

# Une trémie embarquée pour la construction de remblais de sable en centrifugeuse : conception et premières applications

**Y. AKOU**

*Section Rhéologie  
et Modélisation des sols  
Division Mécanique des sols  
et Géologie de l'ingénieur*

**F. DERKX,  
É. MERLIOT**

*Section Études  
et Fabrication  
Service Métrologie  
et Instrumentation  
Laboratoire central  
des Ponts et Chaussées  
58, boulevard Lefebvre,  
75732 Paris Cedex 15*

**G. RAULT**

*Section Mécanique des sols  
et Centrifugeuse  
Division Reconnaissance  
et Mécanique des sols  
Laboratoire central  
des Ponts et Chaussées  
Route de Pornic,  
BP19, 44340 Bouguenais*

## Résumé

Une trémie a été développée au LCPC pour construire des remblais de sable dans un conteneur pendant la rotation de la centrifugeuse. Cette trémie fixe est divisée en couloirs dont le remplissage est défini en fonction de la forme du remblai. L'ouverture des couloirs est commandée par l'intermédiaire de vérins hydrauliques et de plaques perforées mobiles. Le système est opérationnel pour des accélérations de 70 g. L'article décrit le matériel, son installation sur le conteneur et dans la centrifugeuse, et les systèmes de mesure associés. Il présente ensuite un exemple d'utilisation de ce système pour l'étude de l'élargissement de remblais sur sols mous.

# Hopper installation for centrifuge construction of sand embankments : design and first applications

## Abstract

A hopper was developed at LCPC for the inflight construction of sand embankments inside a container placed in the centrifuge. The fixed hopper is divided into slots that are filled with sand, with heights depending on the desired shape of embankment. The slots are opened by means of hydraulic jacks and of mobile perforated metal strips. The hopper can be used for tests with accelerations up to 70 g.

The paper describes the hopper, its installation on top of the container and inside the centrifuge, and the associated measuring systems. A sample test using this hopper, for a study of the widening of embankments on soft soils, is presented.

## Introduction

Le comportement de remblais sur sol argileux de faible portance a fait l'objet d'une étude expérimentale par modélisation physique dans la centrifugeuse du LCPC à Nantes (Akou, 1995). Ce travail a nécessité la conception, la fabrication et la mise au point d'un dispositif permettant de construire un massif de sable de géométrie et de densité prédéfinies.

Après examen des dispositifs déjà utilisés sur d'autres centrifugeuses géotechniques, la technique adoptée utilise une trémie fixe, divisée en couloirs qui sont remplis de sable avant la mise en rotation de la nacelle, puis vidés ensemble ou consécutivement, par une commande hydraulique d'ouverture et de fermeture pilotée à partir de la salle de contrôle de la centrifugeuse. La trémie est équipée d'un portique amovible sur lequel sont fixés des capteurs de déplacements verticaux pour le relevé des tassements de surface. Cet article décrit le dispositif expérimental, quelques tests préliminaires et un exemple d'utilisation pour obtenir un remblai de forme trapézoïdale sous une accélération centrifuge de 70g.

## Spécifications

La méthode utilisée au LCPC pour la fabrication de massifs de sable de compacité donnée sous gravité terrestre consiste à mettre en œuvre le sable au moyen d'une trémie mobile se déplaçant à l'aplomb du conteneur. L'ouverture, la vitesse de déplacement horizontal et la hauteur au-dessus de la surface du massif en construction (hauteur de chute des grains, maintenue automatiquement constante) sont les paramètres réglables pour obtenir la densité souhaitée.

Cette technique de pluviation, largement éprouvée, permet de construire des massifs de sable, notamment des remblais, mis en forme par arasage des volumes. Après ces opérations, le conteneur est placé dans la nacelle de la centrifugeuse.

