, la méthode a été jusqu'à présent peu utilisée en géotechnique pour l'étude d'un ouvrage donné du fait des problèmes de modélisation du massif de sol réel. Toutefois, le développement et les progrès actuels sont tels que cette approche peut malgré tout devenir intéressante lorsque les autres méthodes sont inopérantes ou en complément de ces méthodes.

Exemple 1 : Remblai de protection de la RN 90 contre la chute de blocs rocheux

La déviation d'Aigueblanche sur la route nationale 90 entre Albertville et Moutiers nécessite la réalisation d'un merlon de protection contre la chute de blocs rocheux (500 tonnes à 120 km/h par référence à un éboulement survenu en 1977).

Aucune méthode ne permet actuellement de dimensionner un remblai de protection pour une telle sollicitation.

Une campagne de 19 essais a donc été effectuée pour la Direction Départementale de l'Équipement de la Savoie, pour l'étude de l'influence des caractéristiques du matériau de remblai, de la forme du projectile, de la géométrie du merlon, de la cote du point d'impact (réf. 9). La figure 9 montre la dispersion observée sur 3 essais préliminaires identiques.

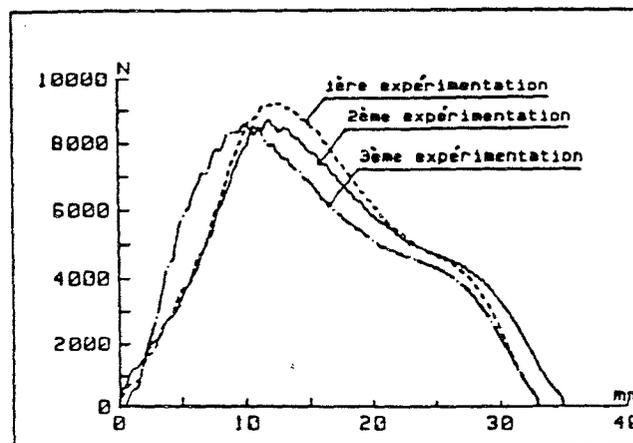


Fig. 9 - Variation de l'effort résistant appliqué au bloc lors de sa pénétration dans le merlon de protection.

Autres exemples : La tendance signalée ci-dessus du recours aux modèles réduits centrifugés pour l'étude de certains ouvrages réels est récente. Elle se concrétise par le fait que sur certains grands projets, les donneurs d'ordre, ou les maîtres d'œuvre commencent à imposer ce type d'approche, parallèlement aux méthodes d'étude traditionnelles (Projet HIBERNIA de plate-forme offshore pour MOBIL, Viaduc RION-ANTIRION en Grèce).

## 7 - CONCLUSIONS

Les essais sur modèles réduits centrifugés constituent désormais un moyen d'étude et de recherche complémentaire des approches classiques.

Comme en témoignent les exemples tirés de l'activité de la centrifugeuse L.C.P.C., les domaines d'utilisation actuels sont déjà très variés mais d'autres champs seront prochainement accessibles après la mise en service de nouveaux équipements (traitement numérique d'images en temps réel et téléopérateur embarqué, pour la centrifugeuse L.C.P.C. par exemple).

Comme par ailleurs de nouvelles installations de plus en plus performantes sont régulièrement mises en service, il est certain que l'activité mondiale va connaître un essor considérable dans les années qui viennent. La voie est déjà ouverte, comme cela a fréquemment été le cas en génie civil, par les centres de recherche et les bureaux d'études offshore qui ont de plus en plus souvent recours à cette méthode d'essai.

## REFERENCES

1. CORTE J.F., GARNIER J., (1986), Une centrifugeuse pour la recherche en géotechnique, *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 146, 5-28.
2. RANAIVOSON D., (1989), Dosage des granulats. Etude des phénomènes d'écoulement et de voûte. Application à la conception des trémies doseuses, *Thèse de doctorat*, Univ. Nantes.
3. CHAMBON P., (1990), Etude sur modèles réduits centrifugés. Application aux tunnels à faible profondeur en terrain meuble pulvérulent, *Thèse de doctorat*, Univ. Nantes.
4. MEIMON Y., CORTE J.F., FARGEIX D., FLAVIGNY E., (1991), Validation de modèles pour le calcul des fondations superficielles, *ECSMFE*, Florence, à paraître.

*SESSION II*

5. LE TIRANT P., FAY J.B., NAUROY J.F., MEIMON Y., LASSOUDIÈRE F., (1987), Modélisation en centrifugeuse du comportement en mer d'une fondation d'ouvrage sur un sable compressible, *8<sup>ème</sup> Cong. Franc. de Mécanique*, Nantes, Vol. 2, 16-17.
6. BALAY J., BERDAT R., HARFOUCHE L., (1988), Etude en centrifugeuse de la consolidation sous poids propre de sols très lâches, *Centrifuge 88*, Paris, Balkema, 193-202.
7. BOUAFIA A., (1990), Modélisation en centrifugeuse de pieux isolés chargés latéralement, *Thèse de doctorat, Univ. de Nantes*, (à paraître).
8. CORTE J.F., LEPERT P., (1990), Pertinence d'essais sur modèle réduit en centrifugeuse pour l'étude du comportement d'un silo métallique céréalier, *Rev. Franc. Géotech.*, 52, 27-36.
9. LEPERT P., CORTE J.F., (1988), Etude en centrifugeuse de l'impact de gros blocs rocheux sur un remblai de protection. *Centrifuge 88*, Paris, Balkema, 457-465.