

Modèles physiques en géotechnique

I - Évolution des techniques expérimentales et des domaines d'application⁽¹⁾

J. GARNIER

LCPC

Route de Bouaye, BP 4129
44341 Bouguenais Cedex

Résumé

L'expansion rapide de la modélisation en centrifugeuse, depuis le début des années 80, s'explique d'abord par les progrès technologiques dont a bénéficié la méthode dans les domaines de l'informatique, de l'électronique et de la mécanique. De nombreux outils ont été développés pour réaliser les interventions sur le modèle en cours de centrifugation. Les appareils mono-fonction permettent par exemple de pratiquer des essais géotechniques *in situ*, d'exercer des sollicitations statiques, cycliques, dynamiques voire sismiques, de construire des remblais, de terrasser des excavations ou des tunnels, de battre des pieux isolés ou en groupe, d'exécuter des colonnes ballastées ou de faire du compactage dynamique. Avec le robot récemment mis en service sur la centrifugeuse du Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), il est possible d'enchaîner des opérations différentes, sans arrêt de la machine, grâce aux outils interchangeables qu'il peut mettre en œuvre.

Les techniques de préparation et de caractérisation des massifs de sol sont par ailleurs bien maîtrisées du moins pour les sols secs et saturés. Elles permettent de disposer de façon très répétitive de massifs homogènes dont les propriétés peuvent être choisies à l'avance. Les caractéristiques rhéologiques des sols soumis à macrogravité et les états de contraintes qui y règnent ont été largement étudiés. De nouvelles données sont aussi disponibles sur les propriétés d'une couche non saturée centrifugée, sur l'ascension capillaire, sur les distributions de teneur en eau et de succion.

De nombreuses expériences sur modèles réduits ont été conduites ces dernières années dans deux domaines d'application émergents : étude de l'effet de séismes sur les sols et sur les interactions sols-structures et étude de la migration de polluants dans les sols.

Compte tenu des énormes marges de progrès technologique et scientifique qui existent, il est extrêmement difficile d'imaginer ce que seront les modèles réduits géotechniques dans une ou deux décades et quelle sera leur place dans les études et recherches en géotechnique.

Mots-clés : modèle physique, modèle réduit, centrifugeuse géotechnique, macrogravité.

Physical models in geotechnics

I - Evolution of the experimental techniques and of the domains of application

Abstract

The rapid expansion of centrifuge modelling since the beginning of the 1980's can be explained by technological developments in computing, electronics and mechanics. Many tools have been developed to conduct operations on the model in flight. Single-function devices enable, for example, carrying out *in situ* tests, applying static, cyclic or dynamic loads,

⁽¹⁾ Cet article reproduit la première partie de la biennale Coulomb prononcée par l'auteur dans le cadre de la Conférence Caquot (Paris, CNIT La Défense, 3 octobre 2001).

building embankments, simulating excavations, boring tunnels, driving piles and pile groups, making sand compaction piles, and simulating dynamic compaction. More recently, with the onboard robot that has been placed into operation at the LCPC research facility, it becomes possible to perform several different operations on the model without stopping the centrifuge.

Soil sample preparation and characterisation techniques are now well-controlled, at least for saturated or dry soils, and allow producing very homogeneous and repetitive samples. The physical and mechanical properties and the actual state of stresses in the sample during centrifugation have been investigated in depth. A new set of results are now also available on the characteristics of a centrifuged unsaturated soil, with respect to capillary rise as well as water content and suction distribution.

Much work has also been accomplished these past few years in developing two domains of application for centrifuge modelling: earthquake simulation and transport of pollutants in soils. In light of the tremendous room for progress in improving centrifuge technology and in extending its fields of application, it is difficult to imagine what geotechnical centrifuge modelling will become in a decade or two and what will be then its contribution to research and study in the field of geotechnical engineering.

Key words : physical model, similitude, scaling laws, scale effect, geotechnical centrifuge, foundation.

1

Introduction

Lors des dernières décennies, les moyens d'études et de recherche du domaine géotechnique ont tous connu des évolutions considérables, qu'il s'agisse des essais en place et en laboratoire, des modèles rhéologiques et numériques ou des modèles physiques. La modélisation physique en géotechnique est aujourd'hui une méthode reconnue mais, pour des raisons de similitude, elle nécessite des installations assez lourdes comme les chambres d'étalonnage ou plus souvent encore les centrifugeuses. Les progrès et le développement considérables de cette méthode expérimentale durant ces quinze dernières années peuvent s'expliquer par deux raisons principales :

- elle a largement bénéficié des évolutions technologiques dans les domaines de l'électronique et de la mesure, de l'informatique, de la mécanique, de la vidéo et du traitement numérique d'images ;
- ses domaines de validité et ses limites sont mieux connus du fait des travaux récents sur les conditions de similitude.

L'extension constante des domaines abordés par les modèles physiques peut être constatée en examinant le contenu des publications scientifiques et en particulier les actes des congrès internationaux organisés périodiquement depuis 1988 (Centrifuge 88 à Paris, Centrifuge 91 à Boulder, Centrifuge 94 à Singapour et Centrifuge 98 à Tokyo). Ces manifestations dont la prochaine édi-

tion se tiendra en 2002 à St John's (Canada) sont placées sous l'égide du Comité technique international TC2 (Centrifuge and Physical Model Testing) de la Société internationale de mécanique des sols et de la géotechnique.

Quelques articles et ouvrages de synthèse sont aussi disponibles (Schofield, 1980 ; Craig *et al.*, 1988 ; Taylor, 1995) mais les techniques d'essai ne cessent d'évoluer, de nouveaux champs d'application sont abordés et de nouvelles données sont désormais disponibles sur la validation de la méthode.

2

Rappel des principes et de l'histoire de la modélisation physique en géotechnique

2.1

Similitude en mécanique

Les essais sur modèles réduits d'ouvrages géotechniques sont une pratique très ancienne et les plus grands auteurs y ont eu recours dans le passé, sans que ne soient alors évoquées les questions de similitude ni la représentativité des modèles. Taylor dès 1948, puis surtout De Beer avaient pourtant détecté de premiers effets de taille sur la portance des fondations superficielles sans que des conclusions n'en soient clairement tirées sur l'usage des modèles réduits (De Beer, 1965). Ces effets se traduisent par une différence de réponse entre le modèle réduit et l'ouvrage en vraie grandeur (appelé aussi prototype) lorsque les résultats sont traduits en valeurs adimensionnelles.

Jusqu'à un passé assez récent, la similitude géométrique (simple réduction de taille) était en effet implicitement supposée être une condition suffisante pour garantir la similitude de comportement. On sait pourtant depuis longtemps que la seule similitude géométrique est le plus souvent un obstacle à la similitude mécanique. Dès 1638, Galilée avait fait ce constat en s'interrogeant sur la résistance des os de deux animaux de tailles différentes (Szucs, 1980). Il avait conclu de cette réflexion que la substance constituant les os du plus grand animal devait nécessairement être d'une nature différente de ceux du plus petit pour garantir la même sécurité et donc le même comportement mécanique.

L'étude théorique des conditions de la similitude mécanique n'a été examinée qu'au début du XX^e siècle et a conduit aux théorèmes bien connus de Vashy (1892) appelé aussi théorème de Buckingham (1914) dans les pays anglo-saxons ou encore théorème des π dans les pays de l'Europe de l'Est. La similitude de comportement entre le modèle et l'ouvrage en vraie grandeur implique qu'il existe des rapports constants appelés *facteurs d'échelle* X^* ($X^* = X_m/X_p$) entre les variables X_m représentant le système S_m (modèle réduit) et les variables X_p décrivant le système S_p (prototype). Les conditions de similitude s'exprimeront finalement comme des relations entre les facteurs d'échelle X^* ou, de façon tout à fait équivalente, par l'existence d'invariants (produits de puissance π indépendants et sans dimensions) qui doivent conserver les

mêmes valeurs, qu'ils soient évalués avec les variables modèles ou avec les variables prototypes.

Le théorème de Vashy est toutefois une condition nécessaire mais non suffisante pour déterminer les invariants (Langhaar, 1951) et Butterfield (1999) en imposant deux conditions supplémentaires à récemment proposé un algorithme qui fournit tous les invariants. Une formulation plus mathématique de l'analyse dimensionnelle a été également présentée par Saint-Guilhem (1971) conduisant à plusieurs théorèmes généralisant les résultats obtenus par Vashy.