Construire de cette façon, sous gravité terrestre (1g), un remblai sur un massif d'argile et les soumettre ensuite à l'accélération centrifuge présente l'inconvénient majeur de ne pas dissocier les effets dus à la recompression du sol compressible sous son propre poids, de ceux résultant de l'effet seul du remblai. Par ailleurs, pour modifier la géométrie du remblai en cours d'essai, par exemple prévoir un phasage de construction, réaliser un élargissement, mettre en place une banquette latérale, il faut arrêter la centrifugeuse. Ces arrêts de la centrifugeuse provoquent des effets difficilement maîtrisables et mesurables.

La conception de la trémie « embarquée », autorisant la pluviation pendant la rotation de la centrifugeuse, tient compte de l'ensemble de ces difficultés et répond à la nécessité de contrôler tous les phénomènes liés ou non à l'essai lui-même (phase de montée en accélération, phase d'exécution du remblai). C'est sur ces bases que l'Université de Cambridge (Tornely, 1972; Beasley, 1973; Beasley et James, 1976), l'Université d'Australie occidentale à Nedlands (Randolph *et al.*, 1991) et le Laboratoire de Géotechnique de Delft (Grondmeca Delft, Nelissen, 1992) ont déjà développé des projets adaptés à leur propre centrifugeuse.

Si l'idée de base est de réaliser une trémie permettant de construire successivement deux remblais adjacents de densité et géométrie imposées, sa conception est conditionnée par l'espace utile dans la nacelle et doit tenir compte des commandes électriques et hydrauliques disponibles. Une première estimation des volumes de matériaux à mettre en œuvre (donc du poids) pour réaliser des remblais « réalistes » simulant des ouvrages réels, imposait de limiter le niveau d'accélération à 100g. Des études préliminaires ont conduit à limiter le projet à la mise au point d'une trémie fixe, permettant de construire sous 70g des modèles de remblais de dimensions maximales 572 mm x 800 mm x 72 mm en sable de Fontainebleau de densité comprise entre 13,7 et 16,8 kN/m<sup>3</sup>, à l'intérieur d'un conteneur de dimensions intérieures 1,2 x 0,8 x 0,36 m.

La limitation à 70g a été décidée pour réduire les efforts dans la trémie et faciliter le mouvement des grilles mobiles.

## Description de la trémie

La conception et la réalisation de la trémie ont été assurées par la section « Études et Fabrication » du service de Métrologie et Instrumentation du LCPC. La figure 1 présente le dispositif d'essai dans une configuration opérationnelle. Le conteneur rectangulaire est placé en premier sur la plate-forme de la nacelle, puis la trémie est posée et fixée sur le conteneur.

La trémie, de dimensions 800 mm x 400 mm, offre une hauteur maximale de remplissage de 130 mm (environ 70 kg de sable embarqué). Des cloisons longitudinales divisent la trémie en huit couloirs de 45 mm de largeur. Au fond de chaque couloir est placée une grille mobile perforée. Directement sous les grilles mobiles, une autre grille perforée fixe couvre toute la surface de la trémie. Les trous de la grille fixe et des huit grilles mobiles sont identiques et répartis uniformément : ils représentent 30 % de la surface totale. Chaque grille mobile est actionnée par un vérin dont la course est réglée en fonction du diamètre des trous de la grille. Les huit vérins sont activés hydrauliquement, séparément ou par groupe, par l'intermédiaire d'un distributeur dont les voies sont commandées électriquement depuis la salle de commande de la centrifugeuse.

La trémie est fixée sur les bords supérieurs du conteneur rectangulaire par l'intermédiaire de deux plats martyrs. Elle repose sur trois appuis (disposés à deux angles et au milieu d'une face opposée) équipés de capteurs de force (capteurs à jauges); cette disposition isostatique permet de contrôler la vidange du sable (Fig. 2).

