

Études géotechniques sur modèles centrifugés

Évolution des matériels et des techniques expérimentales

Jacques GARNIER
Directeur de recherche
Chef de la division Reconnaissance et mécanique des sols

François DERKX
Chargé de recherche
Chef de la section Études et fabrication
Service Métrologie et instrumentation

Louis-Marie COTTINEAU
Assistant
Section Instrumentation
Service Métrologie et instrumentation

Gérard RAULT
Technicien supérieur
Section Mécanique des sols et centrifugeuse
Division Reconnaissance et mécanique des sols
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Les modèles physiques se sont récemment développés dans le domaine géotechnique, grâce aux installations garantissant un meilleur respect des conditions de similitude (centrifugeuses et chambre d'étaonnage). Depuis une quinzaine d'années, le LCPC a contribué à ce développement par la mise en service d'une grande centrifugeuse géotechnique puis par la mise au point de matériels et de méthodes d'essai.

L'objectif de cet article est de présenter dans un même document les principaux matériels qui sont nécessaires à la réalisation et à la caractérisation des massifs de sol et aux interventions sur le modèle en cours de centrifugation. Des données concernant les performances des dispositifs ainsi que des exemples d'utilisation sont fournis. La dernière partie est consacrée à un nouveau grand équipement, qui complète la centrifugeuse proprement dite. Il s'agit d'un robot embarqué sur le conteneur d'essai, fonctionnant sous une accélération de cent fois la pesanteur et disposant d'un changeur d'outils. Il permet d'enchaîner différentes opérations sans arrêt de la centrifugeuse, ce qui va considérablement élargir ses domaines d'utilisation. Les premières applications de ce téléopérateur sont présentées.

MOTS CLÉS : 42 - Centrifugation - Mécanique des sols - Écoulement (fluide) - Équipement - Prélèvement - Méthode d'essai - Malaxeur - Modèle physique - Conteneur - Pénétrromètre à cône - Robot - Massif de sol - Trémie - Scissomètre - Téléopérateur.

Présentation

Jean-Pierre MAGNAN
Directeur technique chargé du pôle Géotechnique
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

L'article de Jacques Garnier et de ses collègues met en valeur un aspect trop souvent méconnu de la recherche expérimentale : la longue et difficile mise au point des dispositifs d'essais et des procédures expérimentales.

Depuis ses premières études sur modèles centrifugés, en 1975 dans la centrifugeuse du CESTA, puis depuis 1985 dans sa centrifugeuse propre, le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) a toujours été en première ligne pour le perfectionnement des matériels et des techniques expérimentales. La collaboration de la section chargée de l'exploitation de la centrifugeuse du centre de Nantes du LCPC avec la section chargée des études et de la fabrication des matériels au siège parisien du LCPC a été exemplaire pendant toute cette période. Elle a produit des dispositifs de fabrication des modèles de sable et d'argile, des systèmes d'essai, d'observation et de mesure, et des matériels de construction des modèles d'ouvrages dans la nacelle en rotation de la centrifugeuse, dont le dernier en date, le « téléopérateur », mis en service en 1998, est unique dans le monde.

Dans un domaine où les lois de similitudes sont complexes et parfois mal connues, les responsables de la centrifugeuse du LCPC ont toujours accordé une grande attention à la validation de leurs outils et de leurs modèles. La qualité et l'audience de leur production témoignent du caractère judicieux de ce choix et de leur rigueur scientifique.

Le téléopérateur ne sera certainement pas le dernier équipement de la centrifugeuse du LCPC à Nantes. Le champ des applications possibles des études géotechniques sur modèles centrifugés est vaste. Je souhaite encore beaucoup de succès aux chercheurs du LCPC et à leurs collègues dans l'application de cette technique.

Introduction

Le LCPC a été l'un des premiers laboratoires européens à se doter en 1985 d'une centrifugeuse à vocation géotechnique. L'historique de cette opération a été présenté dans un article du Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées paru en 1986 (Corté et Garnier, 1986).

Au cours des quinze ans écoulés depuis la mise en service de cette centrifugeuse, les techniques expérimentales se sont considérablement développées. Il a fallu en effet répondre aux besoins des différentes études conduites soit dans le cadre de programmes de recherche du réseau des LPC, soit lors de contrats passés avec des sociétés françaises ou étrangères.

L'objectif de cet article est de présenter dans un même document les principaux matériels et dispositifs d'essai conçus et réalisés autour de la centrifugeuse géotechnique depuis 1985. Les équipements décrits ci-après ont été pour l'essentiel étudiés en étroite coopération entre la section Études et fabrication (service Métrologie et instrumentation) et la section Mécanique des sols et centrifugeuse (Division Reconnaissance et mécanique des sols). Certains matériels portent d'ailleurs le sigle mlpcTM (marque déposée).

Ce panorama succinct montre en outre l'évolution des équipements, qui ont largement intégré les progrès technologiques, en particulier dans les domaines de l'instrumentation, des asservissements, du traitement d'images. Parallèlement à l'évolution des matériels, on peut aussi signaler que le parc des centrifugeuses géotechniques a connu un essor considérable dans la même période. À titre d'exemple, le nombre d'installations en service dans la Communauté européenne est passé de quatre à quatorze. Pour le seul Japon, on recense aujourd'hui une trentaine de centrifugeuses.

Intérêt et principe de la modélisation en centrifugeuse

Place de la modélisation physique

Rappelons d'abord brièvement que les essais sur modèles réduits sont habituellement mis en œuvre dans les cas suivants :

- étude d'un projet de structure ou d'un ouvrage précis ;
- recherche expérimentale à caractère plus général sur le comportement d'un type d'ouvrage.

Les essais permettent alors d'obtenir des données sur la réponse de la structure à diverses sollicitations et ainsi que sur les mécanismes de ruine. Ils servent aussi très souvent à caler des modèles numériques ou théoriques.

Dans le domaine géotechnique, la validation des modèles numériques est en effet rendue nécessaire par les difficultés suivantes :

- la rhéologie des sols ne peut être décrite avec précision (matériaux granulaires, présence de plusieurs phases) ;
- les géomatériaux localisent les déformations dans d'étroites bandes de cisaillement ;
- les capacités de calcul constituent encore une limite du fait du caractère tridimensionnel des problèmes et de la nature cyclique ou dynamique des sollicitations pour de nombreux ouvrages géotechniques.

L'observation d'ouvrages en grandeur réelle fournit quant à elle des données qui constituent des références incontestables. Cette approche n'est cependant jamais suffisante pour l'étude complète d'un type d'ouvrage. Pour des raisons de coût, le nombre d'essais est nécessairement réduit. Par ailleurs, des difficultés inhérentes à la méthode elle-même en limitent la portée (hétérogénéité des sites, problème de leur caractérisation fine, maîtrise imparfaite des conditions aux limites, impossibilité de reproduire certaines sollicitations).

Les modèles réduits ne présentent aucune de ces limites. Il est possible de les répéter à volonté et de ce fait ils se prêtent très bien aux études paramétriques. Pour ces raisons, ils sont une pratique courante et ancienne en mécanique des fluides où les questions de similitude ont été résolues pour de nombreuses applications (souffleries, bassins de carène, simulateur de houle et de courants).

Dans le domaine géotechnique cependant, les conditions de similitude sont à la fois moins bien connues et plus difficiles à satisfaire, ce qui a longtemps été un frein au développement des études sur modèles réduits.

Similitude en géotechnique

Les problèmes de similitude en géotechnique ont fait l'objet de nombreuses publications dont les références pourront être trouvées dans Corté et Garnier (1986) et Garnier (1995).

Nous rappellerons simplement que, pour observer les mêmes phénomènes sur un ouvrage en grandeur réelle (prototype) et sur son modèle à échelle réduite, il est nécessaire de respecter certaines relations entre les différentes grandeurs physiques qui interviennent dans le processus (conditions de similitude).

En mécanique des fluides, les matériaux de l'ouvrage prototype sont généralement remplacés dans le modèle réduit par d'autres matériaux de façon à ce que leurs caractéristiques satisfassent aux conditions de similitude (fluides beaucoup plus visqueux, structures plus rugueuses, par exemple).

La complexité des lois de comportement des sols ne permet pas de telles substitutions. Le modèle réduit doit être construit avec des sols réels qui présentent des réponses non linéaires et très dépendantes du niveau de contraintes. En outre, dans la plupart des problèmes rencontrés en géotechnique, le poids des terrains tient un rôle essentiel dans les équilibres en jeu.

Pour reproduire sur un modèle géotechnique à échelle réduite les mêmes phénomènes que ceux existant dans l'ouvrage réel, il faut recréer des contraintes internes identiques à celles qui règnent dans l'ouvrage en vraie grandeur. L'accélération centrifuge obtenue en faisant tourner le modèle à vitesse constante permet d'accroître la pesanteur du modèle et de satisfaire ainsi aux conditions de similitude.

Par exemple, un modèle réduit à l'échelle 1/100 devra être soumis à cent fois l'accélération de la pesanteur pour obtenir les mêmes contraintes internes que dans l'ouvrage réel. L'accélération de la pesanteur égale à $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ sera notée g dans la suite de cet article.

Il est important de noter que, si la macrogravité permet de régler le problème lié aux niveaux de contraintes, elle ne garantit pas que la similitude soit totalement assurée. Les sols étant des milieux granulaires, d'autres conditions, imposées par exemple par la taille des particules, doivent aussi être prises en considération (Garnier et König, 1998).

Caractéristiques principales de la centrifugeuse

Sur la base d'un cahier des charges élaboré par le LCPC, l'étude et la réalisation de la centrifugeuse ont été confiées à la Société Acutronic (fig. 1). Les caractéristiques principales de cette

centrifugeuse à vocation géotechnique ont été présentées par Corté et Garnier (1986) et sont rappelées dans le tableau I.

La centrifugeuse du LCPC

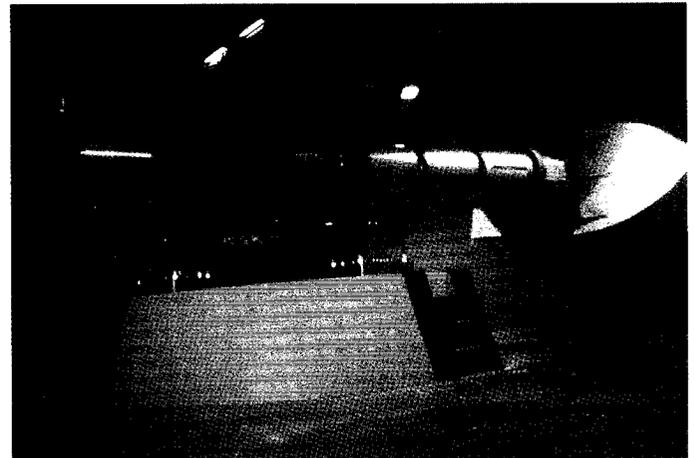


Fig. 1 - Vue générale.

TABLEAU I
Caractéristiques principales

Rayon effectif (m)	5,50
Accélération maximale	200xg
Masse embarquable à 100xg (kg)	2 000
Masse embarquable à 200xg (kg)	500
Dimensions utiles de la nacelle (m)	1,40 × 1,15 × 1,40

Différentes phases d'un essai sur modèle centrifuge

Dans le déroulement des expériences sur modèles centrifugés, il est possible de distinguer trois phases principales, qui nécessitent chacune des matériels et des méthodes adaptées.

Préparation des massifs de sol

Comme nous venons de le voir précédemment, le modèle réduit doit être construit avec les mêmes sols que l'ouvrage réel.

La méthode consistant à prélever des échantillons intacts sur site a été abandonnée après différents essais effectués par plusieurs laboratoires, dont le LCPC. Outre les difficultés de prélever et de transporter des éprouvettes de plusieurs centaines de kilogrammes, les hétérogénéités locales conduisent à des dispersions des résultats très supérieures à celles des échantillons reconstitués (Garnier et

Canépa, 1991). Il a donc été nécessaire d'étudier et de réaliser des matériels permettant de reconstituer des sols présentant certaines propriétés des massifs naturels (indice des vides, degré de surconsolidation, résistance au cisaillement, caractéristiques pénétrométriques, compressibilité, etc.).

On distingue les massifs de sable réalisés par la méthode de pluviation dans l'air à l'aide d'une trémie, et les massifs d'argile obtenus par la méthode de consolidation sous presse, avec ou sans gradient hydraulique. Dans le premier cas, le paramètre déterminant est le poids volumique. Dans le second, on règle les caractéristiques géotechniques par la teneur en eau ou par l'indice des vides et par la pression de consolidation.

Les matériaux utilisés sont soit des sols provenant du site de l'ouvrage (argile de Lysaker près d'Oslo, argile de Rion près d'Athènes, sables de Labenne, du Rheu, d'Ouessant), soit des sols types (sable de Fontainebleau, sable d'Hostun, sable de Loire, limon d'Orly, kaolin). Il faut noter qu'un suivi de ces matériaux est nécessaire car de légères évolutions de leurs caractéristiques mécaniques ont été observées au cours du temps (Bakir, 1993 ; Maréchal, 1999).

Caractérisation du massif sous accélération

Après réalisation, le massif est embarqué dans la centrifugeuse et soumis à l'accélération choisie pour l'essai. Il faut alors déterminer les caractéristiques mécaniques qu'il présente sous cette accélération. On pratique deux essais couramment utilisés sur site réel (pénétromètre statique et scissomètre), pour lesquels il a fallu développer les matériels correspondants.

Intervention sur le modèle en cours de rotation

La dernière phase concerne l'essai proprement dit et consiste le plus souvent à solliciter le modèle sans arrêt de la centrifugeuse (chargement d'une structure, construction d'un remblai, terrassement d'une fouille, variation du niveau de nappe). Cette phase est parfois précédée d'une mise en place de la structure dans le sol, également effectuée sous accélération (fonçage ou battage de pieux, installation de caissons à effet de succion). Des appareils mono-fonction ont été conçus pour réaliser chacune de ces interventions ; les principaux sont présentés ci-après. Le dernier paragraphe est consacré au téléopérateur récemment mis en service et qui permet d'enchaîner plusieurs opérations sans arrêt de la centrifugeuse.

Bien entendu, le modèle est par ailleurs instrumenté et des acquisitions sont effectuées sur tout ou partie des capteurs pendant ces opérations

successives. Les moyens mis en œuvre pour ces mesures sont rapidement décrits dans le paragraphe « Matériels d'observation et de mesure ».