Tous les systèmes physiques doivent évidemment satisfaire aux équations indéfinies de la mécanique et l'analyse dimensionnelle effectuée sur les variables intervenant dans ces relations conduit aux conditions de similitudes maintenant bien connues :

$$\sigma^* = \rho^* g^* l^* \quad \text{et} \quad \xi^* = g^* t^{*2} \quad (1)$$

reliant les facteurs d'échelle σ^* sur les contraintes, ρ^* sur les masses volumiques, g^* sur les composantes du champ de pesanteur, ρ^* sur les longueurs, ξ^* sur les déplacements et t^* sur le temps. Les deux relations (1) sont parfois réunies sous la forme :

$$\frac{\sigma^* t^{*2}}{\rho^* l^{*2}} = 1 \quad \text{ou encore} \quad \frac{F^* t^{*2}}{\rho^* l^{*4}} = 1 \quad (2) \text{ et } (3)$$

si on remarque que l'échelle des forces F^* est égale à $\sigma^* l^{*2}$. Cette dernière relation est souvent appelée condition de Newton. Dans le paragraphe qui suit, nous rappelons les conséquences de ces conditions de similitude dans le domaine géotechnique.

2.2

Application aux sols

En mécanique des sols, la prise de conscience de l'importance des conditions de similitude a été beaucoup plus laborieuse que dans d'autres disciplines. Les travaux les plus marquants dans ce domaine sont assez récents et sont dus à Rocha (1955), Langhaar (1951), Pokrowski et Fyodorov (1975a et b), et en France à Mandel (1962), Luong (1964) et Kerisel (1972).

La méthode expérimentale qui paraît la plus naturelle et la plus immédiate consiste à réaliser des essais

sur des modèles de laboratoire dont toutes les dimensions sont réduites par rapport au prototype dans le même rapport $1/n$. Elle n'est pas, hélas, sans poser de graves problèmes de similitude puisque toutes les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le modèle (déformabilité, viscosité et fluage, critère de plasticité) doivent alors être réduites dans ce même rapport $1/n$ comme l'a montré Mandel (1962) et comme l'avait pressenti Galilée (cf. § 2.1 ci-dessus).

Il est évidemment impossible de satisfaire ces conditions dans le cas des sols même si des tentatives assez poussées ont été faites dans ce sens. D'importantes études ont en effet été conduites en Union Soviétique pour mettre au point des matériaux équivalents et réaliser ainsi des expériences sur modèles réduits dans le domaine de la mécanique des roches et du génie minier (Glushikhin *et al.*, 1993). La méthode baptisée EM (Equivalent Materials) a connu de nombreuses applications à l'Institut VNIMI (Institut de recherche scientifique pour l'exploitation minière) mais ces travaux sont restés très isolés.

D'innombrables essais ont donc été effectués pendant des décennies sur des modèles réduits de laboratoire, sans soucis ni respect des conditions de similitude. Nous avons montré que le comportement de ces modèles pouvait être très différent de celui des ouvrages en vraie grandeur y compris sur le plan qualitatif (Garnier, 1995 et 1997). Les biais introduits peuvent conduire à des divergences radicales, par exemple sur les mécanismes de rupture eux-mêmes, comme l'illustrent les exemples de la figure 1.

Le comportement des sols et des matériaux granulaires est éminemment fonction de l'histoire et du niveau des contraintes auxquelles ils sont soumis. Il est donc essentiel de reproduire sur le modèle réduit les mêmes états de contraintes que ceux qui règnent dans l'ouvrage en vraie grandeur ce qui conduit à imposer la condition supplémentaire suivante :

$$\sigma^* = 1 \quad (4)$$

Une première méthode de modélisation physique repose sur le respect de cette seule condition (4). Il s'agit des chambres d'étalonnage qui sont de grandes cellules triaxiales utilisables s'il est possible d'admettre un état de contraintes homogène dans le massif de sol et si le phénomène étudié n'est pas affecté par l'absence de surface libre.

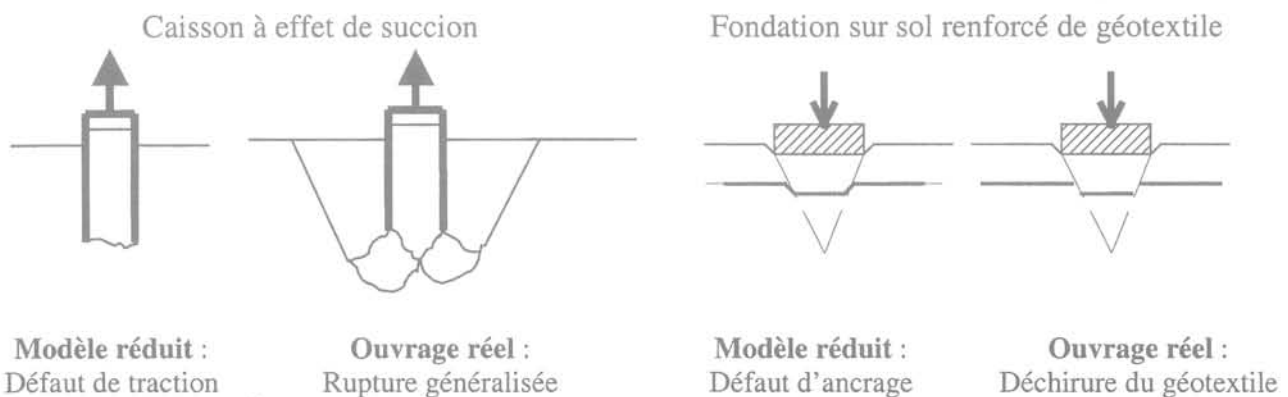


FIG. 1 Mécanismes de rupture observés lors d'essais d'ancrages à effet de succion et lors du chargement de fondations sur sol renforcé de géotextile.
Failure mechanisms observed during loading tests on suction caisson and on footings lying on reinforced soil with a geotextile.

Lorsque le gradient de contraintes avec la profondeur ne peut plus être négligé ou lorsque la surface libre intervient, les chambres d'étalonnage ne sont plus adaptées et d'autres techniques doivent être recherchées. Les conditions (1) et (4) peuvent être satisfaites simultanément si le modèle réduit à l'échelle $1/n$ est testé sous une accélération n fois supérieure à la pesanteur et nous avons recensé les diverses solutions imaginées et testées par différents auteurs (Garnier, 1995) :

- caisse à choc ;
- masses suspendues ou câbles tendus ;
- table à frottement ;
- gradient hydraulique ;
- centrifugeuse.

En fait, la centrifugation des modèles réduits s'est aujourd'hui très largement imposée en raison des avantages qu'elle présente et des progrès technologiques récents qui ont décuplé ses domaines d'application.

2.3

Bref rappel de l'histoire et du développement des essais en macrogravité

L'histoire de la modélisation en centrifugeuse des origines jusqu'au début des années 70 a été retracée par Craig (1974) et Pilot (1975). L'ouvrage édité par Craig *et al.* (1988) complète et prolonge cet historique qui est résumé et actualisé dans les quelques lignes qui suivent. La première publication proposant d'avoir recours à la centrifugation pour réaliser des essais sur modèles réduits date en fait de 1869. Il s'agit d'un compte rendu à l'Académie des sciences dû à Phillips (Fig. 2a), professeur à l'École polytechnique, à l'École des mines et à l'École centrale et dont la biographie a été publiée par Craig (1989). Les premiers essais n'ont toutefois été réalisés qu'au début des années 30, simultanément aux USA (Bucky, 1931) et en URSS (Davidenkov, 1933 ; Pokrovskii, 1933) sur de petites machines assez rudimentaires.

En URSS, plusieurs dizaines de centrifugeuses beaucoup plus évoluées ont ensuite été mises en service entre 1930 et 1970 (Pol'shin, 1973). Le développement a été totalement différent hors du bloc soviétique puisque, après Bucky, il faut en effet attendre plus de trente ans avec les années 60 où Hoek (1961) en Afrique du Sud, Ramberg (1963) en Suède, Schofield en Angleterre (Avgherinos et Schofield, 1969) et encore Mikasa *et al.* (1969) au Japon redécouvrent l'intérêt des essais en macrogravité et construisent de nouvelles machines.

L'impulsion la plus déterminante est à mettre au crédit des universités de Manchester (Simon Laboratory et Institute of Science and Technology) et de Cambridge, où au début des années 70 plusieurs centrifugeuses spécialement conçues pour les essais en géotechnique ont été mises en service respectivement par les groupes de Rowe et de Schofield.

En France les premiers essais sur modèles dans le domaine géotechnique sont réalisés par le Laboratoire de mécanique des solides de l'École polytechnique dès 1973 (Habib, 1974 ; Mandel *et al.*, 1975 ; Zelikson et Bergues, 1979) puis par l'Institut français du pétrole (Le Tirant *et al.*, 1977) et par le LCPC (Pincet *et al.*, 1977 ; 1978). Tous ces essais ont été effectués sur la centrifugeuse du CEA-CESTA (Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine du Commissariat à l'énergie atomique) qui n'est cependant pas une installation dédiée à la modélisation physique en géotechnique (Fig. 3a). Une revue complète des premières études réalisées sur modèles centrifugés en France a été présentée par Corté (1988).