Outre l'instrumentation qui lui est propre, la trémie est équipée d'un portique amovible (Fig. 3) situé juste à son aplomb et qui permet de mettre en place, selon un maillage précis, vingt et un capteurs de tassement. Cet appareillage permet de suivre le déplacement de l'interface sol-remblai selon trois profils transversaux. Des tiges allonges ( $\phi$  1 mm) prolongent le doigt des capteurs et traversent verticalement la trémie à l'intérieur de trous cylindriques forés dans l'épaisseur des cloisons. L'extrémité inférieure de chaque tige est munie d'un patin qui repose sur la surface du massif argileux et suit ses déplacements verticaux.

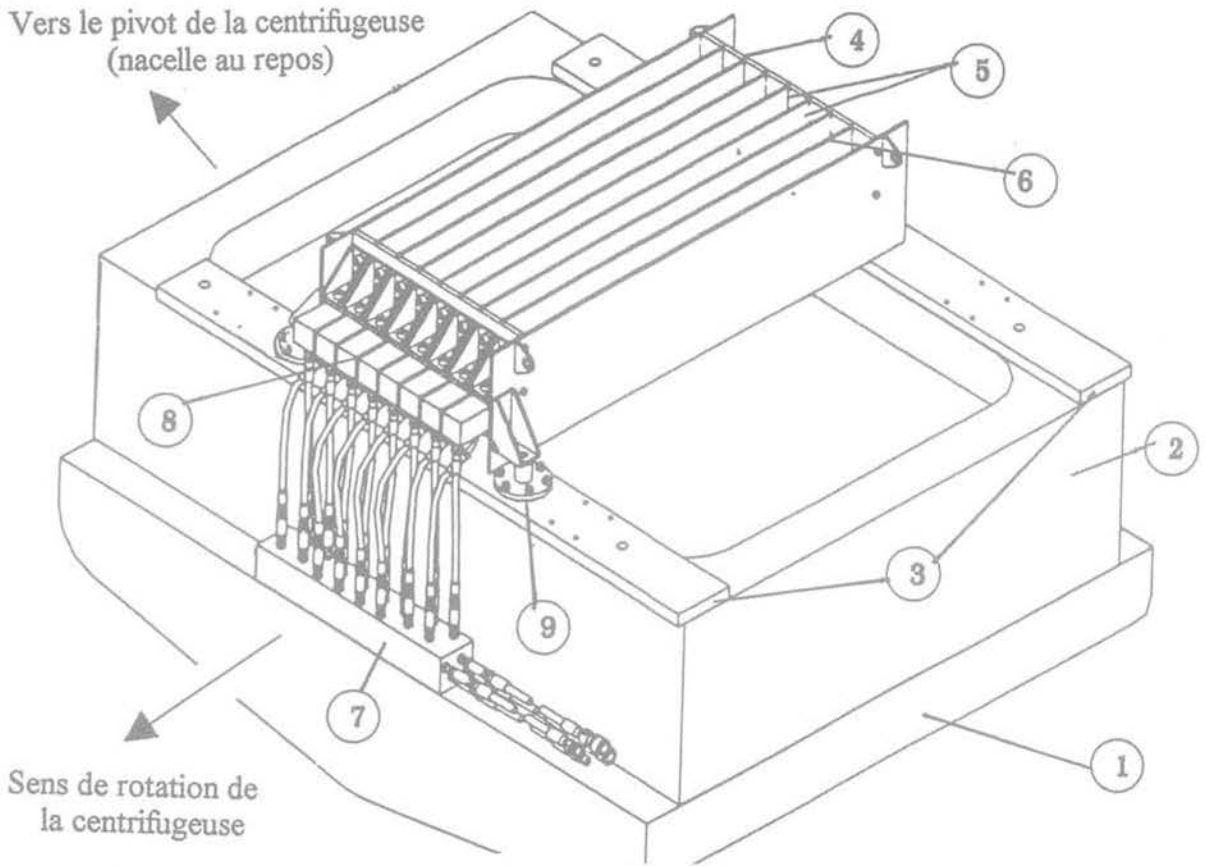


FIG. 1 Vue en perspective de la trémie sur le conteneur :

- 1 - plate-forme de la nacelle ;
- 2 - conteneur rectangulaire (avec le massif d'argile) ;
- 3 - plats martyrs pour fixation des dispositifs d'essai ;
- 4 - trémie embarquée ;
- 5 - couloirs remplis de sable (au nombre de 8) ;
- 6 - cloison ;
- 7 - distributeur hydraulique ;
- 8 - vérins hydrauliques (un vérin par couloir) ;
- 9 - capteur de force (contrôle de la vidange).