Matériels de préparation des massifs

Conteneurs

Des conteneurs rectangulaires et cylindriques (fig. 2) ont été dimensionnés pour s'adapter au mieux à la géométrie de la nacelle de la centrifugeuse et pour pouvoir résister à une pression interne respectivement de 1,5 MPa et de 0,5 MPa (tableau II).

Les conteneurs

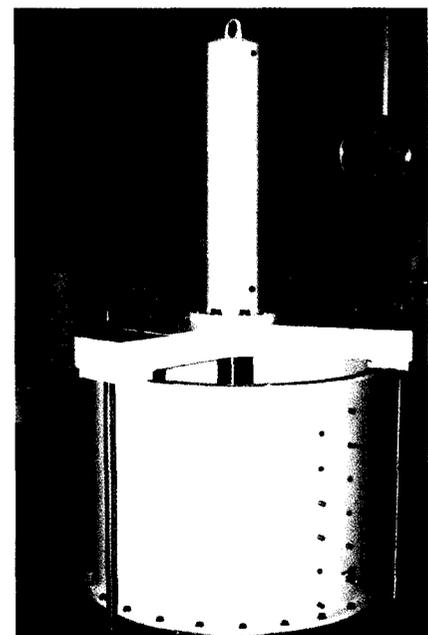


Fig. 2 - Conteneur cylindrique.

TABLEAU II
Caractéristiques principales

Caractéristiques	Conteneur	
	Rectangulaire	Cylindrique
Dimensions extérieures (m)	1,4 × 1,2 × 0,38	$\phi = 1$ h = 0,7-0,36-0,3 0,2-0,16
Dimensions intérieures (m)	1,2 × 0,8 × 0,36	$\phi = 0,89$
Pression de service (MPa)	1,50	0,5
Masse (kg)	305	175 (pour h = 0,7 m)
Masse du fond (kg)	95	51

Le principal problème de conception des conteneurs concerne la rigidité des parois verticales. La déformation de ces parois sous l'effet des pressions du sol peut en effet conduire à des réductions significatives des contraintes horizontales régnant dans le massif. Ainsi, des essais réalisés en centrifugeuse à l'aide d'un conteneur spécial ont montré qu'un déplacement horizontal de la paroi égal à 0,1 % de sa hauteur conduirait le coefficient $K = \sigma_h / \sigma_v$ de l'état au repos K_0 à l'état actif de poussée K_a (Lareal et al., 1995).

Comme les enveloppes circulaires résistent bien à ce genre de sollicitation, la conception mécanique des conteneurs cylindriques est simple. Par contre, les conteneurs rectangulaires ont nécessité des calculs par éléments finis. Leurs parois de 100 mm d'épaisseur sont constituées de deux plaques parallèles entretoisées par des raidisseurs. Cette conception permet d'augmenter leur rigidité (déformation latérale des parois inférieure à 2 mm sous la pression maximale) tout en limitant au maximum leur masse.

On comprend mieux le problème et les difficultés rencontrées lorsque l'on remarque qu'une pression uniforme interne de 1,5 MPa dans un conteneur rectangulaire équivaut à une force de 760 kN centrée sur la plus grande paroi latérale.

Pour les deux types de conteneur, le fond est dissociable et plusieurs éléments peuvent être empilés pour former un conteneur étanche de hauteur plus importante.

Ces ensembles sont conçus pour permettre le drainage de l'eau à la base du massif par un système de rainures dans la plaque de fond. Ils comportent dans les parois latérales des traversées de cloison étanches pour la mise en place de capteurs (sondes de pression interstitielle) et la sortie des câbles.

Trémie de pluviation

Les techniques de pluviation se sont généralisées tant pour la fabrication d'éprouvettes de laboratoire destinées aux essais de cisaillement que pour la reconstitution de massifs plus importants (chambre d'étalonnage, modèles centrifugés, cuves d'essai).

Le comportement mécanique des sables est essentiellement gouverné par l'état de contraintes (reproduit grâce à la centrifugation) et par l'indice des vides (ou la densité relative). Il convenait donc de développer une méthode garantissant une maîtrise rigoureuse de la densité. La pluviation consiste à faire tomber du sable en pluie fine en maintenant la hauteur de chute constante. La densité du massif est contrôlée par deux paramètres : la hauteur de chute et le débit du sable (Küs, 1992).

Après un premier prototype conçu avec la collaboration de D. Shields (université de Winnipeg), une installation totalement automatique a été mise au point (fig. 3 et tableau III).

La trémie mobile proprement dite, en acier mécano-soudé, est suspendue par deux câbles à un chariot automoteur se déplaçant sur deux rails fixés au plafond de la salle de pluviation. Un dispositif de guidage empêche tout balancement de la trémie pendant ses translations. Le dessous de la trémie peut être équipé au choix d'un dispositif de réglage de la largeur de fente en continu, entre 0 et 6 mm, ou de barrettes imposant des ouvertures de largeurs fixes égales à 2, 3 ou 4 mm. Cette dernière solution permet de garantir un excellent contrôle des débits (Ternet, 1999). Par ailleurs, pour chacun de ces deux dispositifs, il est possible de régler par tronçons de 102,5 mm la longueur de la fente et donc la largeur du massif reconstitué.

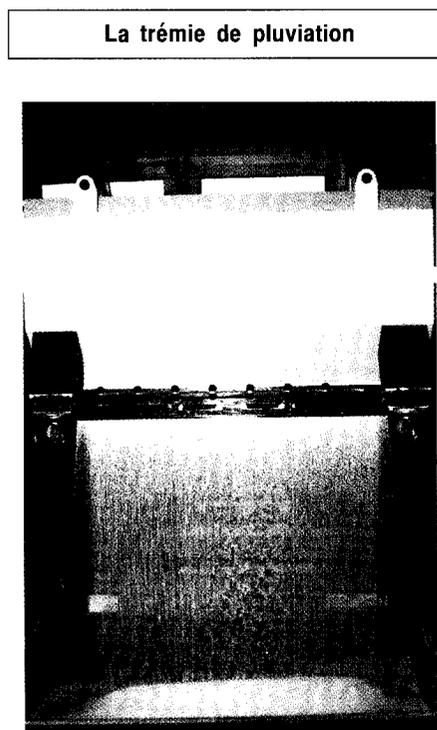


Fig. 3 - Trémie en fonctionnement.

TABLEAU III
Caractéristiques principales

Dimensions de la trémie mobile (m)	1,14 × 0,6 × 0,7
Masse (sans sable) (kg)	103
Volume utile (m ³)	0,2
Course horizontale (m)	2,50
Vitesse de déplacement (m/s)	0 à 0,20

La course de la trémie est limitée par deux butées électriques dont la position est également réglable. Afin de conserver une hauteur de chute sensiblement constante, après un nombre d'allers et retours défini à l'avance, la trémie est remontée automatiquement par enroulement des câbles sur un tambour entraîné par un moteur électrique.

Des déflecteurs posés sur le conteneur limitent les effets de bord qui pourraient être dus aux rebonds des grains de sable.

L'ensemble de pluviation est installé dans une salle spéciale, mise sous légère dépression pour limiter la pollution de l'air des locaux voisins. Son fonctionnement est programmable et est entièrement automatique, ce qui contribue à une bonne répétitivité (fig. 4) et évite d'exposer les opérateurs à une atmosphère nocive.

Après avoir comparé plusieurs solutions (gamma-densimétrie, imprégnation), la méthode retenue pour le contrôle ponctuel de densité dans le massif reconstitué consiste à y noyer des boîtes calibrées qui sont extraites à la fin de l'expérience. La géométrie de ces boîtes a été optimisée et une procédure a été standardisée pour en déterminer le volume et pour araser le sable en excès.

Les études (Küs, 1992 ; Garnier et al., 1993 ; Ternet, 1999) ont montré que, dans le volume utile exploité pour les essais sur modèles, la variation spatiale du poids volumique est inférieure à $0,25 \text{ kN/m}^3$, soit un écart relatif inférieur à 1 %.

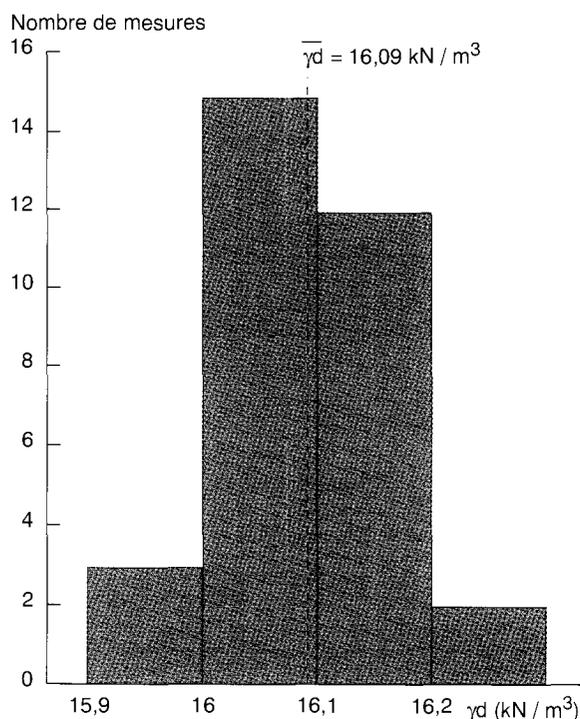


Fig. 4 - Histogramme des poids volumiques obtenus dans dix-huit conteneurs (Bakir, 1993).

Malaxeur

La méthode couramment mise en œuvre pour reconstituer les sols argileux consiste en deux opérations successives : préparation d'une boue d'argile par malaxage du matériau avec de l'eau, puis consolidation du mélange sous presse.

Cette méthode permet de reconstituer un matériau avec un profil géotechnique bien défini. La durée totale de consolidation est d'environ quatre semaines pour un massif de 0,5 m d'épaisseur.

Le malaxeur LCPC (fig. 5a et 5b) possède deux pales mélangeuses réglables en hauteur et une pale racleuse. Il se différencie essentiellement d'un malaxeur classique par le fait que l'on peut

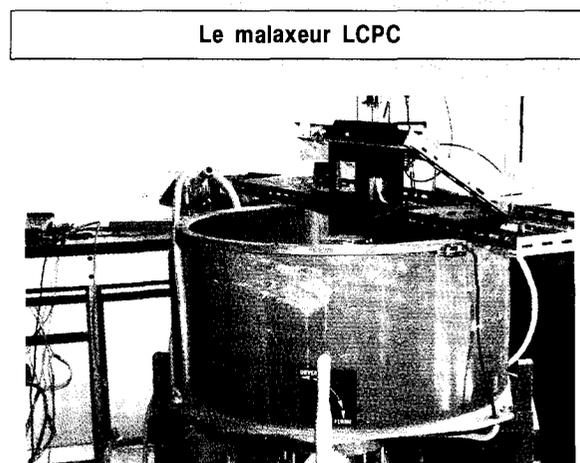


Fig. 5a - Vue d'ensemble.



Fig. 5b - Une préparation d'argile.

TABLEAU IV
Caractéristiques principales

Dimensions hors tout (m)	1,18 × 1 × 1,10
Volume utile de la cuve (litres)	200
Vitesse de rotation des pales (tours/mn)	45
Pression de vide (MPa)	$8 \cdot 10^{-2}$

créer à l'aide d'une pompe à vide une légère dépression dans la cuve (tableau IV). Cette dépression a pour but d'éliminer au maximum l'air du mélange, pour produire un sol saturé. Ce mélange correctement malaxé est ensuite transvasé dans le bâti de consolidation.

Bâti de consolidation

Deux techniques peuvent être utilisées pour consolider le mélange argile-eau :

- une consolidation uniforme, par application d'une surcharge à l'aide d'un piston,
- une consolidation avec gradient vertical, par gradient hydraulique.

Avec les conteneurs rectangulaires déjà décrits, il est possible de réaliser les deux types de consolidation, alors que seule la méthode de la consolidation uniforme est possible avec les conteneurs cylindriques (tableau V).

Suivant la hauteur du massif souhaité, on superpose plusieurs tronçons de conteneurs sur une épaisse plaque de base destinée à reprendre les efforts. Ces éléments superposés sont précontraints par des tirants vissés dans la plaque de base (fig. 6).

■ En **consolidation uniforme**, la pression est ensuite appliquée par le piston sur le modèle (par le poids propre du piston puis par un vérin hydraulique). La pression dans le vérin ainsi que le tassement du massif sont mesurés afin de suivre l'évolution de la consolidation. Un exemple de suivi par la méthode d'Asaoka est donné sur la figure 7. Cette méthode introduite en France par J.-P. Magnan et J.-M. Deroy (1980) fournit une prévision plus précoce du tassement final et du degré de consolidation mais peut donner des résultats un peu différents de ceux obtenus par suivi des pressions interstitielles.

Six ouvertures de 50 mm de diamètre, fermées par des bouchons vissés, permettent en cours de consolidation de réaliser des contrôles au pénétromètre ou au scissomètre.

■ En **consolidation sous gradient hydraulique**, le conteneur est rendu étanche par un couvercle afin de pouvoir introduire de l'eau sous une pression u_0 à la surface de l'argile. La mise à l'atmosphère de la base du massif provoque un écoulement descendant.

Les forces de percolation induisent des contraintes effectives dont le profil en fin de consolidation est linéaire de 0 à u_0 , conduisant à des sols de cohésion non drainée $c_u = az$ (z étant la profondeur).

Il est aussi possible d'associer les deux types de consolidation pour obtenir des profils $c_u = az + b$ (fig. 8).

Le bâti de consolidation

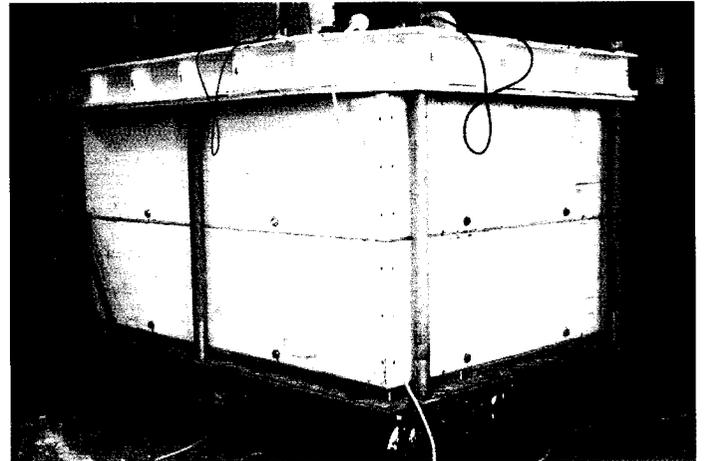


Fig. 6 - Bâti de consolidation rectangulaire.