Le projet de construction en France d'une centrifugeuse spécialement conçue pour le domaine géotechnique a été initié au début des années 70, avec le soutien constant du CFMS (Comité français de mécanique des sols). La mise en service de l'installation sur le centre de Nantes du LCPC (Fig. 3b) est intervenue fin 1985 (Corté et Garnier, 1984 et 1986).

Le parc mondial actuel des centrifugeuses géotechniques compte un peu plus de soixante installations dont la moitié en Asie, une quinzaine en Europe et autant en Amérique du Nord. Le tableau I présente les machines de plus de 3 m de rayon. Comme on peut le



(a) Phillips



(b) Bucky



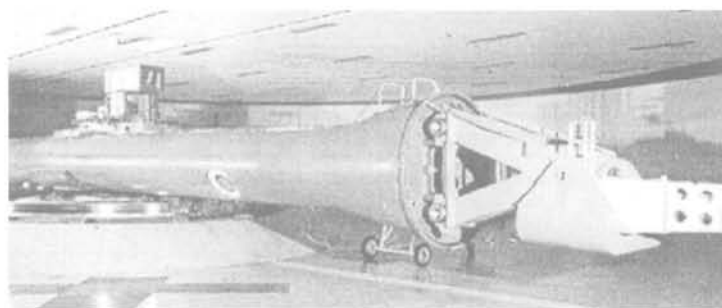
(c) Pokrovskii

FIG. 2 Photographies de Phillips, Bucky et Pokrovskii.
Phillips, Bucky and Pokrovskii.

constater, la société française Actidyn Systems (précédemment Acutronic France) qui a conçu la centrifugeuse du LCPC en 1985 est devenue leader mondial de ce domaine.

Les centrifugeuses les plus répandues sont des machines dont le rayon se situe entre 1,5 m et 5 m, qui peuvent embarquer des modèles de 0,5 à 2 tonnes et qui génèrent une accélération maximale entre 150 et 250 g.

Nous avons reproduit sur la figure 4 la progression de la capacité cumulée (en tonne x g) du parc mondial des centrifugeuses de plus de 3 m de rayon et sur la figure 5 le nombre cumulé de centrifugeuses japonaises, toutes tailles confondues (Kimura, 2000). Ces figures montrent que le parc est très récent puisque les installations ont été pour l'essentiel mises en service depuis 1985.



(a) Centrifugeuse du CEA-CESTA.



(b) Centrifugeuse géotechnique du LCPC.

FIG. 3 Centrifuges utilisées en France pour la modélisation physique en géotechnique.
Centrifuge facilities used in France for physical modelling in the field of geotechnics.

TABLEAU 1 Grandes centrifugeuses géotechniques (rayon supérieur à 3 m) actuellement en service dans le monde.
Large centrifuges (radius larger than 3 m) currently in service throughout the world.

Pays	Organisme	Année	Rayon (m)	Masse modèle (t)	Accélération max. (g)
France (Bordeaux)	CEA-CESTA*	1964	10	2	100
UK (Manchester)	Université	1971	3,2	2	200
UK (Cambridge)	Université	1974	4,8	1	160
Japon (Yokosuka)	PHRI	1980	3,8	2,7	115
Chine (Wuhan)	YRSRI	1983	6	0,5	400?
France (Nantes)	LCPC**	1985	5,5	2	200
Chine (Chengdu)	CHIDI	1985	5,4	2,2	100
RFA (Bochum)	Université	1987	4,1	2	250
Japon (Chuo)	Université	1988	3	1	150
Pays-Bas (Delft)	Delft Geotechn.	1989	6	3,5	300
USA (Boulder)	Université	1989	5,5	2	200
USA (New York)	RPI**	1989	3	1	200
Australie (Perth)	Université**	1990	3	1	200
USA (Davis)	Université	1990	9,2	3,6	70
Japon (Tokyo)	Kajima**	1990	3	1	200
Chine (Nanjing)	NHRI	1991	5	1,5	200
Chine (Beijing)	IWRI	1991	5	1,5	300
Japon (Kawasaki)	Niken Sekkei**	1992	3	2,2	200
Canada (St John's)	C-Core**	1993	5,5	1	200
Japon (Tokyo)	Takenaka**	1993	7	3	200
USA (Vicksburgh)	US Army Corps**	1994	6,5	3	300
Japon (Tsukuba)	PWRI	1997	6,6	5	150
Corée (Suwon)	Daewoo**	1997	3	1,2	200
Japon (Kawanaga)	Nishimatsu	1998	3,8	1,3	200
Chine (Hong-Kong)	HKUST	1998	4,5	2,6	150
Écosse (Dundee)	Université**	1999	3,5	0,8	130
Japon (Tokyo)	Obayashi Co.	2000	7	7	120
USA (San Diego)	Université**	2001	3,5	0,8	130
Brésil (Rio)	Université	Projet	3	1	200
Égypte (Mansoura)	Université**	Projet	3	1,2	130

* installation non spécifique au génie civil ; ** réalisation Acutronic-Actidyn Systems.

Les centrifugeuses à poutre équipées d'une nacelle pivotante sont de très loin les plus utilisées mais quelques centrifuges à tambour (Figs 6 et 7) sont également en service dans les universités de Cambridge, de Perth (Steward *et al.*, 1998), d'Hiroshima (Gurung *et al.*, 1998) et à ETH Zurich (Springman *et al.*, 2001). Les techniques et les outils spéciaux nécessaires à ces essais ont été très récemment décrits par Laue (2001).

Pour être complet, il convient de mentionner aussi la machine bi-poutre spécialement conçue par Mitchell

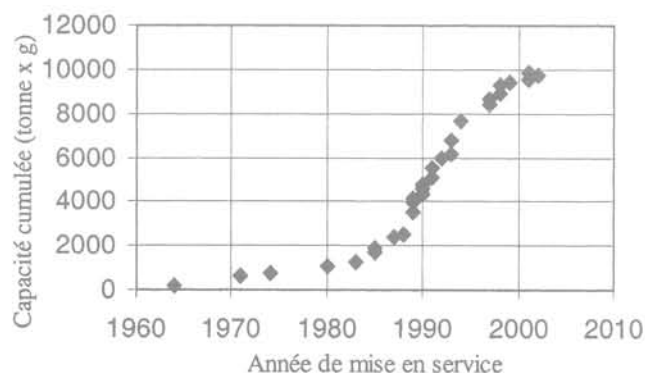


FIG. 4 Capacité cumulée du parc mondial des centrifugeuses géotechniques de plus de 3 m de rayon.
Total number of Japanese geotechnical centrifuges in operation (data from Kimura, 2000).



FIG. 5 Nombre cumulé de centrifugeuses mises en service au Japon d'après les données de Kimura (2000).
Cumulative capacity (in tonne x g) of the large centrifuges listed in Table I (radius larger than 3 m).

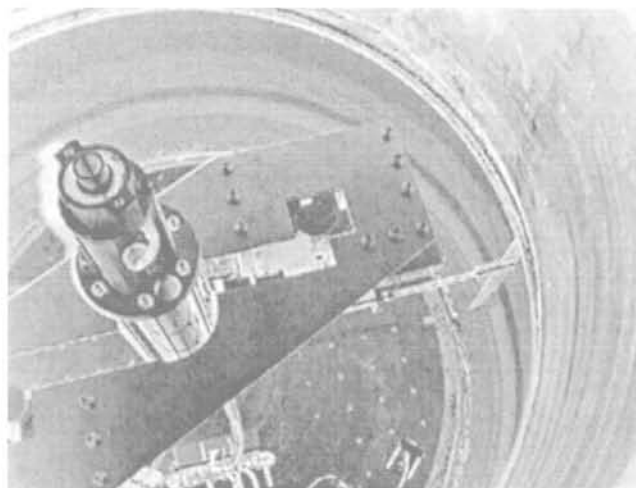


FIG. 6 Centrifugeuse tambour de ETH Zurich et outil de terrassement (Laue, 2001).
The ETH Zurich drum centrifuge.



FIG. 7 Centrifugeuse tambour de l'université de Perth.
The Perth University drum centrifuge.

- organisation de conférences internationales périodiques (cf. § 1) ;
- création sous l'égide du Comité technique TC2 d'une revue internationale IJPMG dont les premiers numéros sont parus en 2001 (*International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*) ;
- constitution d'une base de données regroupant les références des publications scientifiques portant sur la modélisation en centrifugeuse (Thorel *et al.*, 2000). Cette base CLEOPATRE dont l'élaboration a débuté au LCPC au début des années 80 sera prochainement accessible sur Internet (<http://necer.lcpc.fr/cleo>).