Isoparametric view of the hopper installed on top of the container :

- 1 - swinging platform ;
- 2 - rectangular container ;
- 3 - system for bolting the test devices ;
- 4 - hopper ;
- 5 - slots filled with sand (8) ;
- 6 - bulkhead ;
- 7 - hydraulic distributor ;
- 8 - hydraulic jack (one per slot) ;
- 9 - load cell (for sand release control).

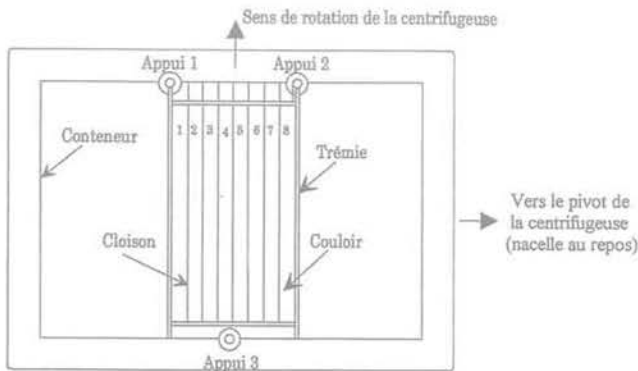


FIG. 2 Vue en plan de la trémie posée sur le conteneur.  
Plan view of the hopper installed inside the container.

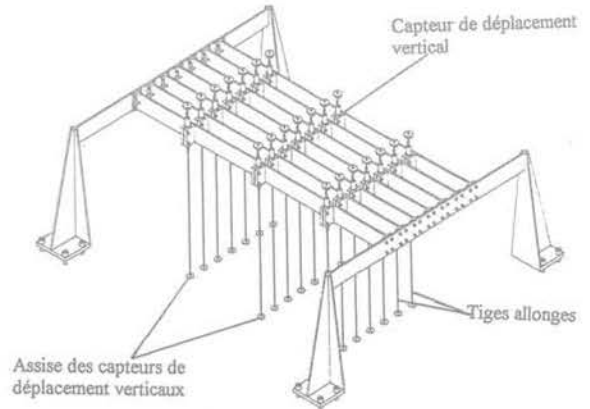


FIG. 3 Portique support des capteurs de déplacement vertical.  
Supporting frame for vertical displacement sensors.

## Remplissage de la trémie

La première application de la trémie a concerné l'étude au cours du temps de l'interaction de deux remblais adjacents dans deux configurations définies par leurs géométries successives :

• Première configuration :

- 1) construction d'un remblai principal de largeur en crête  $b$ ;
- 2) construction d'un remblai adjacent prenant appui sur le premier et de largeur en crête  $1,5 b$ .

• Deuxième configuration :

- 1) construction d'un remblai principal de largeur en crête  $b$ ;
- 2) construction d'un remblai adjacent prenant appui sur le premier et de même largeur en crête  $b$ .

Les deux variantes d'élargissement sont représentées sur la figure 4.