TABLEAU V
Caractéristiques principales

Bâti avec conteneurs	Rectangulaires	Cylindriques
Dimensions hors tout (m)	1,69 × 1,17 × 2,6	$\phi = 1,12$ $h = 1,72$
Surface au sol (m ²)	2	1
Volume (m ³)	1,27	0,45
Masse de l'ensemble (kg)	4 490	1 000
Course du vérin (m)	0,44	0,60
Pression de consolidation (MPa)	0,2	0,5
Pression de fluide (MPa)	1,5	non

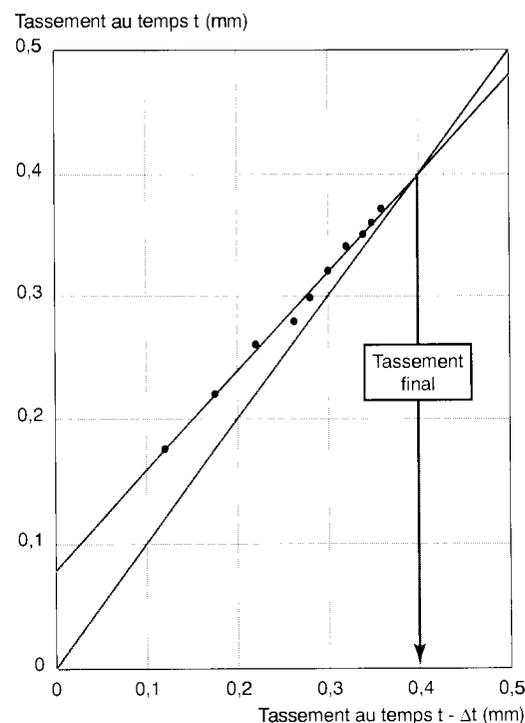


Fig. 7 - Exemple de suivi de consolidation (méthode d'Asaoka).

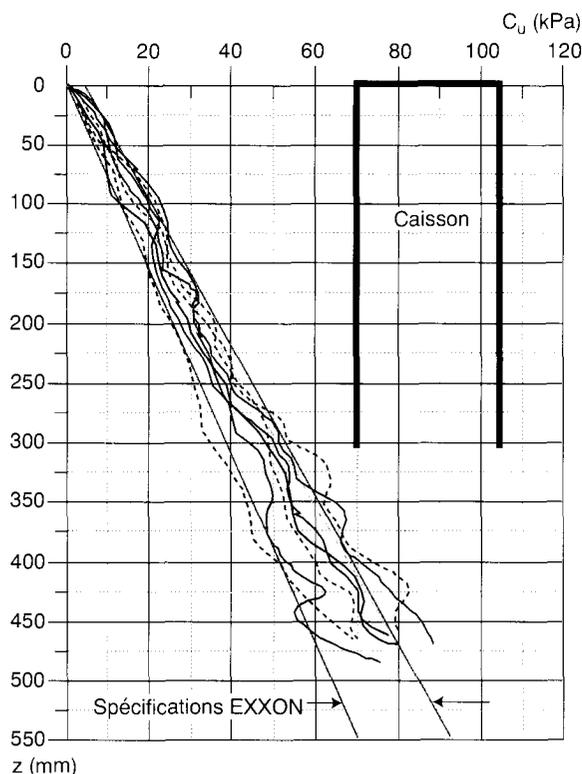


Fig. 8 - Profils de cohésion non drainée obtenus à 100xg dans sept massifs d'argile de 550 mm d'épaisseur (contrat Exxon sur les caissons à succion).

La bonne répétitivité de la procédure développée au LCPC est illustrée sur la figure 8, qui montre les profils de cohésion non drainée obtenus dans sept massifs d'argile lors de l'étude de caissons à effet de succion pour l'ancrage de plates-formes offshore (Contrat Exxon). La mesure est réalisée sous 100xg au pénétromètre statique (cf. paragraphe suivant) à la fin d'une période de reconsolidation en centrifugeuse de 24 heures.

Les spécifications Exxon concernant la cohésion de l'argile étaient :

$$1,3 z < c_u < 1,6 z + 4,5$$

(profondeur z en m et cohésion non drainée c_u en kPa).

Matériels de caractérisation des modèles

Les matériels ci-dessous étant spécifiques, il a fallu les concevoir un à un en fonction des besoins. Il est possible que cette situation évolue car des travaux ont été engagés auxquels le LCPC contribue largement pour tenter de standardiser certaines procédures d'essais : programme européen Science 1990-1995 (Amélioration de la modélisation physique par centrifugation en géotechnique) et programme en cours du Comité international TC2 (Modélisation physique en centrifugeuse) de la Société internationale de mécanique des sols et de la géotechnique.

Tenue aux accélérations élevées

Contrairement aux matériels de préparation, ces dispositifs sont embarqués sur la centrifugeuse et donc soumis à des accélérations pouvant atteindre 100xg. Or les composants classiques ne sont pas prévus, à de rares exceptions près (servo-valves aéronautiques, moteurs spéciaux), pour supporter de telles sollicitations, qui peuvent conduire suivant les cas à des ruptures ou à des dysfonctionnements.

Des tests s'avèrent le plus souvent nécessaires pour qualifier ces matériels standard et déterminer leur condition d'utilisation (orientation dans le champ d'accélération, par exemple).

Pour les ensembles mécaniques, il est possible de prévoir par le calcul le comportement des dispositifs (contraintes et déformations). Toutefois, ces calculs sont parfois complexes en raison du caractère tridimensionnel de certaines structures et du champ d'accélération qui présente trois composantes et de forts gradients, d'où le recours au calcul numérique par éléments finis (cas des conteneurs et de certaines poutres et coques).

Enfin, le souhait de réduction des masses conduit à des contraintes dont il faut aussi tenir compte dans le dimensionnement.

Du fait qu'ils sont placés sur la centrifugeuse, les équipements décrits ci-dessous nécessitent une alimentation de puissance et un dispositif de commande à distance. Les capteurs qui équipent ces matériels sont traités comme indiqué au paragraphe « Matériel d'observation et de mesures ». En ce qui concerne la puissance, la centrifugeuse dispose de contacts tournants pour l'énergie électrique et de joints tournants pour les fluides (huile, eau, air). Des électro-distributeurs assurent l'acheminement et la répartition des fluides jusqu'aux appareils placés dans la nacelle. Ils sont pilotés par le calculateur du poste de commande à l'aide d'un système de commande-puissance mis au point au LCPC.

Pénétromètre

Les essais de pénétrométrie en vraie grandeur sont normalisés (NF P 94-113 - Essai de pénétration statique). Ils consistent à mesurer en continu la résistance à l'enfoncement d'une pointe conique de 35,8 mm de diamètre (soit une section de 1 000 mm²) et d'angle au sommet 60 degrés. Cette pointe est surmontée d'un capteur de force de même diamètre. Le train de tige sur lequel est fixé le cône a également le même diamètre que la pointe et une longueur d'un mètre (soit environ trente fois le diamètre).

Des études ont été effectuées dans le cadre de la coopération européenne déjà mentionnée (programme Science) pour quantifier les éventuels effets de taille pouvant survenir lors de l'utilisation de

pénétrètres miniatures. Avec les sols habituellement utilisés lors des essais sur modèles centrifugés (argiles et sables fins), il est apparu qu'un diamètre de tige et de pointe d'une dizaine de millimètres était suffisant (Bolton et al., 1999).

TABLEAU VI
Caractéristiques principales du pénétrètre

Fonctionnement sous	100xg
Longueur hors tout (m)	0,760
Masse (kg)	4
Pression maximale (MPa)	18
Diamètre de la tige (m)	$12 \cdot 10^{-3}$
Course (m)	0,30
Angle de cône (degré)	60
Capteurs de force (N)	200 à 5 000

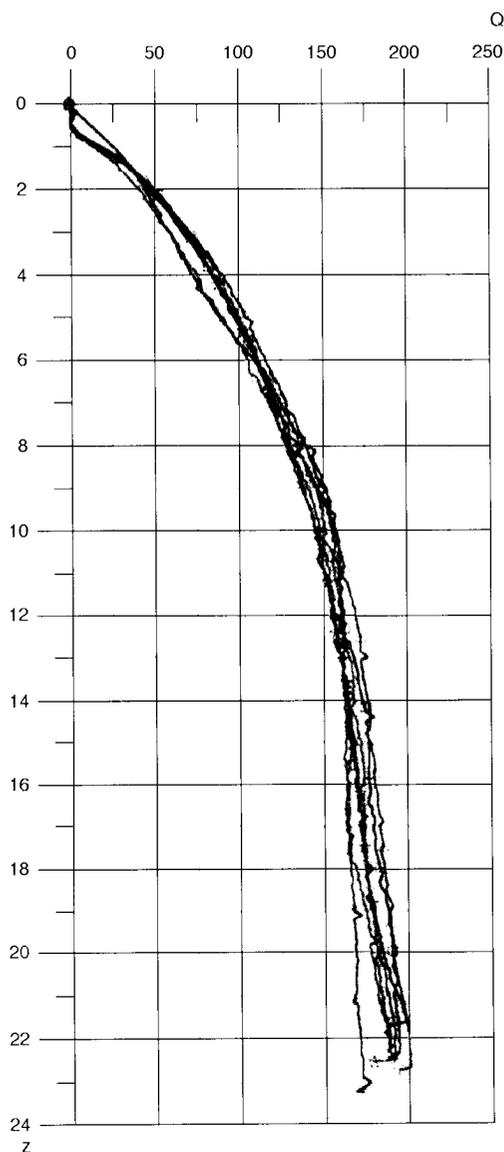


Fig. 9 - Profils pénétrométriques à 70xg dans un massif de sable de Fontainebleau.

Le pénétrètre actuel LCPEN2 (1988) est issu d'une première version LCPEN1 réalisée en 1986 (Corté et al., 1991). Il se présente sous la forme d'un vérin hydraulique à double effet (cf. fig. 12). La tige creuse est munie en extrémité inférieure d'un capteur de force miniature et d'une pointe qui sont facilement interchangeables afin de pouvoir adapter le capteur à l'étendue de mesure (tableau VI). L'ensemble constitue un modèle à l'échelle 1/3 du pénétrètre normalisé. La mesure de l'enfoncement est réalisée par un curseur qui délivre un signal électrique par frottement sur une piste potentiométrique interne au vérin. La vitesse de pénétration est réglable grâce à un régulateur de débit installé sur le circuit hydraulique. La figure 9 représente des profils pénétrométriques obtenus à 70xg sur un massif de sable de Fontainebleau réalisé par pluviation (programme Science, mars 1992). Sous cette accélération, la profondeur de reconnaissance simulée est de 22 m. La résistance normalisée $Q = q_c / (70 \gamma z)$ est représentée en fonction de la profondeur relative $Z = z/d_c$ où d_c est le diamètre de la pointe (12 mm).

Les essais au pénétrètre statique sont pratiqués dans tous les massifs de sable. Dans les argiles, l'essai de référence est plutôt le scissomètre, décrit ci-dessous.

Scissomètre

L'essai au scissomètre consiste à fonder une tige munie de pales à son extrémité puis à cisailier le sol par rotation des pales. La mesure du couple appliqué permet le calcul de la cohésion non drainée c_u . L'essai peut ensuite être répété à une profondeur plus importante.

Un premier prototype LCVAN1 avait été conçu dès 1978 (Corté et al., 1991), conduisant à la version actuelle LCVAN2 en service depuis 1989 (tableau VII). Pour éliminer les frottements du sol, les tiges portant les pales passent à l'intérieur d'un tubage où elles sont guidées par

TABLEAU VII
Caractéristiques principales du scissomètre

Fonctionnement sous	100xg
Longueur hors tout (m)	$\phi = 0,08 \quad L = 0,93$
Course (m)	0,30
Pression de service (MPa)	18
Diamètre de tige (m)	$F = 0,012$
Force de fonçage (kN)	12,440
Masse (kg)	6
Étendue de mesure du couplemètre (Nm)	0,25

des paliers en bronze. Le couple parasite dû à ces paliers est mesuré au début de chaque essai. La liaison entre les pales et la tige a en effet été conçue pour permettre de n'entraîner d'abord que les tiges en rotation, sur une dizaine de degrés, puis les tiges et les pales cisailant le sol (exemple de courbe d'essai sur la figure 10).

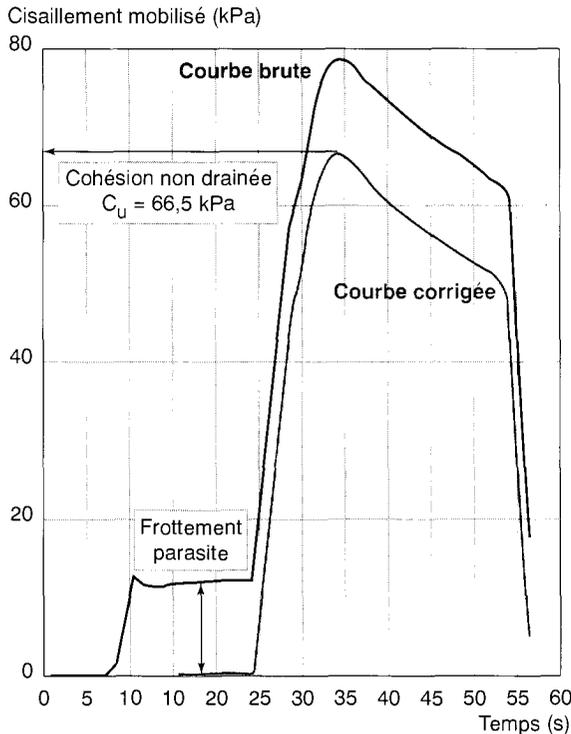


Fig. 10 - Mesure des composantes du couple dans un essai au scissomètre.