Dans ce bref rappel de l'évolution de la modélisation physique en géotechnique, il faut aussi souligner le soutien constant que la communauté des centrifugeuses européennes a reçu de la Commission Européenne avec le financement de trois programmes successifs, initiés et coordonnés par le LCPC :

pour réaliser des essais de longue durée sur le transfert de polluants dans les sols ou encore des essais de diffusion et de mesure de conductivité hydraulique (Theriault et Mitchell, 1996 ; Mitchell *et al.*, 2000).

Ce développement rapide du parc des centrifugeuses et donc de l'activité a conduit à plusieurs initiatives pour assurer la diffusion de l'information et les échanges :

- Stimulation (1986-1988) avec trois partenaires (*Centrifuge modelling of shallow footings*),
- Science (1992-1995) avec cinq partenaires (*Improvement of centrifuge modelling techniques*),
- Réseau NECER (1996-2001) avec onze partenaires (*Network of European Centrifuges for Environmental Geotechnics Research*).

3

Évolution des techniques expérimentales et des domaines d'application

Nous allons tenter de donner un aperçu des méthodes et de techniques récemment mises au point pour réaliser les principales phases d'une expérimentation sur modèles et en particulier les interventions en cours de rotation et la préparation et la caractérisation des massifs de sol nécessaires aux essais.

3.1

Interventions sur le modèle en cours de centrifugation

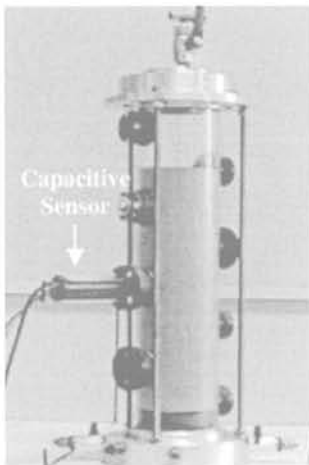
3.1.1

Mesures et observations

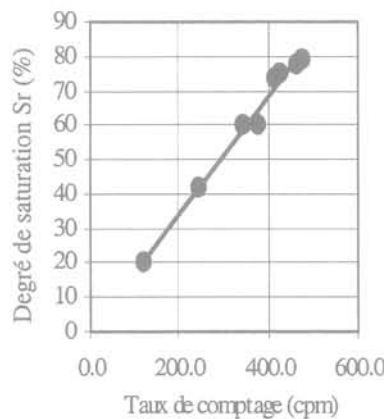
Toutes les grandeurs physiques couramment mesurées sur les ouvrages réels sont aussi accessibles

sur modèles centrifugés en utilisant des capteurs adaptés (déplacement, rotation, déformation, pression, force, accélération, température...). Par ailleurs, de nouvelles techniques de mesures et de nouveaux capteurs sont apparus récemment comme, par exemple :

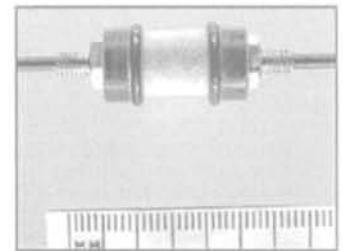
- mesure de déplacements sans contact par capteur laser (Itoh *et al.*, 1998 ; Dyson et Randolph, 1998 ; Hori-koshi *et al.*, 1998) ou ultrasons (Sassa et Sekiguchi, 1999). Ces capteurs sont parfois montés sur un axe mobile permettant de relever des profils complets (Nomoto *et al.*, 1999) ;
- mesure de vitesse de propagation par barres Hopkin-son (Bruno & Randolph, 1999) ;
- mesure de teneurs en eau en sol non saturé à l'aide de sondes TDR (*Time Domain Reflectometry*) par Crançon *et al.* (2000) ou sondes capacitives haute fréquence (Dupas *et al.*, 2000) ;
- suivi de la migration de polluants par différentes techniques développées en particulier par le réseau européen NECER (Fig. 8) : capteurs photométriques à fibre optique, capteurs résistifs, capteurs à électrode de potentiel, traceurs radioactifs, tomographie de résistivité, traitement numérique d'images (Garnier *et al.*, 2000b) ;
- méthodes de traitement d'image pour le suivi en 2 dimensions ou en 3 dimensions (en associant plusieurs caméras) des déplacements de sols, de structures, de fluides (Fig. 9). Pour les essais dynamiques, les moyens les plus récents permettent des cadences d'acquisition atteignant 2 000 images par secondes (Okamura *et al.*, 2001).



(a) Capteur capacitif haute fréquence sur colonne d'essai.
High-frequency capacity probes on a centrifuge column test (Dupas *et al.*, 2000).



(b) Étalonnage de la mesure de teneur en eau par traceurs radioactifs.
Measurement of water content by radiotracers (Günzel *et al.*, 2000).



Capteur Mark 4 de Cambridge.
Sensor Mark 4 of Cambridge.



Capteur du LNEC.
Sensor of the LNEC.

(c) Capteurs à fibre optique.
Fibre-optic photometric sensor (Lynch *et al.*, 2000).

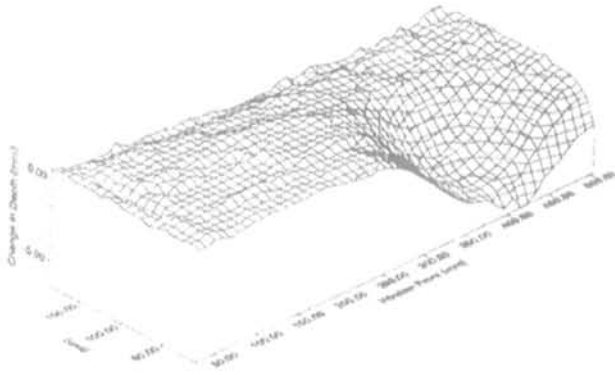
FIG. 8

Techniques et capteurs spéciaux développés par le réseau européen NECER.

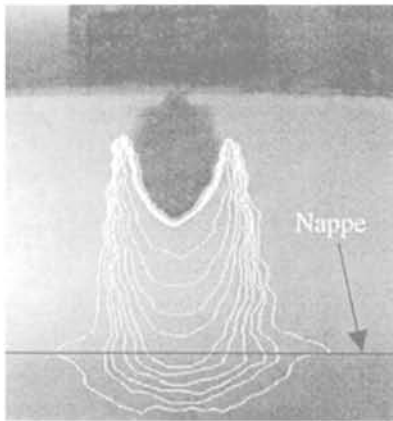
Special techniques and sensors developed by the European network NECER for geoenvironmental centrifuge testing.

Opérations réalisées en cours de rotation

Le chargement des structures et la caractérisation des massifs de sol doivent évidemment être effectués en cours de centrifugation, lorsque l'accélération d'essai



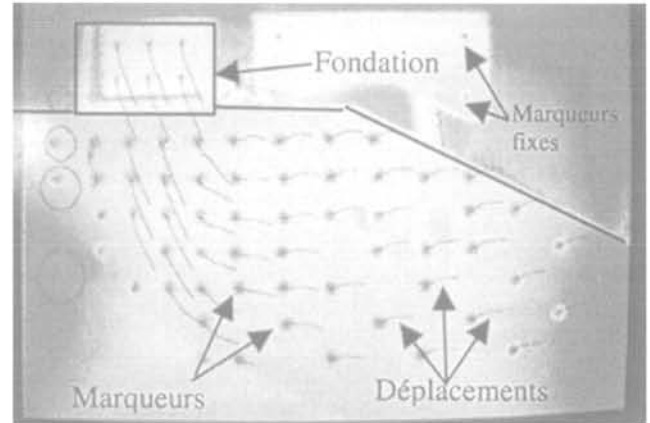
(a) Tassement de la surface du sol dû à l'effondrement du front d'un tunnel.
Soil settlement due to the failure of the front face of a shallow tunnel (Taylor *et al.*, 1998).



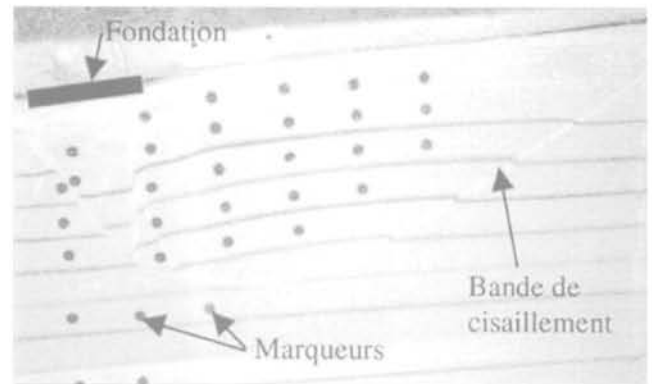
(b) Suivi d'un panache de polluant atteignant la nappe.
Determination of the contour of a pollutant plume reaching the water table (Allersma et Esposito, 2000).

et Watson et Randolph (1998) ont par ailleurs proposé de nouveaux essais en place pour la mesure de la cohésion non drainée des argiles (*T-bar* et *Torsional plate load tests*).