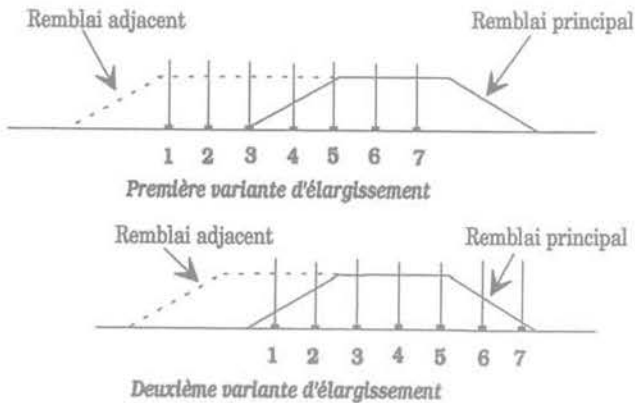


FIG. 4 Variants d'élargissement. Les chiffres (1 à 7) indiquent la position des capteurs de déplacement verticaux. Widening cases considered. The numbers (1 to 7) indicate the location of vertical displacement sensors.

Compte tenu de l'objectif de cette première étude, le remplissage des couloirs de la trémie permettant d'obtenir la géométrie désirée a été défini directement dans ces deux configurations.

La forme du massif de sable obtenu après l'ouverture des couloirs de la trémie dépend d'une part des délais d'ouverture des grilles mobiles et d'autre part de l'effet de la force de Coriolis lors de la chute du sable (la force de Coriolis, qui dépend de la vitesse de rotation de la centrifugeuse, fait suivre aux particules de sable une trajectoire curviligne dans un repère lié à la nacelle de la centrifugeuse). Des essais préliminaires ont permis de déterminer le remplissage des couloirs de la trémie qui permettent d'obtenir le remblai souhaité sous 70 g.

Les figures 5a et 5b présentent respectivement les profils de remplissage transversal et longitudinal des couloirs de la trémie pour la première variante d'élargissement. L'allure trapézoïdale dans le sens longitudinal (Fig. 5b) donnée au volume de sable contenu dans les différents couloirs tient compte de la déviation des particules lors de la vidange (effet de Coriolis).

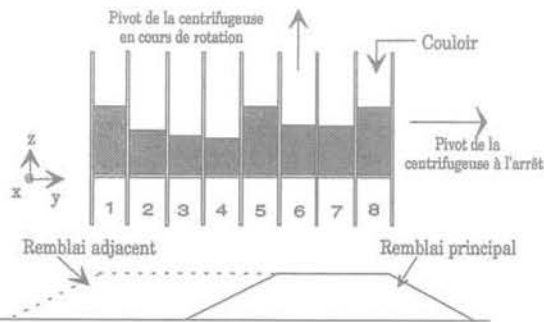
Pour la première variante d'élargissement, le remblai principal est construit par la vidange des couloirs 5, 6, 7 et 8. Les quatre vérins provoquant l'ouverture sont couplés sur la même commande hydraulique de façon à obtenir une vidange simultanée et un dépôt uniforme. Les couloirs 1, 2, 3 et 4 sont affectés à la construction du remblai adjacent; leur ouverture est également assurée par une commande unique des quatre vérins.

Pour la seconde variante (Fig. 6), le remblai principal est construit en activant simultanément l'ouverture des vérins 3, 4, 5 et 6 (regroupés sur une commande unique). Le remblai adjacent est, cette fois, obtenu uniquement par la vidange des couloirs 1 et 2.

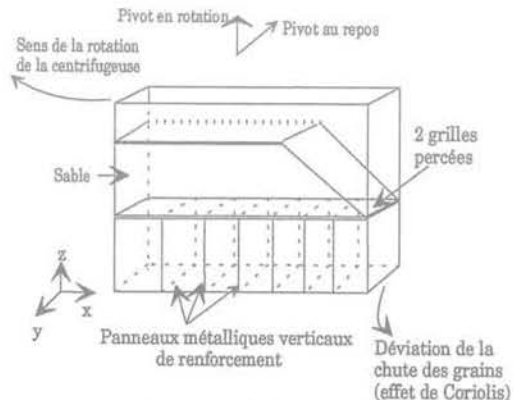
Le tableau I décrit le remplissage des couloirs de la trémie déterminé expérimentalement pour les essais. Les essais 2 et 3 avaient une épaisseur de remblai plus importante. Les essais 2 à 5 correspondent à la première variante d'élargissement et les essais 6 et 7 à la seconde.