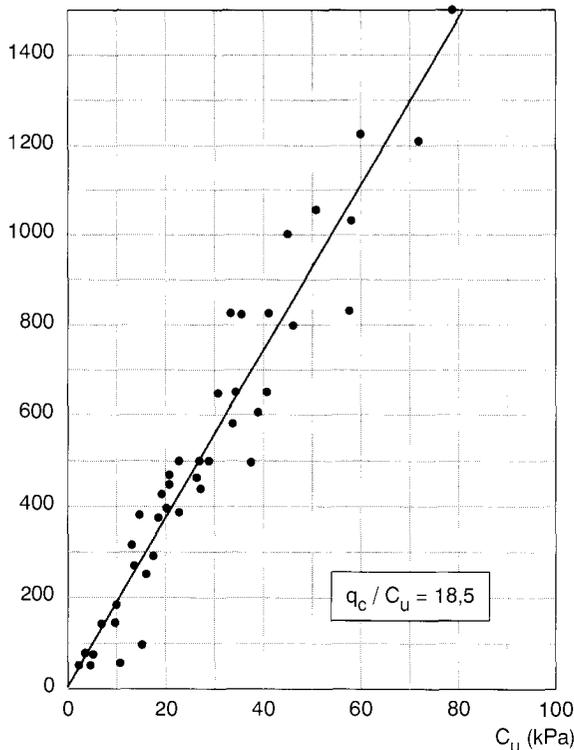


Fig. 11 - Résultats des corrélations $c_u - q_c$ pour la kaolinite.

Comme dans le pénétromètre, un vérin hydraulique à double effet et double tige assure le fonçage de la tige dans le sol (cf. fig. 12). Il est équipé d'une piste potentiométrique interne permettant la mesure de la profondeur. La rotation est effectuée à l'aide d'un moteur pas à pas installé en tête des tiges.

Des pales de différentes dimensions sont disponibles et choisies en fonction de la résistance du sol et du couple maximal attendus.

Dans la pratique, des corrélations (fig. 11) sont établies pour les matériaux argileux, entre les résultats du scissomètre (cohésion c_u) et ceux du pénétromètre statique (résistance de pointe q_c).

Bâti de translation

L'intérêt de réaliser plusieurs sondages au pénétromètre ou scissomètre en plusieurs points du massif ou à différents stades de l'essai est rapidement apparu. Avec un matériel installé à poste fixe, il est nécessaire d'arrêter la centrifugeuse entre deux essais successifs. Cette condition devient absolument irréaliste dans le cas des massifs argileux en raison des temps de reconsolidation de plusieurs heures à respecter après chaque arrêt.

D'où l'idée de concevoir un bâti de translation, capable de déplacer suivant un axe le pénétromètre ou le scissomètre sous 100xg.

Ce bâti se présente sous la forme d'une poutre rigide reposant sur les bords du conteneur rectangulaire (tableau VIII). Un ensemble de translation composé d'un rail et d'un chariot est installé sur la poutre (fig. 12). Le chariot est muni d'un système de noix de serrage qui permet de monter au choix le pénétromètre ou le scissomètre. Le déplacement est assuré par un moteur à courant continu muni d'un pignon engrenant sur une crémaillère située sur le côté du bâti. La position du chariot est connue grâce à un potentiomètre entraîné en rotation par un autre pignon monté en bout de tige et engrenant également sur la crémaillère. Un dispositif bloque le chariot en position pendant la phase de fonçage.

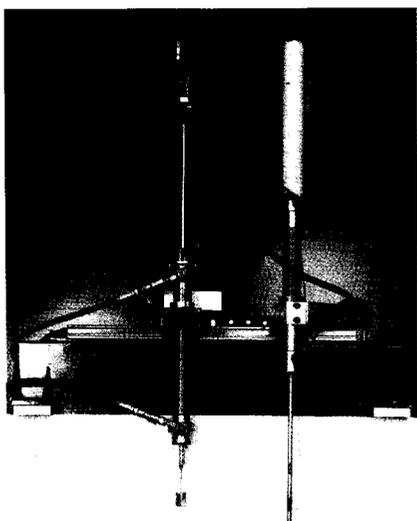
L'ensemble est piloté depuis le calculateur de la salle de commande à l'aide d'un logiciel spécifique.

TABLEAU VIII
Caractéristiques principales du bâti de translation

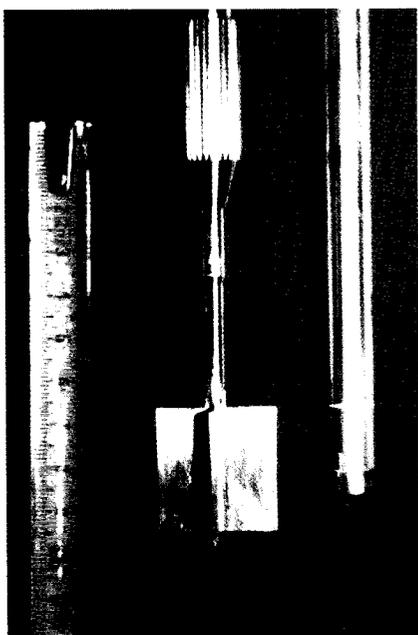
Fonctionnement sous	100xg
Longueur hors tout (m)	$0,93 \times 0,25 \times 0,33$
Masse (kg)	31,1
Course utile (m)	0,53
Vitesse de translation (m/s)	2.10^{-3} à 9.10^{-3}

La réalisation de ce bâti a montré la possibilité de déplacer et de positionner sous accélération des matériels et d'enchaîner ainsi des opérations sans arrêter la centrifugeuse, ouvrant alors un champ d'interventions sur le modèle plus large, comme nous le verrons au paragraphe « Téléopérateur ».

Fig. 12 - Le pénétromètre LCPEN2 et le scissomètre LCVAN2 en place sur le bâti de translation



Zoom sur la palette du scissomètre et sur la pointe du pénétromètre



Matériels d'intervention sur le modèle

Dispositif de chargement de fondations

Ce dispositif a été développé dès 1986 pour effectuer le chargement de structures géotechniques (fondation, ancrages, etc.). De conception et d'utilisation très simples, il exploite la forte accélération centrifuge régnant dans le modèle pour y générer des forces contrôlées. Il est particulièrement adapté au cas des chargements par paliers de force et peut exercer des efforts de traction et de compression, verticaux ou inclinés (tableau IX).

Le dispositif de chargement de fondations

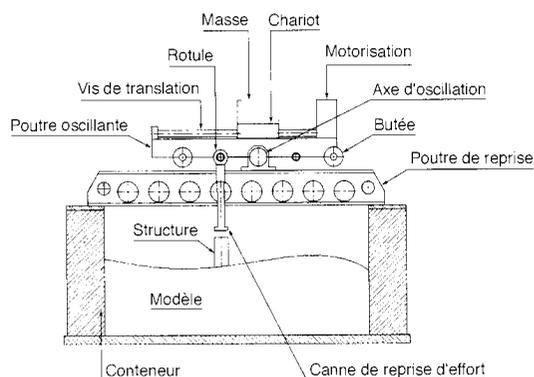


Fig. 13 - Schéma de principe.



Fig. 14 - Vue du dispositif.

TABLEAU IX
Caractéristiques principales

Fonctionnement sous	100xg et 200xg
Longueur hors tout (m)	0,870 × 0,18 × 0,30
Masse totale (kg)	26
Masse du chariot (kg)	0,80 kg
Masse mobile totale maximale (kg) à 100xg	6,8 kg
Efforts maximum (kN)	
- sous 100xg	15
- sous 200xg	3,750
Vitesse du chariot (m/s)	15.10 ⁻³

Le matériel se compose d'un bâti rigide posé sur les conteneurs et supporte une poutre pouvant pivoter autour d'un axe horizontal.

Le déplacement sur cette poutre d'un chariot portant une masse connue crée un déséquilibre transmis à la structure par l'intermédiaire d'une canne de reprise d'effort (fig. 13 et 14). La canne est munie d'un capteur de force et peut être équipée au choix de rotules ou accessoires divers pour transmettre l'effort. La translation de la masse est effectuée par une vis sans fin entraînée par un moteur électrique.

L'immobilisation du chariot (arrêt du moteur) garantit que la force appliquée restera rigoureusement constante quel que soit le déplacement de la structure soumise à cette sollicitation. Par ailleurs, les conditions de liaison entre le dispositif de chargement et la structure sont choisies pour assurer un contrôle rigoureux des composantes de la charge (moment et effort transversal nuls), ce qui est moins facile avec un vérin hydraulique.

Compte tenu de sa simplicité et de la qualité des chargements exercés, ce matériel a été très largement utilisé dans de nombreux programmes de recherche sur le comportement des fondations superficielles et des pieux sous charge latérale, en particulier dans les travaux de thèses de Bouafia (1990), Bakir (1993) et Mezazigh (1995).

Servo-vérin

Pour des essais à vitesse de chargement constante, le dispositif précédent n'est plus adapté et on a alors recours à des vérins hydrauliques commandés par des électrovannes.

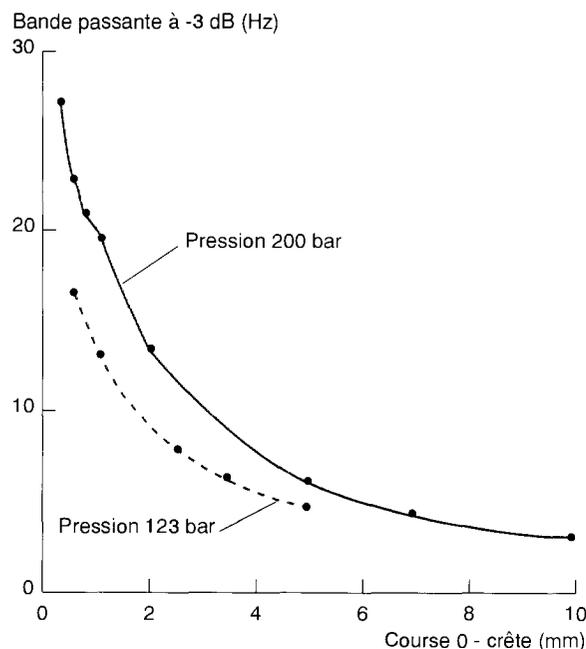


Fig. 15 - Courbe de réponse en fréquence.

Les chargements cycliques à fréquence élevée nécessitent l'utilisation de servo-vérins. Compte tenu des accélérations très fortes auxquelles est soumise la servo-valve, une fabrication spéciale s'est révélée nécessaire.

Le vérin a été étudié et réalisé par la société ASTEA, spécialisée dans ce domaine, à partir d'un cahier des charges établi par le LCPC (tableau X).

Le corps de ce vérin à double tige est en aluminium pour limiter son poids, qui est multiplié par le facteur d'accélération lors des essais. Le vérin est équipé d'une servo-valve de fabrication MOOG à moteur couple. L'ensemble est piloté par une élec-

Le servo-vérin

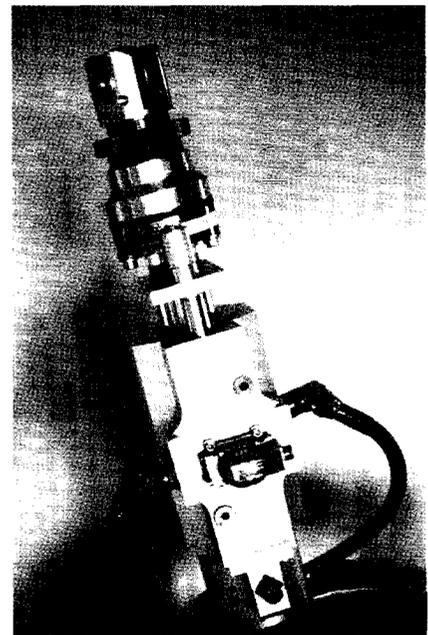


Fig. 16 - Servo-vérin en place sur un conteneur pour un essai de chargement incliné.

TABLEAU X
Caractéristiques principales

Fonctionnement sous	100xg
Longueur hors tout (m)	0,38 × 0,12 × 0,2
Masse (kg)	10
Section utile du piston (cm ²)	25,63
Course utile (m)	0,70
Vitesse maximale de sortie (m/s)	0,13.10 ⁻³
Force maximale (kN)	32
Débit de la servo-valve (l/min)	20
Amplitude à 10 Hz (mm)	± 2

tronique SCHENCK qui permet d'asservir le vérin, soit en position par un capteur de déplacement intégré dans le vérin, soit en force par un capteur de force monté en série entre le vérin et la structure à solliciter. Les programmes de chargement cyclique sont générés sur un ordinateur de la salle de commande par un logiciel spécifique. La figure 15 montre la réponse en fréquence du servo-vérin.

Un groupe hydraulique de 25 l/min et de 20 MPa, dont les commandes ont été déportées dans la salle de contrôle, a été installé à l'étage au-dessus de la salle de centrifugation, au plus près de la capsule des joints tournants qui transfèrent l'énergie hydraulique vers le rotor et vers la nacelle de la centrifugeuse.

Le servo-vérin (fig. 16) conçu en 1988 pour des essais sur des fondations de plates-formes offshore a été depuis lors mis en œuvre dans de très nombreux programmes de chargement de structures (picux, fondations superficielles, ancrages).

Trémie embarquée

Cette trémie a été développée dans le cadre de l'étude des problèmes posés par l'élargissement de remblais sur sol argileux de faible portance (Akou, 1995). Elle permet de construire des remblais de sable en cours de centrifugation. Son utilisation a été décrite en détail par Akou et al. (1996).

Elle est constituée d'un ensemble mécano-soudé indéformable (fig. 17). La trémie est divisée en huit compartiments par des cloisons amovibles. Chaque compartiment peut être ouvert ou fermé par déplacement d'un tiroir assuré par des vérins hydrauliques.

Avant l'essai, chaque compartiment est rempli avec la quantité de sable nécessaire pour obtenir le profil de remblai souhaité.

Une fois l'accélération atteinte, ce remblai est construit par ouverture des tiroirs, séparément ou par groupe selon le profil à obtenir (fig. 18).

La trémie embarquée

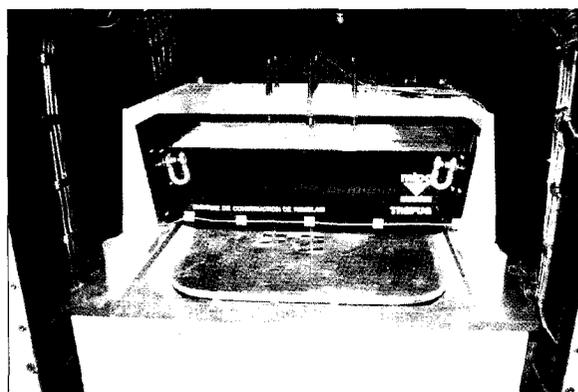


Fig. 17 - Trémie en place sur un conteneur embarqué dans la nacelle de la centrifugeuse.