Pour compléter la connaissance des caractéristiques mécaniques des massifs centrifugés, nous avons



(c) Déplacements de points du sol sous une fondation filante en bord de talus.
Soil displacements below a strip footing close to a slope (Garnier *et al.*, 1999b).



(d) Mécanisme de rupture sous une fondation filante sur sol horizontal.
Failure mechanisms and shear bands below a strip footing on flat ground (Garnier, 1999).

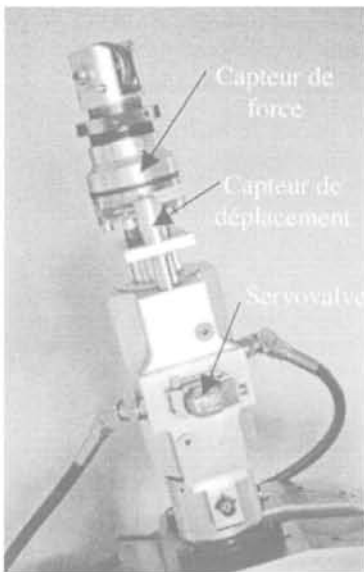
FIG. 9 Exemples de traitement numérique d'images.
Examples of digital image processing application in centrifuge tests.

est atteinte. Des équipements ont été développés au LCPC (Fig. 10) comme sur la plupart des centrifugeuses en activité et les interventions suivantes sont désormais une pratique très courante (Garnier *et al.*, 1999b) :

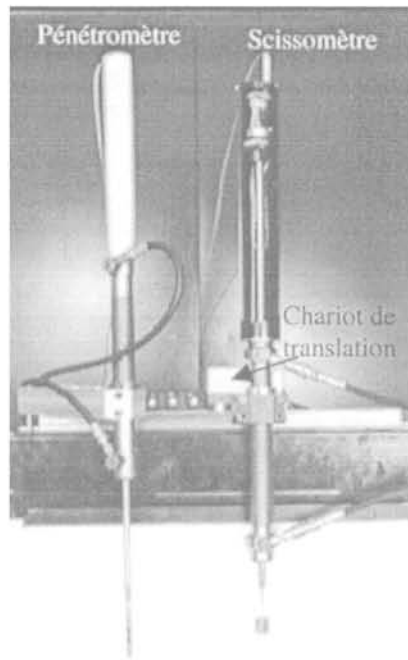
- chargement des ouvrages par des vérins pneumatiques, électriques et hydrauliques, asservis en force ou déplacement lorsque des chargements complexes sont souhaités (Fig. 10a) ;
- essais *in situ* (pénétrömètre statique et scissomètre) souvent installés sur des dispositifs permettant de les déplacer sans arrêt de la centrifugeuse (Fig. 10b). Des piezocones sont parfois utilisés (Esquivel et Ko, 1994)

par ailleurs entrepris la conception d'un minipressiomètre comprenant un contrôleur pression-volume et une sonde de 10 mm de diamètre (Fig. 11a). Un exemple de résultat d'essai effectué dans un massif de sable de Fontainebleau sous une accélération de 20 g est reproduit sur la figure 11b. Les caractéristiques pressiométriques (module E_m et pression limite p_l) ont été comparées aux résistances de pointe q_c du pénétromètre statique et les relations suivantes ont été obtenues :

$$q_c/p_l \sim 7 \text{ et } E_m/q_c \sim 0,9 \quad (5)$$



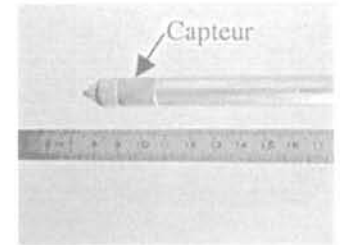
(a) Servo-vérin hydraulique conçu spécialement pour les essais en macrogravité.
Hydraulic servo-jacks specially designed for centrifuge tests.



(b) Pénétromètre et scissomètre mobiles.
Mobile CPT and vane devices.



(c) Pales du scissomètre.
Vane blades.



(d) Pointe pénétrométrique avec capteur intégré.
CPT tip and load cell.

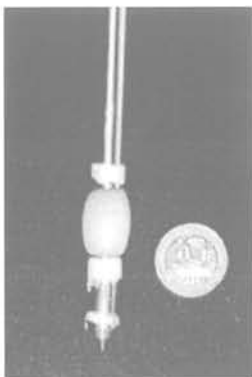
FIG. 10 Quelques dispositifs LCPC d'intervention sur le modèle en cours de rotation.
LCPC devices for in-flight operations.

Ces rapports sont assez proches des valeurs souvent observées dans les sables bien que la déformation de la cavité soit plutôt ici à tendance sphérique. L'élanement réduit de la sonde modèle est imposé par les forts gradients verticaux qui règnent dans les massifs centrifugés. Les travaux vont se poursuivre avec pour objectif final la conception d'un minipressiomètre qui pourrait être mis en œuvre par le robot présenté plus bas.

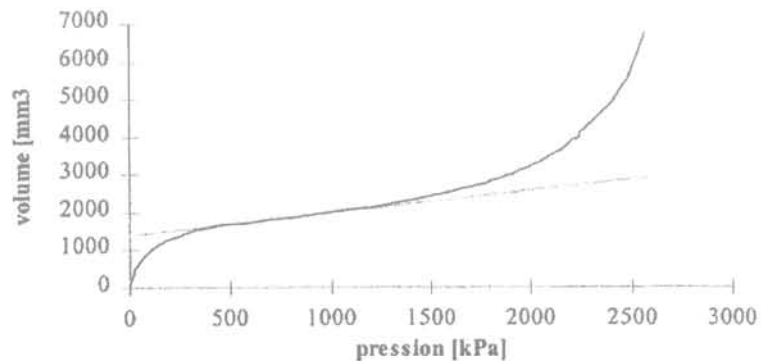
Pour d'autres interventions plus spécifiques, diverses techniques et de nombreux matériels monofonction ont été par ailleurs conçus permettant de largement diversifier les applications des modèles physiques. Les opérations suivantes sont assez répandues :

Battage et fonçage de pieux. La figure 12 présente le batteur hydraulique développé au LCPC et utilisé pour l'étude expérimentale des lois de similitude du battage (Sieffert et Levacher, 1995). Un batteur électromagnétique a aussi été mis au point dont une nouvelle version est utilisée actuellement dans l'étude de pieux sous choc latéral (Bonab, 2002). D'autres équipes ont conçu des matériels équivalents comme par exemple le CEA-CESTA (Zelikson *et al.*, 1994), l'université de Perth (Bruno et Randolph, 1999 ; de Nicolas et Randolph, 1999) et l'université Tsinghua de Pékin (Pan *et al.*, 1999).

Des dispositifs permettant de foncer des pieux isolés ou en groupe, verticaux ou inclinés, sont également utilisés dans les universités de Floride (Zhang *et al.*, 1999) et de Singapour (Leung *et al.*, 2001).

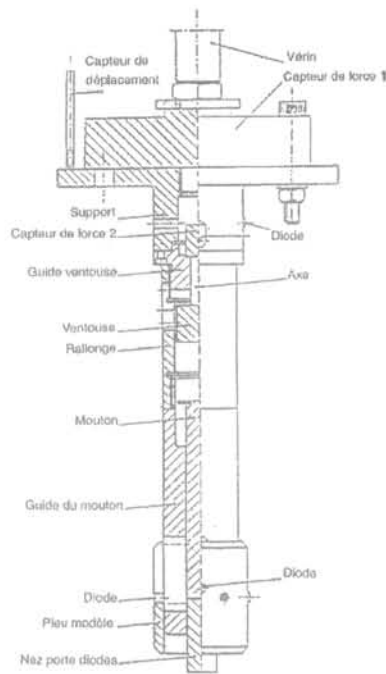


(a) Sonde dilatée.
Dilated probe.

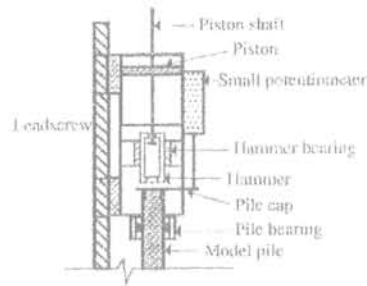


(b) Courbe pression-volume – Essai réalisé sous 20 g en sable dense.
Volume vs pressure curve – Pressuremeter test carried out in dense sand at 20 g.