## Mesures et contrôles

A la fin de l'essai de centrifugation, il est possible de pratiquer des coupes transversales dans le remblai de



5.a : Coupe transversale des couloirs après remplissage



5.b : Coupe longitudinale d'un couloir après remplissage

FIG. 5 Profils de remplissage de la trémie (première variante).

Sand profile inside the hopper (first case of widening): (a) cross-section of filled slots; (b) longitudinal section of filled slots.

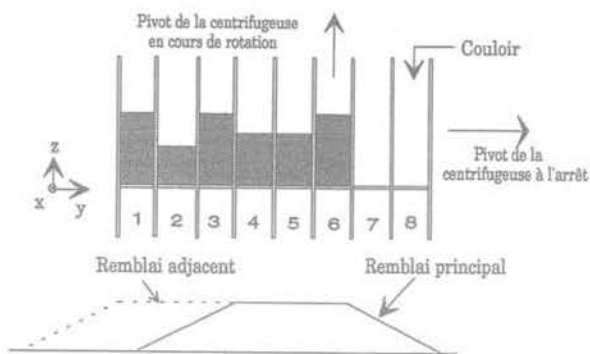


FIG. 6 Coupe transversale des couloirs après remplissage (seconde variante).  
Cross-section of filled slots (second case).

sable et le massif d'argile. On peut ainsi observer l'allure des remblais et aussi les interfaces de couches, les déformations de niveaux repères, les surfaces de discontinuité dues à une rupture, etc. La coupe du massif présentée sur la figure 7 montre l'allure de la répartition du sable provenant des différents couloirs de la trémie pour la première variante d'élargissement. L'utilisation de sable coloré a permis de distinguer visuellement le sable provenant des huit couloirs.

La figure 8 présente un exemple d'informations données en temps réel par les pesons lors de la vidange du sable dans un essai (essai 5) qui comportait trois phases :

– la première phase (1) correspond à la consolidation du sol sous son propre poids (sous accélération centrifuge de 70 g) ; le sable est encore dans la trémie ;

TABLEAU I Remplissage de la trémie pour les essais.  
Height of sand in the slots within the hopper.

Hauteur du remblai	Variante n°	Essais n°	Hauteur du sable par couloir (mm)								Masse de sable (kg)	
			1	2	3	4	5	6	7	8		
5 m	72 mm	1	2,3	130	90	80	75	130	100	100	130	totale 46
3 m	43 mm	1	4,5	71,4	47,4	41,4	38,4	71,4	53,4	53,4	71,4	totale 25
3 m	43 mm	2	6,7	71,4	38,4	71,4	53,4	53,4	71,4			totale 20