Fonctionnement sous	70xg
Longueur hors-tout (m)	1,01 × 0,62 × 0,24
Dimensions des compartiments (m)	0,80 × 0,45 × 0,13
Volume maximum de sable (l)	38
Masse à vide (kg)	158

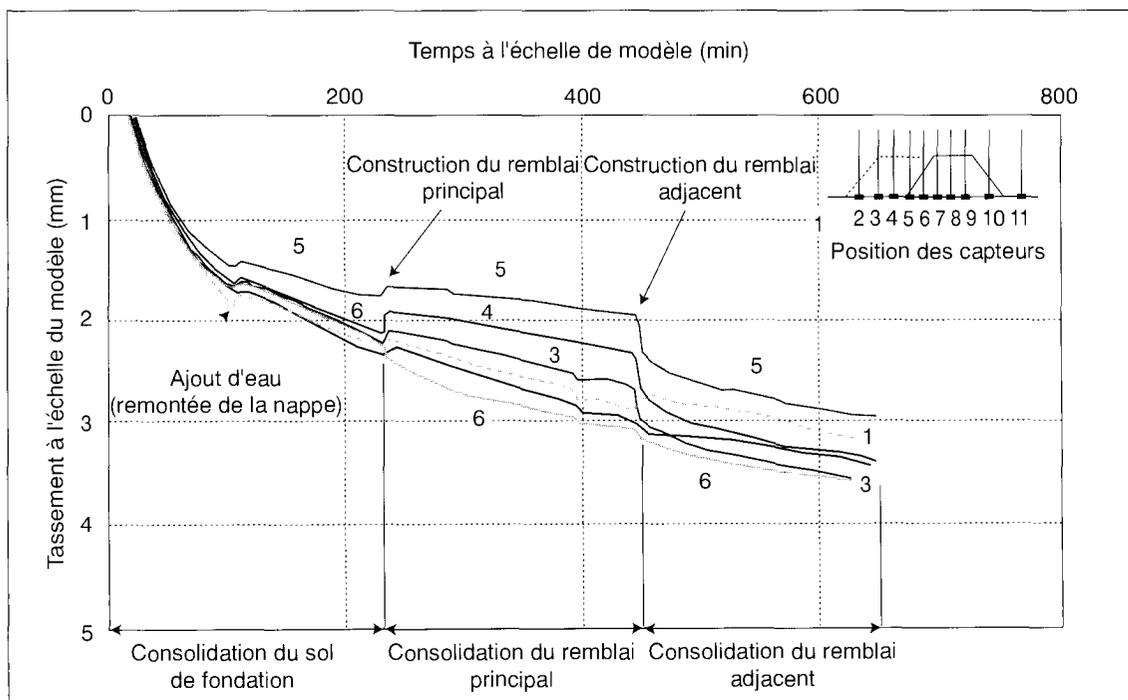


Fig. 18 - Construction de remblais en cours de centrifugation : terrassements observés en fonction du temps (d'après Akou, 1995).

La trémie repose sur trois capteurs de force permettant la mesure de la masse et donc de la vitesse de construction et de la hauteur du remblai mis en place.

Un portique amovible permet d'installer jusqu'à vingt et un capteurs de mesure des déplacements verticaux. Les tiges des capteurs sont équipées de rallonges passant dans des trous percés dans l'épaisseur des cloisons et suivent le tassement de l'interface sol-remblai en différents points. Le tableau XI fournit les principales caractéristiques de la trémie. Pour des essais à 70xg (modèle au 1/70^e), le volume du remblai simulé atteint 13 000 m³ pour une longueur de 55 m environ.

Batteurs

La portance des fondations profondes peut dépendre largement de leur mode de mise en place. On distingue par exemple, dans le règlement français, les pieux refoulant le sol des pieux non refoulants (Fascicule 62). Ces derniers sont habituellement simulés en reconstituant le sol autour des pieux (cas des massifs de sable) ou en les introduisant dans des forages préalables (cas des argiles).

La mise en place par battage nécessite par contre un matériel embarqué, puisque ce battage doit impérativement être effectué en cours de centrifugation.

Un tel batteur a été développé en coopération avec l'École centrale de Nantes et l'université du Havre dans le cadre du programme Macrogravité 92/93 financé par le ministère chargé de la Recherche. L'objectif final était l'étude des conditions de similitude dans le cas du battage des pieux (Sieffert et Levacher, 1995).

Le mouton est un cylindre métallique qui tombe en chute libre sur la tête du pieu. Un vérin hydraulique vertical, dont la tige porte une ventouse magnétique, est utilisé pour reprendre ce mouton et le remonter. Les allers et retours de la tige du vérin sont contrôlés par des diodes optoélectroniques qui garantissent une hauteur de chute constante quel que soit l'enfoncement du pieu (fig. 19).

Le batteur a en outre été conçu pour permettre de modifier facilement la masse du mouton et la hauteur de chute. Il est enfin utilisé après le battage pour effectuer un chargement vertical statique du pieu sans arrêt de la centrifugeuse. Des capteurs de force et de déplacement assurent alors les mesures correspondantes.

Les essais réalisés avec ce batteur ont permis de valider les conditions de similitude sur la force à l'impact, l'accélération en tête du pieu, l'amortissement, la portance du pieu (Sieffert et

Levacher, 1995). La figure 20 montre, à titre d'exemple, que les facteurs d'échelle sur la force en tête et sur le temps sont bien vérifiés.

Les matériels présentés dans les paragraphes ci-dessus ont été mis en œuvre dans plusieurs séries

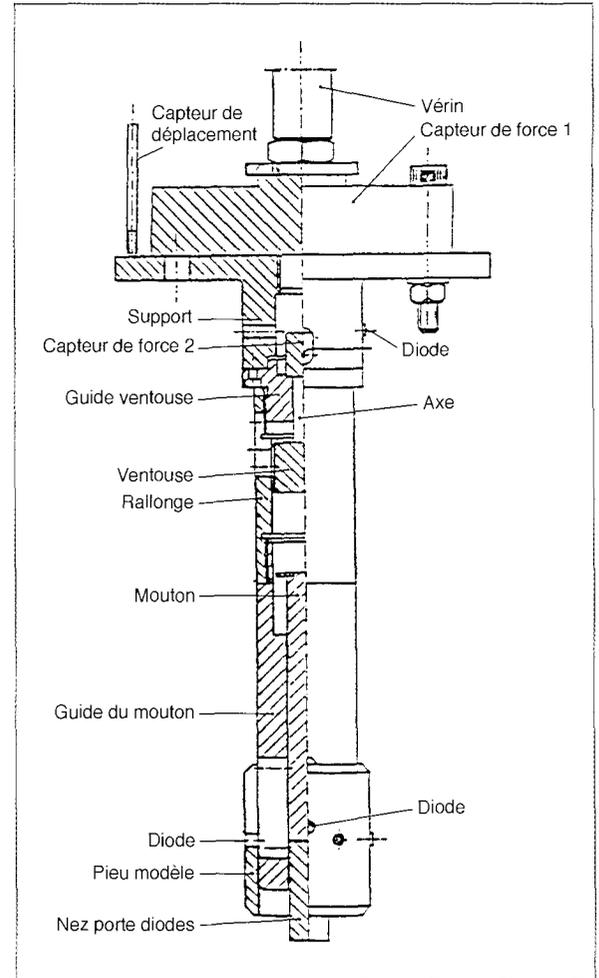


Fig. 19 - Schéma de principe du batteur DLM16.

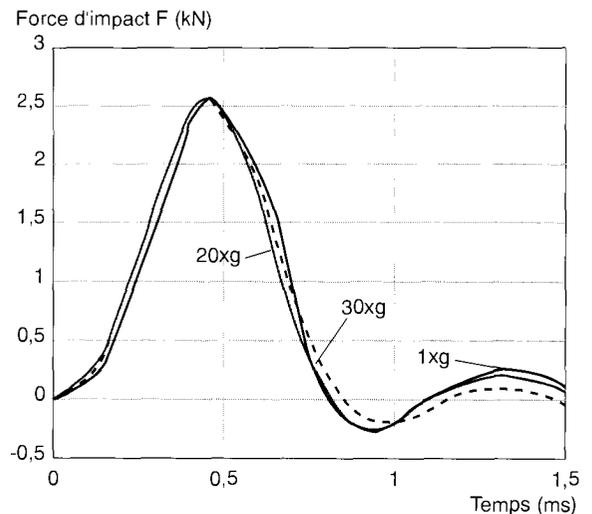


Fig. 20 - Forces d'impact réduites en fonction du temps (Sieffert et Levacher, 1995).

d'expériences. D'autres dispositifs ont aussi été conçus pour des applications plus spécifiques comme, par exemple :

- la simulation du terrassement d'une fouille verticale renforcée par clouage (Projet national CLOUTERRE) ;
- la chute d'un bloc rocheux et l'étude d'un remblai de protection pour la déviation d'Aigue-blanche sur la RN 90 (Lepert et Corté, 1988) ;
- l'étude de la stabilité et des avalanches dans les talus en milieux granulaires dans le cadre du programme Macrogravité 92/93 (Porion, 1994).

Il convient enfin de mentionner ici le téléopérateur (Derckx et *al.*, 1998), qui est au contraire un matériel d'utilisation très universelle et qui sera présenté en détail dans la dernière partie du présent article.

Matériels d'observation et de mesure

La possibilité d'effectuer des mesures sur le modèle en cours de centrifugation, apparue à la fin des années 1970, est en fait à l'origine de la deuxième génération de centrifugeuses et de l'essor considérable pris par la modélisation physique depuis une vingtaine d'années. La troisième génération verra probablement le développement d'appareils embarqués robotisés, dont le téléopérateur du LCPC est un peu le précurseur.

Capteurs, chaînes et logiciels d'acquisition et de traitement

Les mesures réalisées actuellement sur les modèles centrifugés reposent soit sur des capteurs classiques soit sur des techniques de traitement d'images.

Le LCPC a sans doute été l'un des premiers laboratoires à installer les chaînes d'acquisition sur le bras de la centrifugeuse dès le début des années 1980 (lors d'expériences réalisées sur la centrifugeuse du CEA-CESTA). Cette méthode s'est généralisée car elle présente les avantages suivants (Garnier et Cottineau, 1988) :

- les signaux analogiques sont numérisés avant le passage des contacts tournants et ne sont donc pas altérés,
- le nombre de voies n'est limité que par les capacités des chaînes utilisées et non par celles des contacts tournants.

Les chaînes d'acquisition sont des matériels standard choisis en fonction de la résolution et de la fréquence d'acquisition souhaitées : HBM UPM 60, HP 3852, KRENZ TMR 4010 (fig. 21).

Les données numériques arrivent au poste de commande où elles sont stockées et traitées en temps réel. Un logiciel a été spécialement écrit pour assurer le pilotage des chaînes, l'acquisition

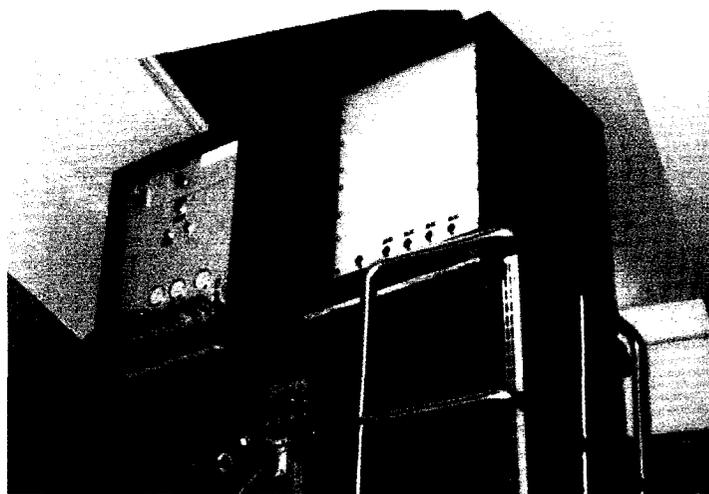


Fig. 21 - Baies au pivot contenant les chaînes d'acquisition embarquées.

et le traitement des données (CHAINE1). Il permet notamment d'afficher à l'écran entre un et quatre graphiques donnant l'évolution de paramètres sélectionnés. Ce suivi en temps réel est indispensable pour une conduite optimale du processus expérimental.

Le parc actuel est constitué d'environ 150 capteurs permettant les mesures de force, de pression, de déplacement, de température et d'accélération. L'extensométrie est souvent mise en œuvre pour le suivi des déformations et la détermination des contraintes dans les structures.

Chaque fois que cela est possible, ces capteurs font l'objet de tests sous accélération, ce qui permet d'intégrer tout le dispositif de mesure dans la vérification. Différents systèmes ont été conçus dans ce but, pour vérifier par exemple les capteurs de pression, de force, d'accélération. Il est probable que dans les années à venir ces contrôles systématiques deviendront la règle du fait de l'apparition de procédures d'assurance-qualité dans les études et les recherches.

Des capteurs spécialement adaptés aux modèles centrifugés sont aussi disponibles pour la mesure des pressions interstitielles (König et *al.*, 1994), des contraintes totales (Garnier et *al.*, 1998), des teneurs en eau (Dupas et *al.*, 1995), des efforts de pointe (pénétromètre, pieux).

Exceptionnellement, d'autres moyens de mesure ont parfois été utilisés sur la centrifugeuse, comme par exemple un vélocimètre laser à effet Doppler et un fluxmètre (Most et *al.*, 1994).

Caméra et analyse d'images

Les capteurs de déplacement permettent la mesure ponctuelle suivant une direction. Lorsque le déplacement n'est pas rectiligne ou lorsque l'on s'intéresse à un champ de déplacements, il est nécessaire de recourir à d'autres techniques.

Les méthodes de traitement numériques d'images sont ainsi employées depuis 1988. Elles ont été rendues possibles sur modèles centrifugés par la miniaturisation de caméras CCD qui, contrairement aux caméras à tube, supportent sans dommage des accélérations de plusieurs centaines de g.