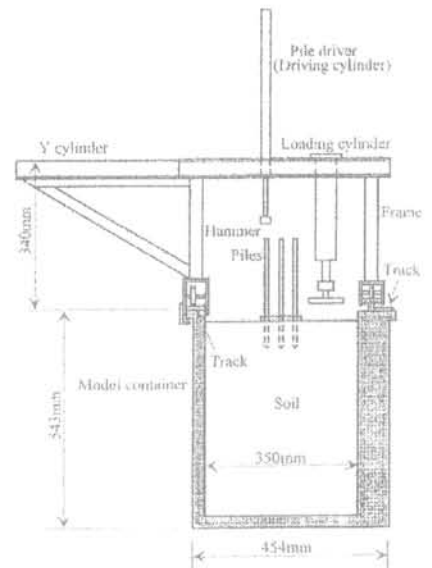
FIG. 11 Prototypé LCPC de minipressiomètre.
LCPC miniaturised pressuremeter.



(a) Bateau développé au LCPC.
LCPC hydraulic hammer
(Sieffert & Levacher, 1995).



(b) Bateau de l'université
de Western Australia.
Hammer developed
at Western Australia University
(de Nicola & Randolph, 1994).



(c) Bateau de l'université Tsinghua
de Pékin.
Hammer at Tsinghua University
(Pan *et al.*, 1999).

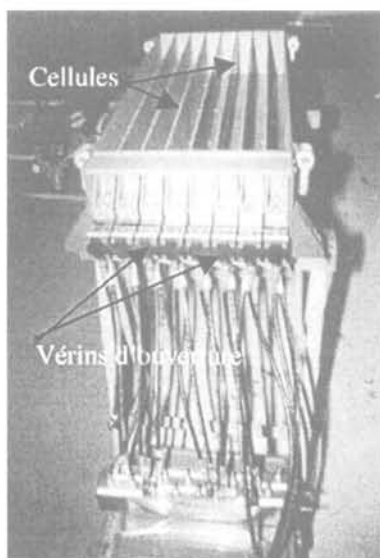
FIG. 12 Dispositifs de battage de pieux.
In-flight pile-driving systems.

Après mise en place du pieu ou du groupe, il est possible avec ces mêmes équipements d'enchaîner les opérations de chargement vertical ou horizontal des pieux sans arrêt de la centrifugeuse.

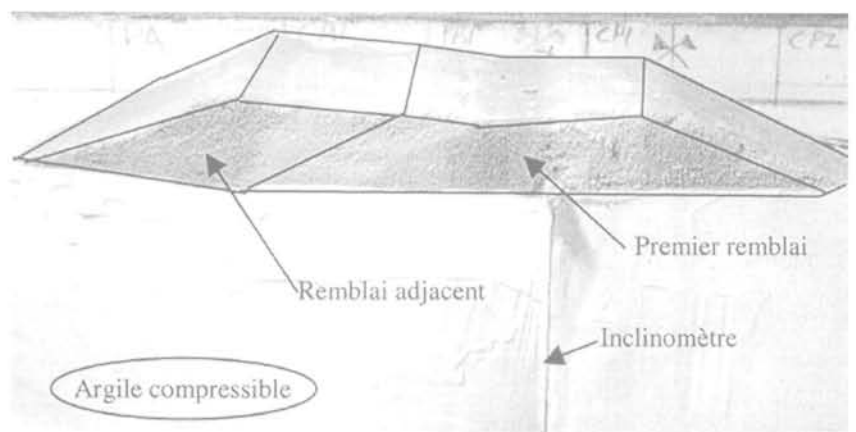
- Construction de remblais, simulation d'excavations. La méthode la plus courante pour construire un remblai consiste à installer une trémie au-dessus du modèle, dans laquelle est stocké le sable qui constituera le remblai. L'ouverture contrôlée des différentes cellules permet de construire un remblai de géométrie donnée, en plusieurs phases si nécessaire, reconnais-

sables sur la figure 13 aux couleurs différentes du sable utilisé (Akou *et al.*, 1998). Des matériels fondés sur le même principe sont utilisés dans de nombreux laboratoires (Allersma, 1994 ; Allard *et al.*, 1994 ; Khoo *et al.*, 1994 ; Thomas *et al.*, 1998 ; Rahman *et al.*, 2000, McVay *et al.*, 2000 ; Sharma et Bolton, 2001).

Ces dispositifs sont par exemple utilisés lors de l'étude du comportement de remblais et de digues sur sols compressibles renforcés ou non, de l'élargissement de remblais anciens, du frottement négatif sur les pieux.



(a) Vue de la trémie.
View of the hopper.



(b) Remblai construit en plusieurs phases en cours de centrifugation.
Embankment built in flight in several stages.

FIG. 13 Trémie LCPC de construction de remblais en cours de centrifugation.
LCPC hopper for in-flight construction of embankments (Akou *et al.*, 1998).

Le terrassement de fouilles et de déblais est le plus souvent simulé en évacuant un liquide contenu dans une membrane souple épousant la forme de la fouille. Un liquide de poids volumique voisin de celui du sol est utilisé ($ZnCl_2$). Cette technique simple ne simule toutefois pas exactement l'état de contraintes qui règne avant l'excavation puisque le fluide n'exerce que des contraintes normales.

Une autre solution a été imaginée par Allersma (1998) en éliminant le sol de la fouille par traction sur des nappes de géotextiles préalablement noyées dans le massif (Fig. 14a). Toutefois, la simulation la plus fidèle reste le terrassement réel du sol qui nécessite le développement d'un dispositif spécial (Fig. 14b). Le robot du LCPC présenté plus loin permet également cette opération de façon beaucoup plus évolutive.

• Autres appareils d'intervention monofonction (Fig. 15). Des techniques et des matériels plus exceptionnels ont été développés pour le creusement de tunnels comme par exemple les tunneliers miniatures de l'Institut de Technologie de Tokyo (Fig. 15a) et de l'Université de Bochum (Fig. 15b), pour la mise en place de colonnes ballastées (Ng *et al.*, 1998), pour la mise en tension de tirants d'ancrage d'une paroi (Takemura *et al.*, 1999) ou pour le compactage dynamique du sol (Takada et Oshima, 1994 ; Merrifield et Davies, 2000).

Des expériences sur modèles en macrogravité sont également conduites dans des domaines plus éloignés de la mécanique des sols :

- explosions souterraines et formation de cratères (Davies, 1994 ; Brownell *et al.*, 1994, Dutheil, 1998) ;
- érosion du sol marin sous l'effet des vagues avec mise en œuvre d'un batteur à houle (Sassa & Sekiguchi, 2000) ;
- portance d'une couche de glace et surcharges induites sur les ouvrages, avec fabrication de la glace en cours de rotation (Langhorne *et al.*, 1999).

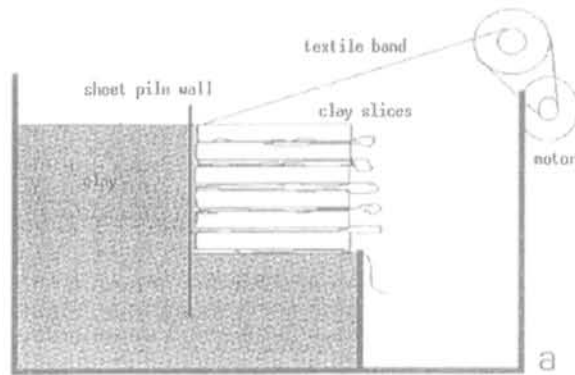
• Robots. Tous les dispositifs ci-dessus montrent l'étendue des domaines qui sont aujourd'hui accessibles à la modélisation physique mais des matériels spécifiques doivent être mis au point pour chaque nouvelle application. A la suite d'essais sur le comportement de parois de soutènement, nous avons signalé dès 1983 l'intérêt de développer un robot multifonction permettant d'enchaîner différentes opérations sur le modèle (Garnier, 1983).

Plusieurs années ont été nécessaires pour concevoir et réaliser ce robot 4 axes fonctionnant sous 100 g (Derckx *et al.*, 1998 ; Garnier *et al.*, 1999b). Il peut être piloté en mode manuel ou automatique et dispose d'un magasin pouvant contenir trois outils interchangeables (Fig. 16). Une interface standard équipe les différents outils et permet leur alimentation éventuelle en fluide (air, eau ou huile). Ces outils peuvent également être eux-mêmes munis de capteurs, les connexions étant automatiquement assurées lors de leur saisie par le robot.