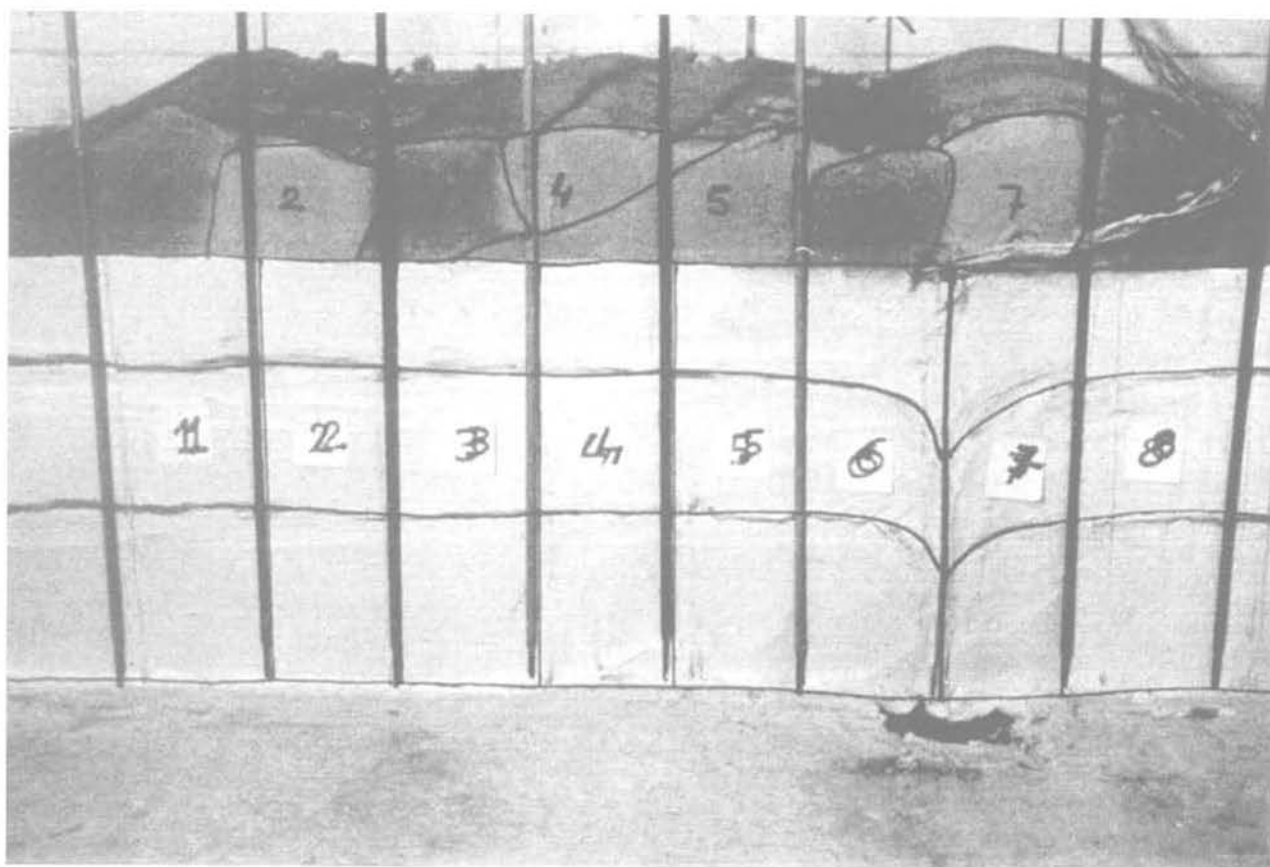


FIG. 7 Photographie de la coupe du modèle 5.  
Les numéros indiquent la position des différents couloirs de la trémie.  
Cross-section of model 5.  
The numbers indicate the location of the slots within the hopper.

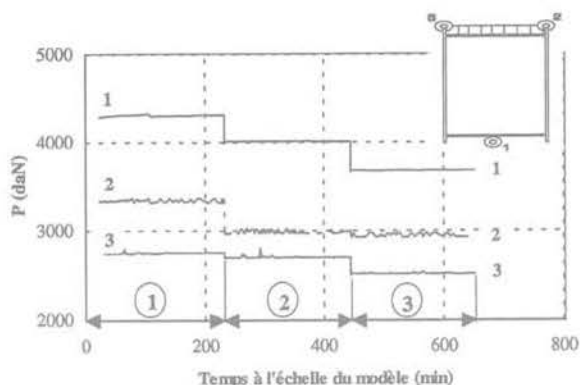


FIG. 8 Pesée de la trémie en fonction du temps. Les trois courbes correspondent chacune à l'un des pesons qui supportent la trémie. Weight of the hopper vs time. The three curves correspond to the three supporting load cells.

– la seconde phase (2) correspond à la consolidation sous l'effet de la construction du remblai principal (le sable des couloirs 5 à 8 a été vidé);

– la troisième et dernière phase (3) correspond à la consolidation du massif d'argile sous l'effet de la construction du remblai d'élargissement (le sable des couloirs 1 à 4 a été vidé).