Le système actuellement mis en œuvre a été développé par la section Traitement d'images du LCPC et a régulièrement évolué (Moliard, 1993). Les travaux ont principalement porté sur le choix des marqueurs, leur recherche automatique, les algorithmes de traitement, la correction automatique des erreurs optiques et des mouvements de la caméra. En outre, un dispositif spécial a été conçu pour le positionnement précis de la caméra et des éclairages, dont la mise en œuvre a également recours aux techniques de traitement d'images (fig. 22).

Traitement numérique d'images

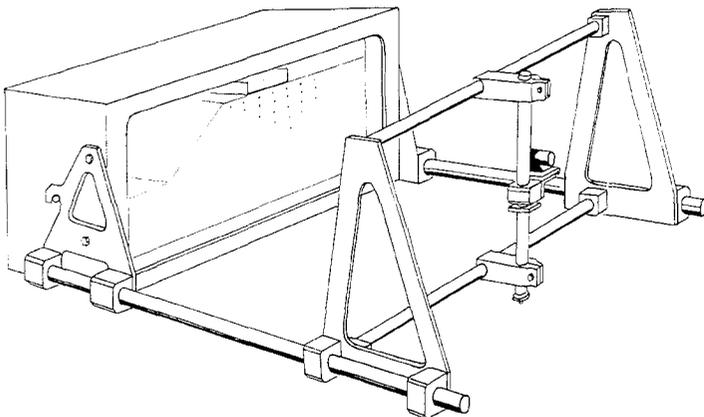


Fig. 22 - Dispositif de prise de vues.

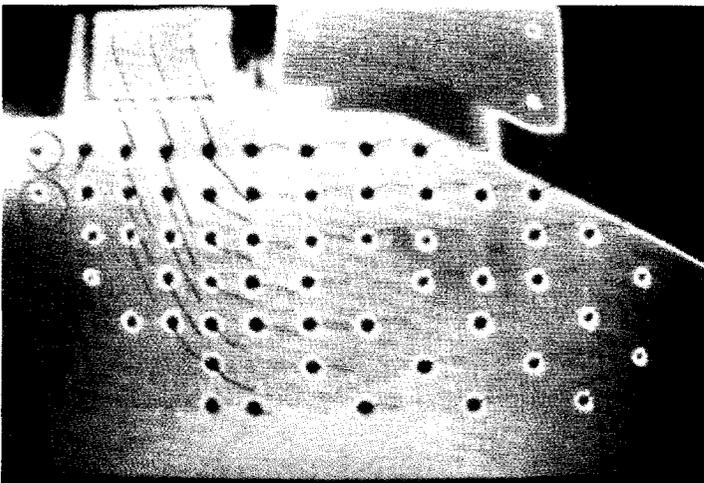


Fig. 23 - Exemples d'application (fondation en bord de pente).

Différents exemples d'application ont été présentés par Corté et Garnier (1992) et par Charrier et al. (1997). Les études ont principalement porté sur l'écoulement de matériaux granulaires en trémières (Ranaivoson, 1990), sur les mécanismes de rupture au front de taille des tunnels (Chambon, 1990 ; Skiker et al., 1993) et sous les fondations superficielles (Bakir, 1993) et sur le flambement des pieux (Youssef, 1994). La figure 23 montre le champ de déplacements observé sous une fondation en bord de pente. Les développements en cours concernent le passage à des images couleur et l'association de plusieurs caméras pour obtenir des champs de déplacement tridimensionnels.

Conteneur à face transparente

Cet équipement, dont les caractéristiques principales sont présentées dans le tableau XII, a été conçu pour permettre de suivre les déplacements du sol dans une coupe verticale au moyen des techniques d'analyse d'images décrites ci-dessus.

Ce conteneur dispose d'une face verticale transparente en verre feuilleté de 10 cm d'épaisseur. Il est entièrement démontable, ce qui permet d'effectuer la pluviation du sol suivant une direction quelconque et également d'effectuer, après essai, des coupes verticales à l'intérieur du massif de sol.

Le conteneur à face transparente

TABLEAU XII
Caractéristiques principales

Fonctionnement sous	60xg
Dimensions intérieures (m)	0,8 × 0,4 × 0,36
Pression de service (MPa)	0,50
Masse (kg)	250
Surface vitrée (m)	0,77 × 0,30

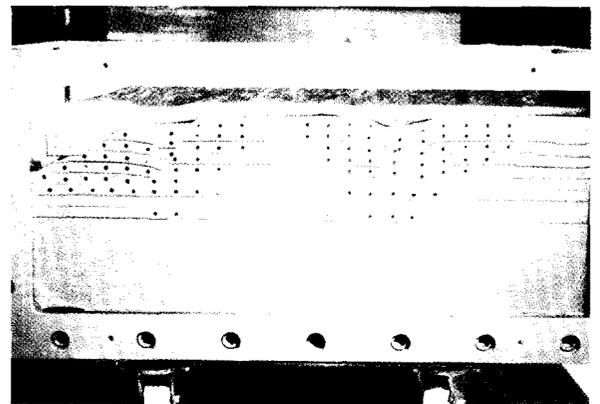


Fig. 24 - Conteneur à face transparente et marqueurs équipant le massif de sol.

Les marqueurs utilisés sont soit de fines couches horizontales de sable coloré, soit de petites inclusions mises en place contre la face vitrée et conçues de façon à suivre les déplacements du massif de sol (fig. 24).

Téléopérateur

Intérêt d'un téléopérateur embarqué

Nous avons pu voir dans les paragraphes précédents que les essais en centrifugeuse sont réalisés avec des équipements spécifiques, embarqués le plus souvent à poste fixe sur le conteneur.

Répéter l'essai en différents points du modèle ou enchaîner deux types d'essais nécessite d'arrêter la centrifugeuse pour déplacer ou changer l'équipement embarqué. Ces arrêts successifs provoquent sur le modèle des cycles de chargement et de déchargement qui peuvent entraîner des évolutions irréversibles de l'état du sol. Si tel est le cas, la répétabilité des essais dans un même conteneur se trouvera affectée.

Dans les modèles en argile, il faut en outre reconsolider le modèle après chaque arrêt pendant plusieurs heures, ce qui peut augmenter considérablement la durée totale des essais.

Ces différentes considérations ont conduit le LCPC à se doter d'un ensemble robotisé, placé dans la nacelle de la centrifugeuse. Ce téléopérateur à quatre axes, actuellement sans équivalent dans le monde, dispose d'un magasin et d'un changeur d'outils. Il peut donc enchaîner différentes opérations sur le modèle sans arrêter la centrifugeuse.

Déroulement du projet

De nombreuses années d'effort ont été nécessaires pour concevoir, étudier, réaliser et mettre au point ce robot destiné à fonctionner sous une accélération de cent fois l'accélération terrestre.

Dix ans séparent le premier rapport de faisabilité (1986) et le premier changement d'outils réalisé avec succès dans la centrifugeuse du LCPC sous une accélération de 100xg (1997).

Les phases successives de ce projet ont été les suivantes :

- Étude de faisabilité et de coût confiée à l'Unité de Génie Robotique avancée du Commissariat à l'énergie atomique (1987-1988).
- Études d'avant-projet réalisées par un groupe de travail du LCPC en coopération avec le département de Robotique de l'École centrale de Nantes (1989-1990).
- Recherche de financements au titre des grands équipements auprès des ministères chargé de l'Équipement et chargé de la Recherche (1988-1991).

- Rédaction du cahier des charges et appel de candidatures international (1991).
- Étude des propositions, sélection d'un premier titulaire et rédaction du marché avec coopération du CETIM pour la partie contrôle-commande (1991).
- Recherche d'un nouveau sous-traitant suite à la défaillance du précédent titulaire (1992).
- Nouvelle négociation du marché avec le groupement Acutronic pour la partie mécanique et Cybernétix pour la partie contrôle-commande (1992-1993).
- Phase d'étude (1994-1995).
- Phase de réalisation (1995-1996).
- Réception en usine (1996).
- Installation et mise en service sur site (1997).

On peut également mentionner que, suite à la mise en liquidation judiciaire de la société Acutronic au cours de la phase de réalisation, le LCPC (section Études et fabrication et section Mécanique des sols et centrifugeuse) a été conduit à terminer seul le montage et la mise au point de l'ensemble mécanique.

Description générale du téléopérateur

Ce robot, représenté sur la figure 25, est de type cartésien. Il fonctionne sous 100xg et dispose de quatre degrés de liberté (trois en translation X, Y, Z et un en rotation θ_z). Il peut saisir l'un des trois outils en place dans le magasin et le positionner au millimètre près en tout point du conteneur puis effectuer ensuite les interventions prévues sur le modèle.

Le tableau XIII ci-après donne les courses, les vitesses de déplacement et les efforts que peut générer le robot.

Ensemble mécanique

Cet ensemble comprend le robot proprement dit (mécanique et motorisation) avec le magasin porte-outil, ainsi que les outils.

Le robot

Il est constitué d'une plaque de base (repère 1 sur la figure 26), sur laquelle est monté l'ensemble des éléments mécaniques assurant les translations selon les axes X, Y, Z et la rotation θ_z . L'axe Z est orienté suivant la verticale du modèle réduit, les axes X et Y sont dans son plan horizontal, respectivement suivant le petit et le grand côté du conteneur.

Les dispositifs de translation selon X et Y sont de même type. Ils se composent chacun de deux rails de guidage linéaire (2 et 3), de quatre patins (4 et 5), et d'un moteur sans-balai entraînant un ensemble vis/écrou (6 et 7). Le repérage en position sur chacun des deux axes X et Y est assuré par le traitement du signal provenant d'un résol-

Description générale et ensemble mécanique du téléopérateur

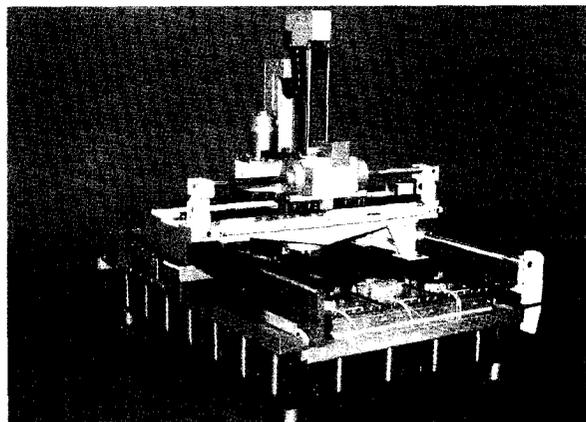


Fig. 25 - Vue générale.

TABLEAU XIII
Caractéristiques principales

Fonctionnement sous	100xg			
Dimensions (m)	1,494 × 1,104 × 1,037			
Masse (kg)	305			
Axes	X	Y	Z	θ_z
Déplacements (mm)	560	978	400	370
Vitesses (mm/s)	0 à 80	0 à 50	0 à 50	0 à 20
Efforts (N)	1 000	250	4 500 5 000	
Couple (Nm)				0,5

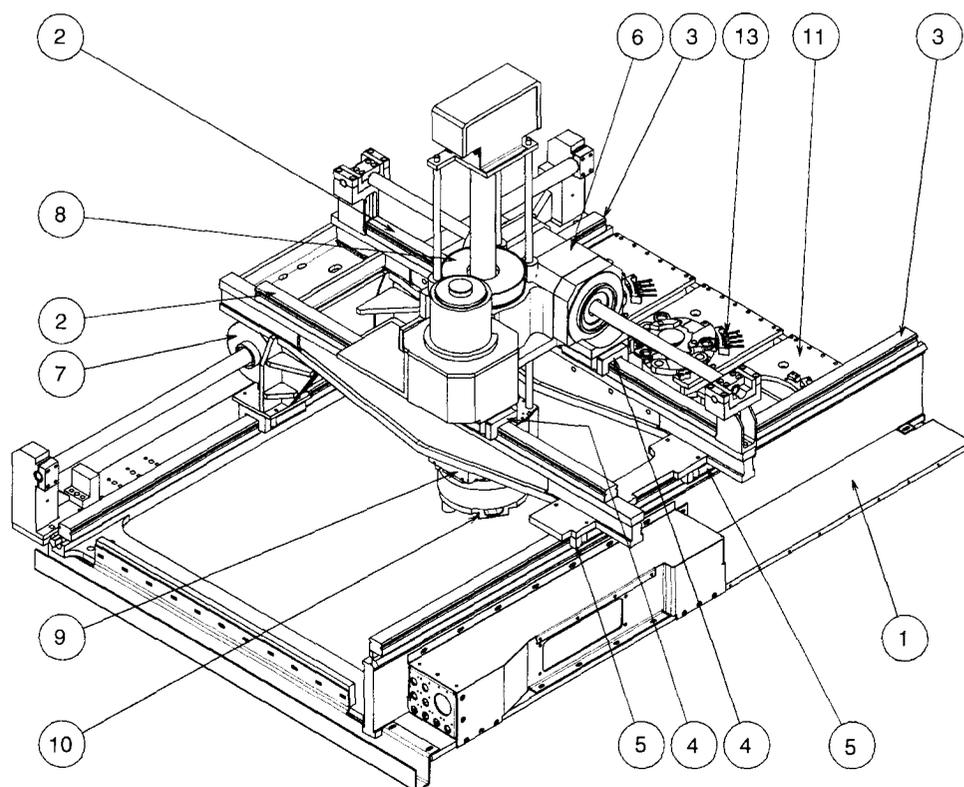


Fig. 26 - Vue d'ensemble.

Description générale et ensemble mécanique du téléopérateur

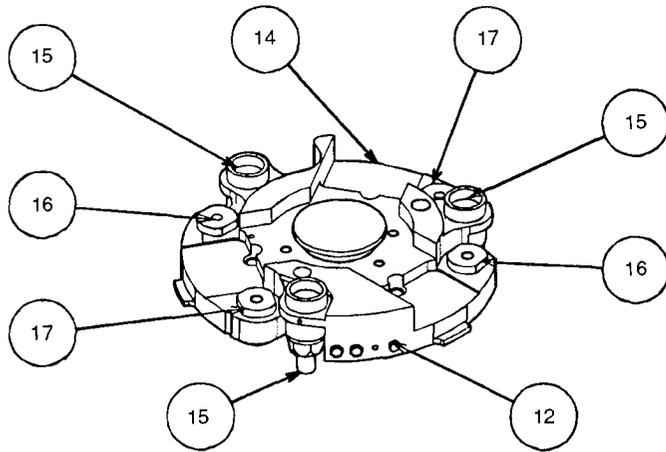


Fig. 27 -
Tête standard
pour la connexion
des outils
sur le téléopérateur.