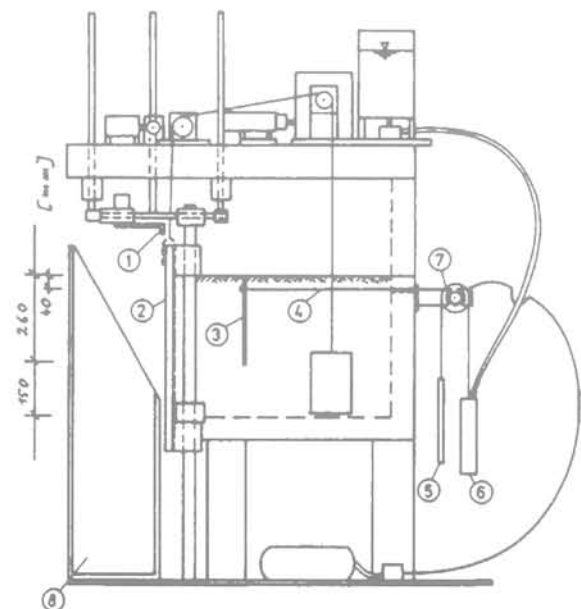
Ce téléopérateur a été mis en œuvre par exemple pour les opérations suivantes :

- pénétrations statiques lors de la cartographie des résistances de pointe dans des massifs de sable reconstitués par pluviation (Ternet, 1999) ;
- essais d'arrachement d'inclusions verticales ou horizontales pour l'étude des effets de taille dans les cisaillements d'interface (Le Collinet, 1998 ; Garnier & König, 1998) ;
- excavation de fouille et chargement de fondation pour des recherches sur le comportement des parois de soutènement et les interactions fondation-paroi (Bodin *et al.*, 2000, Gaudin *et al.*, 2002).

Ce robot est actuellement sans équivalent dans le monde mais plusieurs laboratoires s'équipent de dispositifs identiques (université HKUST de Hong Kong en 2001, RPI à New York et Université UC Davis en 2002).

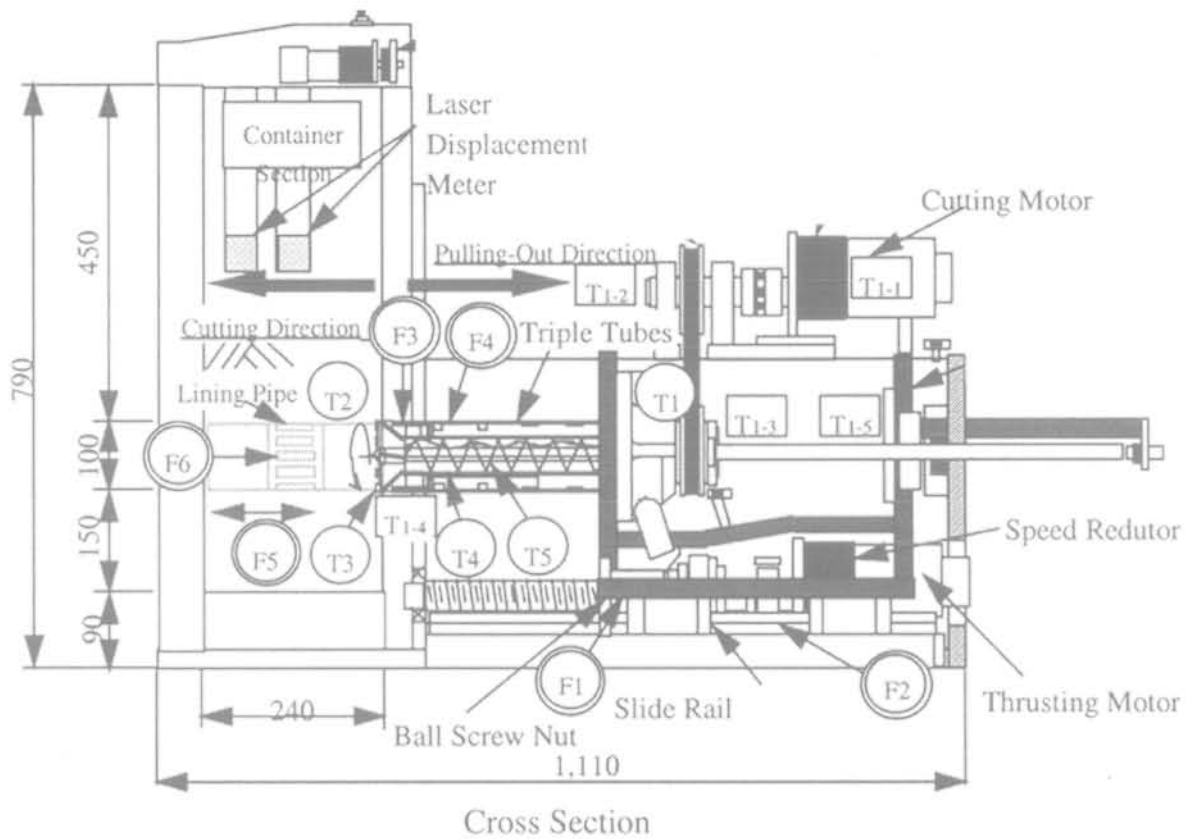


(a) Déroulement de nappes de géotextile noyées. Use of geotextile bands (Allersma, 1998).

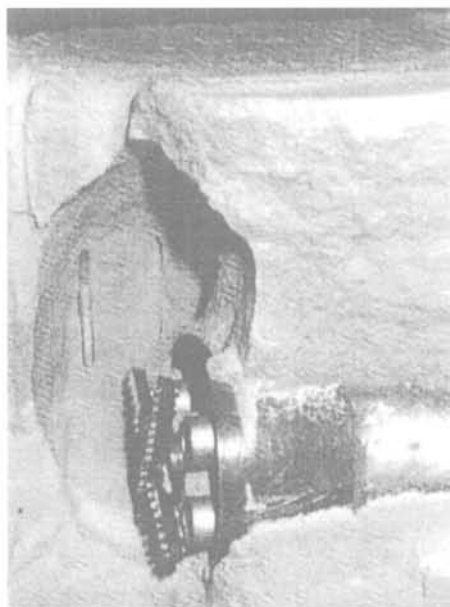


(b) Dispositif de terrassement de fouille et de mise en tension de tirants de l'université de Bochum. Special tool developed by RUB University (König, 2001).

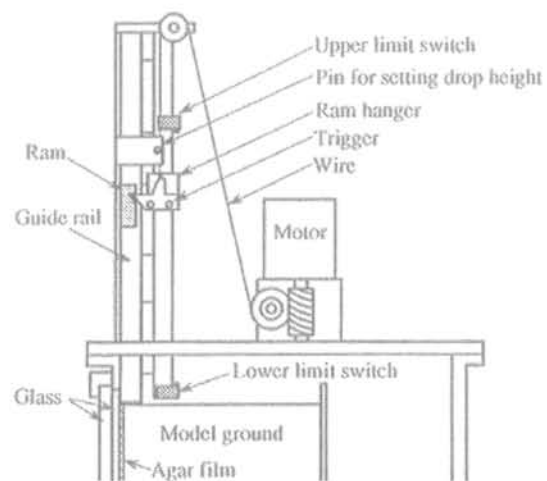
FIG. 14 Dispositifs permettant de simuler le terrassement d'une fouille. In-flight simulation of excavation.



(a) Tunnelier miniature Mark IV de l'Institut de Technologie de Tokyo.
Mark IV-shield tunnelling machine used at the Tokyo Institute of Technology (Nomoto *et al.*, 1999).



(b) Outil de forage de tunnel de l'université de Bochum.
Miniaturised tunnelling machine of RUB University (Laue, 2001).



(c) Compactage dynamique.
Dynamic compaction (Takada *et al.*, 1994).

FIG. 15 Exemples d'appareils spécialisés.
Examples of special single-function devices.

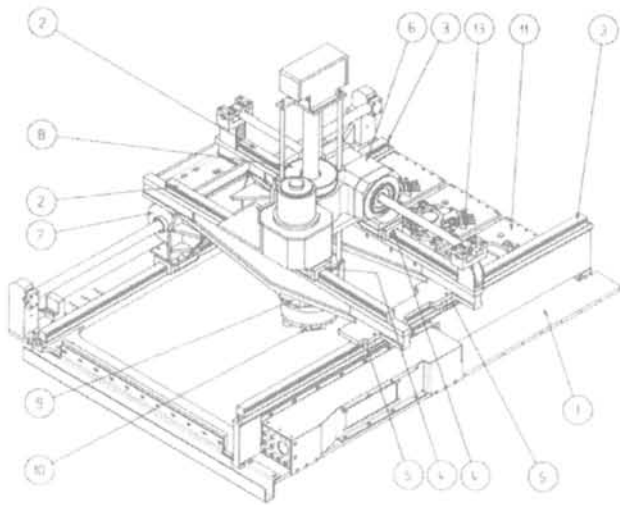


FIG. 16 Schéma et vue générale du téléopérateur du LCPC fonctionnant sous 100 g.
Views of the 100 g on-board LCPC robot.

3.2

Évolution des domaines d'application des modèles physiques

L'évolution constante et l'extension des champs d'utilisation des modèles centrifugés sont la conséquence logique d'un double phénomène :

- progrès technologiques dont nous avons tenté de donner un aperçu dans les paragraphes précédents ;
- évolution des besoins et des priorités de recherche en géotechnique (protection contre les risques naturels, effets des séismes sur les constructions, géotechnique de l'environnement).