La figure 9 montre les déplacements verticaux enregistrés par une ligne de capteurs lors de l'essai 5 sommairement décrit ci-dessus. Ces mesures, combinées avec les mesures de pressions interstitielles et de déplacements horizontaux, permettent d'effectuer l'interprétation du comportement du modèle et de l'extrapoler à l'échelle d'un remblai réel (prototype), comme l'a fait Akou (1995).

6

## Conclusion

Après sa mise au point, la trémie de pluviation de sable décrite ci-dessus a été utilisée sans difficultés particulières pour la réalisation d'essais dans le cadre d'une étude paramétrique de l'élargissement de remblais construits sur un massif d'argile de faible por-

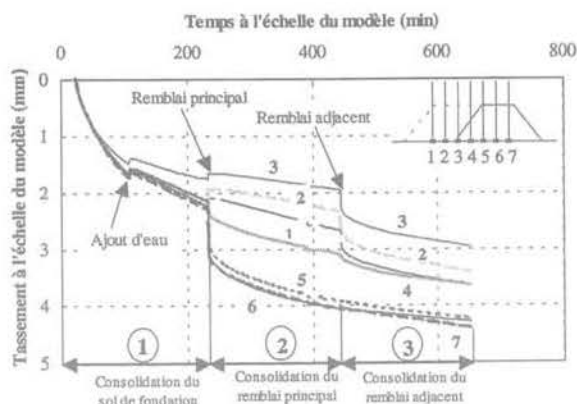


FIG. 9 Déplacements des capteurs verticaux en fonction du temps. Measured vertical displacements vs time.

tance (Akou, 1995). Son fonctionnement avec des ouvertures et fermetures séquentielles est garanti jusqu'à 70 g sous réserve d'un entretien soigné entre chaque utilisation; la répétitivité des procédures d'exécution des massifs permet donc d'analyser l'influence d'autres paramètres dans des conditions de chargement bien définies.

Cette trémie embarquée complète les équipements déjà disponibles au centre de Nantes du Laboratoire central des Ponts et Chaussées et en particulier la trémie mobile de construction de massifs de sols par pluviation, utilisée pour la mise en œuvre de matériau pulvérulent à 1 g dans des conteneurs classiques. Son domaine d'utilisation reste très ouvert pour l'étude des problèmes posés par la construction des remblais sur sols compressibles, le comportement des remblais sur sols renforcés, voire la mise en place de remblai derrière un soutènement.

## Remerciements

La conception de la trémie a commencé sous la direction de Denis Fargeix, qui en a défini les caractéristiques principales avant son départ du LCPC.

## Bibliographie

Akou Y. – Étude expérimentale et modélisation de l'élargissement des remblais sur sols compressibles. Thèse de doctorat de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, 258 p., 1995.  
 Beasley D.H. – Centrifugal modelling of soft clay strata subject to embankment loading. PhD. Thesis, Cambridge University, 328 p., 1973.  
 Beasley D.H., James R.G. – Use of hopper to simulate embankment construction in a

centrifugal model. *Geotechnique*, vol. 26, n° 1, p. 220-226, 1976.  
 Garnier J., Cottineau L.M. – La centrifugeuse du LCPC: moyens de préparation des modèles et instrumentation. Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Paris, 25-27 avril, Balkema, Rotterdam, p. 83-90, 1988.  
 Nelissen H.A.M. – Stability analysis of in-flight built embankments on soft soil.

Grondmecnica Delft/Delft Geotechnics, p. 1-8, 1992.  
 Randolph M.F., Jewell R.J., Stone K.J.L., Brown T.A. – Establishing a new centrifuge facility. Centrifuge 91 (Ko, éditeur), Balkema, Rotterdam, p. 3-9, 1991.  
 Tornely J.H.A. – The design of hopper for use in centrifuge testing of soil models. Project report, Cambridge University Engineering Department, 1972.