Fig. 28 - Outil-pince.

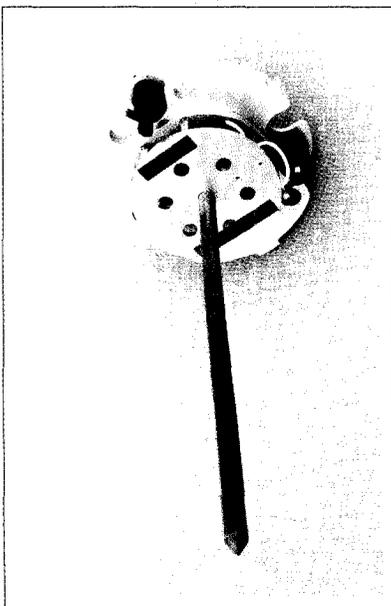
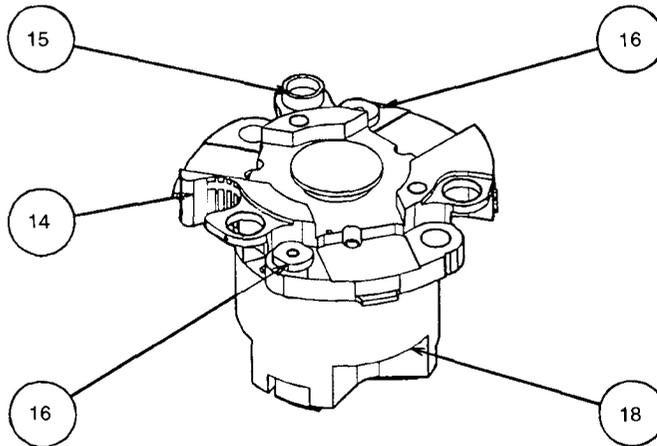
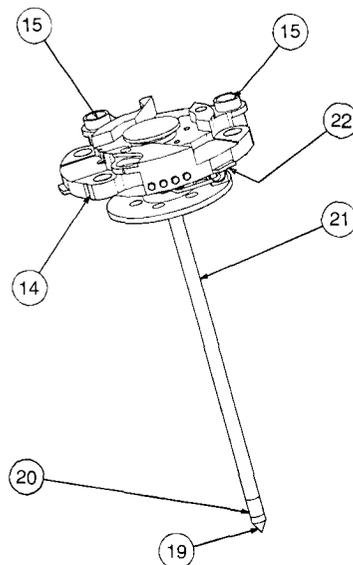


Fig. 29 - Le pénétromètre.



veur directement couplé au moteur. Un frein électrique permet de bloquer l'axe en position lorsque le moteur n'asservit plus le déplacement.

La translation selon l'axe Z est réalisée à l'aide d'un système vis/écrou (8) entraîné en direct par un moteur sans balai. Comme pour les axes X et Y, la position est donnée par le signal d'un résolveur directement couplé au moteur. Un frein pneumatique alimenté par un circuit de 0,6 MPa permet de bloquer la colonne en position lorsque l'asservissement n'est plus en fonction.

La rotation θ_z de la tête du téléopérateur (9) située au bas de l'axe Z est assurée par une couronne dentée entraînée par un moto-réducteur à courant continu. La position est connue grâce au traitement du signal délivré par un déphaseur sinus/cosinus entraîné par la couronne.

Les déplacements selon les quatre axes sont limités successivement par une butée logicielle puis une butée électrique, gérées par le système de contrôle-commande, et enfin une butée mécanique.

Au bas de la colonne Z se trouve le porte-outil (10) avec caméra vidéo incorporée.

La prise d'outil comprend les phases successives suivantes :

- positionnement de la tête à la verticale de l'outil à saisir en place dans l'un des trois magasins (11). Un capteur laser sans contact assure le repérage fin par rapport à l'outil en position dans le plan XY ;
- descente verticale suivant Z jusqu'au contact assurant en même temps les connections fluides et électriques (cf. paragraphe « Outils » ci-après) ;
- verrouillage à l'aide de trois doigts, actionnés par trois vérins alimentés par un circuit hydraulique sous une pression de 10 MPa ;
- dégagement de l'outil par rotation θ_z (sortie des baïonnettes) puis translations Z puis Y.

L'axe Z, véritable colonne vertébrale du robot, contient les flexibles hydrauliques, pneumatiques, les joints tournants et les câbles électriques. Il inclut également un capteur de force F_z mesurant en permanence la force verticale (selon l'axe Z) reprise par la colonne. Cette donnée est très précieuse car elle permet de détecter des défauts de fonctionnement comme des collisions ou des surcharges.

Les outils, une fois connectés sur la tête du robot, peuvent ainsi disposer de trois circuits électriques, d'un circuit hydraulique à huile sous une pression de 20 MPa, et d'un circuit à double fonction (eau ou air) sous une pression de 2 MPa. Ces différents circuits permettent d'alimenter des actionneurs ou des capteurs montés sur l'outil.

Les outils sont en outre codés par la présence ou non de quatre marqueurs (repère 12 de la figure 27) reconnus par des capteurs de proximité (repère 13 de la figure 26) situés sur chaque magasin. Ce codage est ensuite utilisé par le système de contrôle et commande pour identifier puis gérer l'outil mis en œuvre.

Les outils

Pour leur connexion sur la tête du robot, les outils comportent tous une embase identique (repère 14 de la figure 27), sous laquelle se fixe l'outil proprement dit. Selon les besoins, cette embase est équipée de connecteurs électriques (15), hydrauliques à eau ou air (16), hydrauliques à huile (17), et de marqueurs (12) assurant le codage binaire de l'outil.

Quelques outils primaires ont déjà été réalisés, comme l'outil-pince, le pénétromètre, des outils de chargement vertical ou horizontal de structures et un outil de terrassement de sol sableux.

L'outil-pince (fig. 28) se compose de la tête standard (14) sur laquelle est fixée une pince pneumatique à trois mors (18). Il utilise un connecteur électrique (15) et deux connecteurs pneumatiques (16) pour le fonctionnement de la pince. Les circuits électriques sont mis en œuvre dans cet outil pour savoir si la connexion est correctement établie, si la pince est ouverte ou fermée et si un objet est présent dans la pince.

Cet outil peut servir à la préhension, à la manipulation et au déplacement d'objets ou d'éléments de structures (fondations, pieux, charges statiques ou roulantes, etc.).

Le pénétromètre (fig. 29) comporte une pointe pénétrométrique (19), un capteur de force (20) porté par le train de tiges (21) pour la mesure de la résistance à l'enfoncement ainsi que le conditionneur du signal force (22). L'ensemble est monté sur une embase standard (14). L'alimentation et la réponse du capteur de force en pointe transitent par les liaisons du connecteur électrique (15). La pénétration de la tige dans le sol est réalisée grâce au mouvement de translation selon l'axe Z du robot.

La course est de 400 mm et la force maximale de pénétration est de 5 000 Newton.

Ensemble de contrôle et commande

Cet ensemble est réparti entre les baies électriques, le pupitre de commande et le PC de programmation et de téléchargement.

Il est bâti autour d'une commande numérique et d'un automate (Robonum 800 de Télémécanique). Un processeur CN gère le boîtier d'apprentissage,

le PC de chargement, le pupitre de programmation, ainsi que les moteurs. Les entrées-sorties sont gérées par un autre processeur.

Le système de contrôle et commande est dédoublé. Un premier ensemble est installé dans la salle de préparation du modèle et le second dans deux baies sur le pivot de la centrifugeuse près de l'axe (fig. 30).

Les baies contiennent l'ensemble des matériels électriques (puissance, relais), électroniques (variateurs de vitesse, commande numérique), hydrauliques et pneumatiques (distributeurs) nécessaires au pilotage du robot. Elles sont raccordées au téléopérateur par un ensemble de sept câbles électriques, de quatre flexibles hydrauliques et de deux flexibles pneumatiques.

Pour le fonctionnement du téléopérateur embarqué sur la centrifugeuse, ces câbles et flexibles ont été installés à demeure dans les bras de la centrifugeuse et arrivent directement dans la nacelle.

Le pupitre de commande (clavier, écran et boîtier d'apprentissage) peut être raccordé au robot soit dans la salle de préparation des modèles (pour la phase de programmation et d'apprentissage), soit dans la salle de centrifugation (pour la phase de vérification avant essai), ou encore depuis la salle de commande de la centrifugeuse (pendant la phase d'essais proprement dite).

Un micro-ordinateur de type PC est utilisé pour développer les programmes de pilotage du robot, qui sont ensuite téléchargés dans la commande numérique via un réseau local. Ces programmes ont recours à un ensemble de macro-instructions préétablies, mais peuvent aussi comporter des séquences enregistrées par apprentissage.

Des logiciels ont, par ailleurs, été développés pour afficher sur le PC les données provenant du robot via le contrôle-commande (déplacements X, Y, Z, θ_z , force F_z) et provenant des capteurs intégrés aux outils.

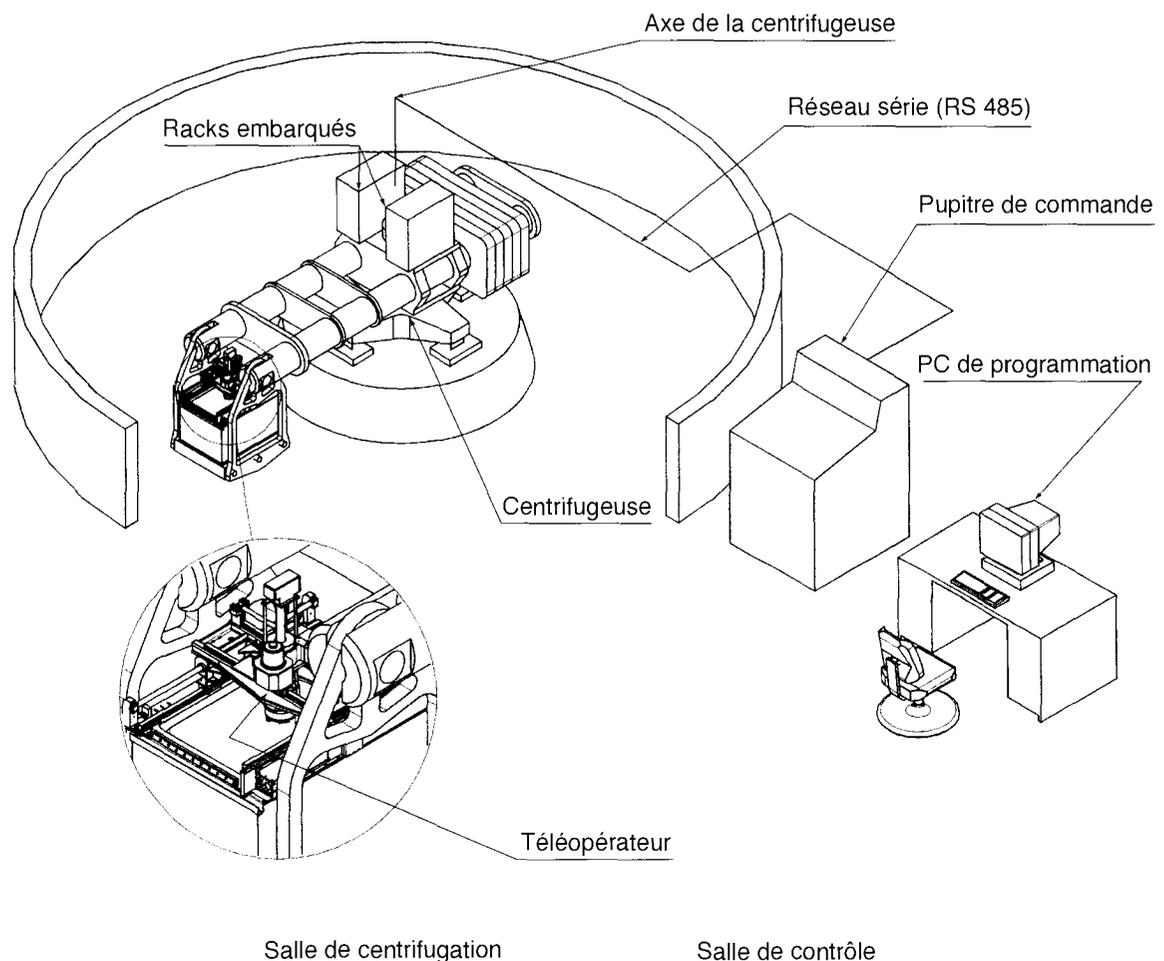


Fig. 30 - Salles de programmation, de contrôle et de centrifugation.

Fonctionnalités

Il existe deux modes d'utilisation du téléopérateur :

- le mode manuel, où l'opérateur déplace le téléopérateur à vue, axe par axe, à l'aide du boîtier d'apprentissage ou du pupitre ;
- le mode automatique, où le robot exécute un programme préalablement écrit et stocké en mémoire.

Il est possible, durant l'essai, de passer d'un mode de fonctionnement à l'autre.

Les programmes actuellement disponibles permettent d'effectuer les fonctions suivantes :

- prise d'origine automatique,
- choix d'un outil, prise et dépose dans le magasin,
- commande de l'outil pince (ouverture, fermeture),
- gestion des entrées-sorties logiques du système,
- acquisition des entrées analogiques, commande des sorties logiques,
- asservissement en effort suivant un axe déterminé.

Premières utilisations du robot

Mesures de pénétrométrie

La première utilisation du robot a été l'étude de l'homogénéité d'un massif de sable réalisé par pluviation et soumis à la centrifugation. La distribution des densités obtenues avec la trémie de pluviation automatique du LCPC avait été étudiée au préalable (Garnier et al., 1993). Ces travaux avaient montré que la variation de densité sur l'ensemble du conteneur était inférieure à 1,5 %.

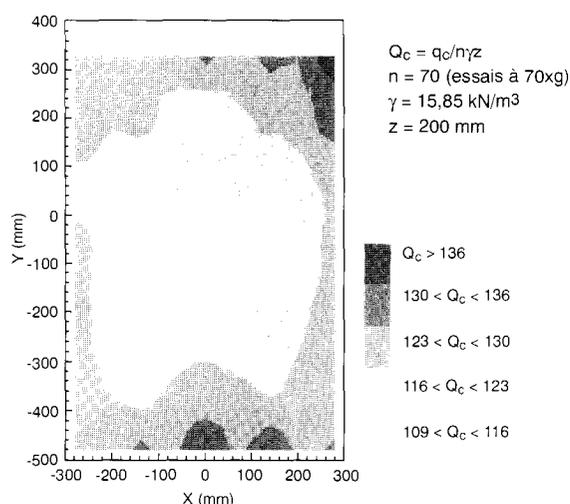


Fig. 31 - Distribution de la résistance à la pénétration normalisée Q_c à 70xg.

Dans chaque massif de sable, trente-six essais de pénétration à 70xg ont été réalisés à l'aide du téléopérateur et de l'outil pénétromètre, sans

arrêter la centrifugeuse. Le sol était un sable de Fontainebleau mis en place par pluviation (poids volumique $\gamma = 15,85 \text{ kN/m}^3$). La figure 31 montre, à titre d'exemple, la distribution de l'effort de résistance normalisé Q_c à une profondeur $z = 200 \text{ mm}$ ($Q_c = q_c/n\gamma z$ dans laquelle q_c est l'effort mesuré en pointe).

Au centre du conteneur, Q_c varie de 109 à 123 (soit une variation de $\pm 6 \%$) et augmente nettement lorsque l'on se rapproche des petits côtés du conteneur. Cette variation de Q_c est en partie explicable par la densité plus forte observée dans ces zones (Bakir et al., 1994 ; Ternet, 1999).

Essai d'arrachement de plaques verticales et d'inclusions horizontales

La deuxième utilisation de ce robot a été la réalisation d'essais d'arrachement de plaques et de clous cylindriques ancrés dans un modèle en sable. L'objectif de ces essais était l'étude de l'effet d'échelle due à la taille des grains sur le cisaillement mobilisé à l'interface (contrainte de cisaillement maximale et déplacement nécessaire pour atteindre cette contrainte).

L'effet des dimensions des plaques et du diamètre des clous ainsi que celui de leur rugosité ont été étudiés lors d'essais effectués à 40xg (Boulet, 1997 ; Lecollinet, 1998 ; Garnier et Konig, 1998).

Excavation d'une fouille devant une paroi

L'un des intérêts du robot embarqué concerne la possibilité de réaliser des terrassements en cours de centrifugation. De premiers essais de faisabilité ont été effectués pour l'étude du comportement d'une paroi moulée de 11,50 m de hauteur. Le robot permet d'alterner les phases d'excavation et de sondage au pénétromètre statique. L'outil procédant au terrassement est une lame équipée d'un capteur mesurant l'effort horizontal exercé (Bodin, 1999).

Conclusions

■ La première génération de centrifugeuses à vocation géotechnique correspond à la période des « pionniers ». Elle se situe approximativement entre les années 1930 et 1960 et a vu la mise en service d'une quinzaine de petites centrifugeuses (rayon de 1 à 2,5 m) installées pour l'essentiel en Union Soviétique. L'instrumentation des modèles était très peu développée et il n'y avait pas d'opération, ni d'observation en cours de centrifugation.

■ La deuxième génération correspond à la période des années 1960 à la fin des années 1990 et se caractérise par le développement d'importants moyens de mesure et d'observation du modèle embarqué. Elle a en effet été rendue possible par

l'apparition des capteurs électriques dont le signal pouvait être transmis à distance, des caméras vidéo embarquables et des micro-ordinateurs. Cette période a vu l'explosion du parc mondial de centrifugeuses géotechniques, qui compte aujourd'hui plus de soixante-dix machines de tailles diverses (rayon de 1,5 à 10 m, masse embarquable de quelques centaines de kilogrammes à 3 t, accélération maximale 100 à 200xg).

Au LCPC, le développement et l'utilisation systématique de matériels de préparation et de caractérisation de modèles a permis de mieux maîtriser l'homogénéité des massifs de sol et d'en connaître avec précision les caractéristiques mécaniques sous accélération. Par ailleurs, grâce à la mise au point d'appareils mono-fonction capables d'intervenir sur le modèle en cours de centrifugation, une très large variété d'ouvrages géotechniques et de sollicitations a pu être simulée.

■ Actuellement débute la troisième génération, qui sera caractérisée par l'emploi de robots pilotés par ordinateur, embarqués sur des centrifugeuses à nacelle ou à tambour, ouvrant ainsi de

nouvelles possibilités d'essais en centrifugation. D'importantes évolutions technologiques sont aussi prévisibles (capteurs intelligents, communication directe entre le modèle et les réseaux informatiques, traitement d'images en temps réel). Cette troisième ère sera enfin probablement celle de la standardisation au niveau international de certaines procédures expérimentales.

Pour aborder cette nouvelle période en bonne position, le LCPC a étudié et réalisé un robot de type cartésien, actuellement unique au monde. Il est capable d'évoluer dans la nacelle de la centrifugeuse, sous un champ de gravité élevé (100xg) et possède quatre axes indépendants (X, Y, Z et θ_z). Il peut, sans arrêt de la centrifugeuse, saisir des outils différents qui sont munis de circuits électriques, pneumatiques et hydrauliques pouvant alimenter des capteurs et des actionneurs.

Les premières utilisations ont confirmé l'intérêt de ce robot, qui ouvre des voies totalement nouvelles à la modélisation d'ouvrages géotechniques en macrogravité.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier très vivement J.-F. Corté, Directeur technique chargé du pôle Chaussées, pour l'impulsion donnée dès l'origine aux études sur modèles et qui s'est révélée déterminante ; J. Campin, J. Lafon, E. Merliot et J.-C. Sztikar (section Études et fabrication) pour l'étude et la fabrication des matériels ; Cl. Favraud et D. Abbé (section Mécanique des sols et centrifugeuse) pour les mises au point et les développements en centrifugeuse ; J. Charrier et J.-M. Moliard (section Traitement d'images) pour le développement de la technique de traitement d'images ; F. Peyret (section Robotique de chantier) et M. Bouillane (CETIM) pour leur assistance dans l'étude du téléopérateur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AKOU Y. (1995), *Étude expérimentale et modélisation de l'élargissement des remblais sur sols compressibles*, Thèse de doctorat ENPC, Paris, 258 pages.

AKOU Y., DERKX F., MERLIOT E., RAULT G. (1996), Une trémie embarquée pour la construction de remblais de sable en centrifugeuse : conception et premières applications, *Revue française de Géotechnique*, **77**, pp. 45-50.

BAKIR N.-E. (1993), *Étude sur modèles centrifugés de la capacité portante de fondations superficielles*, Thèse de doctorat, Université et École centrale de Nantes, 250 pages.

BAKIR N.-E., GARNIER J., CANÉPA Y. (1994), *Loading of shallow foundations : importance of testing procedures*, International Conference Centrifuge 94, Singapore, Balkema, pp. 553-558.

BODIN D. (1999), *Modélisation physique des parois de soutènement, Étude de faisabilité*, DEA de l'université de Nantes, 76 pages.

BOLTON M.D., GUI M.W., GARNIER J., CORTÉ J.-F., BAGGE G., LAUE J., RENZI R. (1999), Centrifuge cone

penetration tests in sand. *Géotechnique, Géotechnique*, Vol. XLIX, **4**, pp. 543-552.

BOULET D. (1997), *Effet d'échelle dans le cisaillement d'interfaces - Essais à la boîte et sur modèles réduits centrifugés*, Rapport de TFE, ENSAIS, Strasbourg, 75 pages.

BOUAFIA A. (1990), *Modélisation des pieux chargés latéralement en centrifugeuse*, Thèse de doctorat, Université et École centrale de Nantes, 264 pages.

CHAMBON P. (1990), *Étude sur modèles réduits centrifugés : Application aux tunnels à faible profondeur en terrain meuble pulvérulent*, Thèse de doctorat, Université et École centrale de Nantes, 195 pages.

CHARRIER J., MOLIARD J.-M., GARNIER J. (1997), *Numerical image processing in centrifuge testing*, Second International Conference on Image Technologies : Techniques and Civil Engineering Applications, Davos, p. 10.

CORTÉ J.-F., GARNIER J. (1986), Une centrifugeuse pour la recherche en géotechnique, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **146**, pp. 5-28.

- CORTÉ J.-F., GARNIER J., COTTINEAU L.-M., RAULT G. (1991), *Determination of soil properties in the centrifuge*, International Conference Centrifuge 91, Boulder, Balkema, pp. 607-613.
- CORTÉ J.-F., GARNIER J. (1992), *Measuring soil displacements in centrifuge model tests. Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. H.L. Jessberger*, Balkema, pp. 29-42.
- DERKX F., MERLIOT E., GARNIER J., COTTINEAU L.-M., (1998), *On-board remote-controlled robot*, International Conference Centrifuge 98, Tokyo, Balkema, pp. 97-102.
- DUPAS A., COTTINEAU L.-M., GARNIER J. (1995), *Capteur de mesure de teneur en eau embarqué en centrifugeuse*, First International Conference on Unsaturated soils, UNSAT'95, Paris, Balkema, pp. 467-471.
- GARNIER J., COTTINEAU L.-M. (1988), *La centrifugeuse du LCPC : moyens de préparation des modèles et instrumentation*, International Conference Centrifuge 88, Paris, Balkema, pp. 83-90.
- GARNIER J., CANÉPA Y. (1991), *Effects of different footing conditions on the ultimate bearing pressure*, International Conference Centrifuge 91, Boulder, Balkema, pp. 209-216.
- GARNIER J., KUS B., LEVACHER D. (1993), *Cartographie des densités de massifs de sable reconstitués par pluviation*, 6e Colloque franco-polonais de mécanique des sols, Douai, pp. 105-112.
- GARNIER J. (1995), *Modèles réduits en mécanique des sols, Les modèles réduits en génie civil*, AUGC, Ed. J.G Sieffert, pp. 21-44.
- GARNIER J., KÖNIG D. (1998), *Scale effects in piles and nails loading tests in sand*, International Conference Centrifuge 98, Tokyo, Balkema, pp. 205-210.
- GARNIER J., TERNET O., COTTINEAU L.-M., BROWN C.J. (1998), *Placement of embedded pressure cells. Géotechnique*, Vol. XLIX, 3, pp. 405-414.
- KÖNIG D., JESSBERGER H.L., BOLTON M., PHILIPPS R., BAGGE G., RENZI R., GARNIER J. (1994), *Pore pressure measurement during centrifuge model tests : experience of five laboratories*, International Conference Centrifuge 94, Singapore, Balkema, pp. 101-108.
- KÜS B. (1992), *Pluviation des sables*, Rapport de DEA, Université de Nantes, 53 pages.
- LARÉAL P., BOULEBNANE A., GARNIER J., COTTINEAU L.-M. (1995), *Détermination expérimentale du coefficient K_0 . Méthode d'essai en laboratoire*, 11e Conférence européenne de Mécanique des sols et Travaux de fondation, Copenhague, vol. 3, pp. 143-148.
- LECOLLINET J. (1998), *Effets de taille et d'accélération dans le cisaillement des interfaces sol/pieu*, Rapport de DEA, Université de Nantes, 85 pages.
- LEPERT P., CORTÉ J.-F. (1988), *Étude en centrifugeuse de l'impact de gros blocs rocheux sur un remblai de protection*, International Conference Centrifuge 88, Paris, Balkema, pp. 457-465.
- MAGNAN J.-P., DEROY J.-M. (1980), *Analyse graphique des tassements observés sous les ouvrages, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 109, pp. 45-52.
- MARÉCHAL O. (1999), *Portance de fondations superficielles établies à proximité de talus et soumises à des charges inclinées et excentrées*, Thèse de doctorat, Université et École centrale de Nantes, 357 pages.
- MEZAZIGH S. (1995), *Étude expérimentale de pieux chargés latéralement : proximité d'un talus et effet de groupe*, Thèse de doctorat, Université et École centrale de Nantes, 272 pages.
- MOLIARD J.-M. (1993), *Logiciel Picture : Outil de traitement d'images appliqué aux essais en centrifugeuse*, Rapport interne LCPC, 54 pages.
- MOST J.-M., CHEN J., TORÉRO J., SZTAL B., BAILLARGEAT J., DUROX D., YUAN T., BAILLOT F. (1994), *Influence des forces de flottabilité sur les flammes*, Séminaire Macrogravité 92/93, Nantes, pp. 1-16.
- PORION P. (1994), *Frottement solide et avalanches dans les matériaux granulaires*, Thèse de doctorat, Université de Lille, 218 pages.
- RANAIVOSON D. (1990), *Dosage des granulats : Étude des phénomènes d'écoulement et de voûte. Application à la conception des trémies doseuses*, Thèse de doctorat, Université et École centrale de Nantes, 231 pages.
- SIEFFERT J.-G., LEVACHER D. (1995), *Étude de l'effet d'échelle de pieux battus en cours de centrifugation*, *Revue française de Géotechnique*, 70, pp. 55-68.
- SKIKER A., CHAMBON P., GARNIER J., KÖNIG D. (1993), *Displacements in the soil near a tunnel face using centrifuge tests and image processing*, Conference Digital Image Processing : Techniques and Applications in Civil Engineering, Hawai, 8 pages.
- TERNET O. (1999), *Reconstitution et caractérisation des massifs de sable. Applications aux essais en centrifugeuse et en chambre de calibration*, Thèse de doctorat, Université de Caen, à paraître.
- YOUSSEF E. (1994), *Étude théorique et expérimentale du flambement des pieux*, Thèse de doctorat ENPC, 255 pages.

ABSTRACT

Geotechnical studies using centrifuge models Developments in equipment and experimental techniques

J. GARNIER, F. DERKX, L.-M. COTTINEAU, G. RAULT

Physical models for geotechnical purposes have become much more frequently used because of improved facilities which better satisfy conditions of similarity (centrifuges and calibration chambers). In the last fifteen years, the LCPC has played a part in this development by commissioning a large geotechnical centrifuge and developing test equipment and methods.

This paper describes in a single document the main equipment which is required to produce and characterize soil samples and perform actions on the model during centrifuging. Data on the performance of apparatus and examples of use are given. The last part of the paper describes a new centrifuge accessory. This is a remote-controlled robot, fixed to the test container, which operates at an acceleration of 100 times the force of gravity and is equipped with a tool changer. With this device it is possible to conduct a succession of operations without stopping the centrifuge. The first applications of this device are described.