Les interactions sols-structures (fondations, tunnels, soutènements) restent encore un champ d'application très important. Il continuera à se développer avec la mise en service de nouveaux moyens d'essais, dont les robots embarqués, qui ouvrent d'autres possibilités de simulation (§ 3.1). Mais d'autres applications que nous évoquerons brièvement ci-dessous connaissent aussi un essor indéniable.

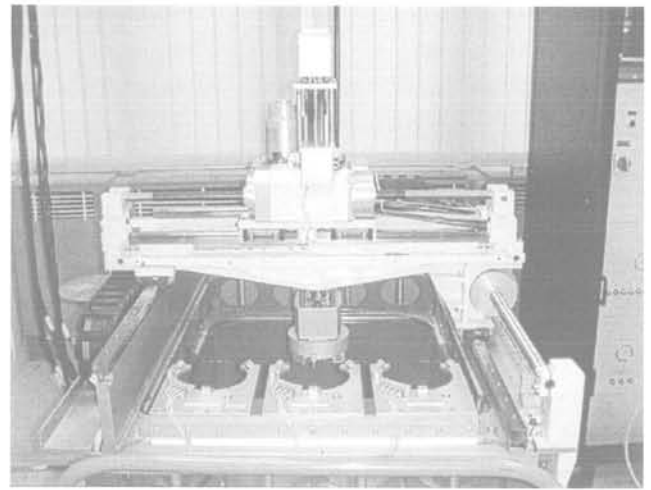
3.2.1

Simulation de séismes

L'étude sur modèle réduit de l'effet des séismes sur les ouvrages géotechniques et de la liquéfaction des sols s'est surtout développée aux USA et au Japon. Sur les 32 centrifugeuses recensées au Japon par Kimura (2000), dont plusieurs ont été mises en services suite au séisme de Kobé, 15 sont équipées de simulateurs de séisme. Le pourcentage de communications consacrées à la modélisation de séismes dans les conférences Centrifuge reflète aussi l'importance croissante de ce domaine. Il représentait près de 25 % des 150 articles présentés à la conférence de Tokyo en 1998 (Fig. 17).

En Europe, seule l'université de Cambridge et le CEA-CESTA ont réalisé ce type d'expériences, avec des moyens totalement originaux.

L'université de Cambridge a choisi des simulateurs mécaniques, d'abord la Bumpy Road dans les années 80 (Schofield, 1981 ; Kutter, 1982) puis plus récemment un volant inertiel (Madabushi *et al.*, 1998). La Bumpy



Road était une piste cannelée scellée sur le mur de la salle de centrifugation sur laquelle prenait appui une roue qui transmettait les vibrations au modèle. Le système à volant inertiel SAM (*Stored Angular Momentum*) consiste à stoker l'énergie dans une roue en rotation puis à utiliser cette énergie pour solliciter le modèle à l'aide d'un embrayage et d'un système de bielles (Fig. 18a). Les inconvénients des systèmes mécaniques sont leur manque de souplesse pour faire varier les sollicitations et les bruits qu'ils génèrent du fait des jeux mécaniques.

Le CEA-CESTA a d'abord utilisé des microcharges d'explosifs (Zelikson et Leguay, 1985) et s'oriente aujourd'hui vers un générateur de chocs pneumatique (Fig. 18b) protégé par un brevet (Sabourault *et al.*, 1999).

Toutefois, comme l'a montré une étude récente (Chazelas, 1999) les équipements de loin les plus répandus sur les centrifugeuses sont de petites tables vibrantes fonctionnant à l'aide de servo-vérins hydrauliques (Fig. 19). Quelques simulateurs 2 axes existent déjà (Fig. 19b) ou sont en projet (cf. ci-après).

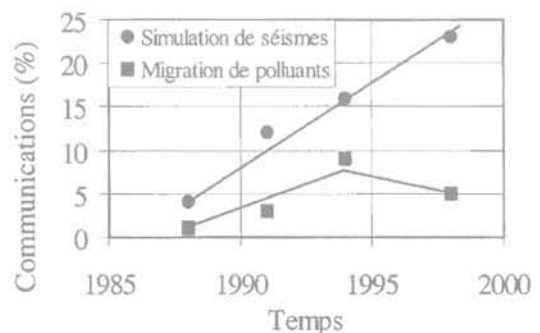
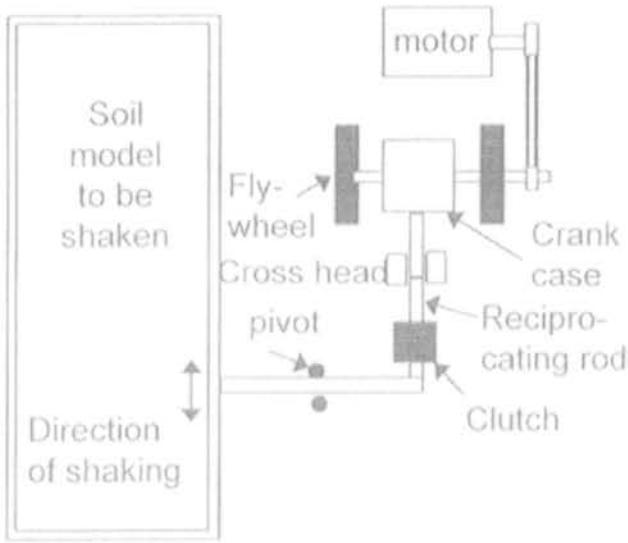
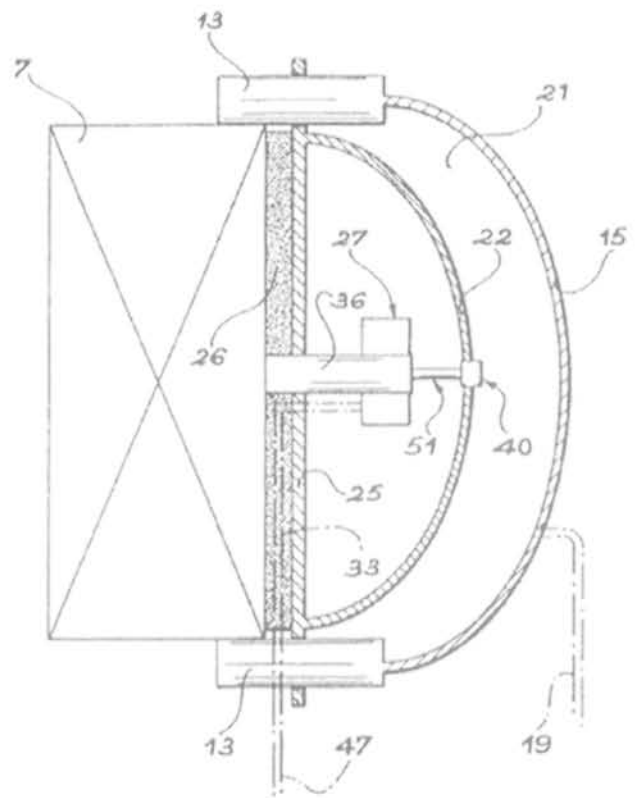


FIG. 17 Évolution du pourcentage des communications présentées dans les conférences Centrifuge dans les domaines de la simulation de séismes et de la migration de polluants dans le sol.

Evolution in the percentage of papers presented at the Centrifuge conferences in the fields of earthquake simulation and transport of pollutants in soils.



(a) Système à volant inertiel.
SAM actuator (Madabushi *et al.*, 1998).

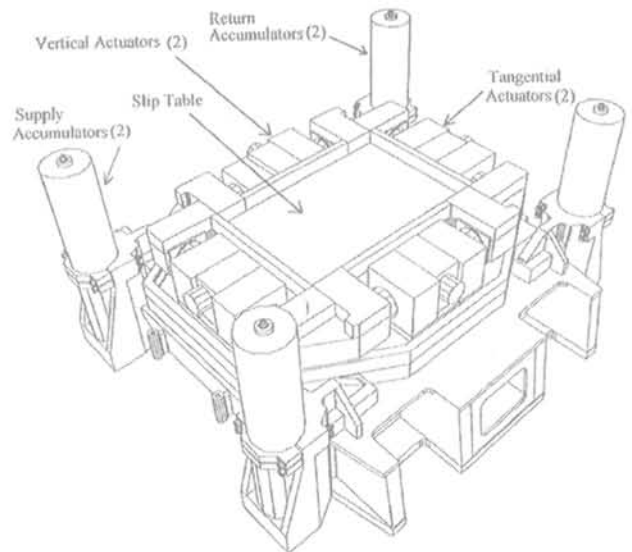


(b) Générateur de chocs pneumatiques du CEA-CESTA.
CEA-CESTA pneumatic shock actuator (INPI 2 777 682).

FIG. 18 Nouveaux simulateurs de séismes mécanique ou pneumatique.
New mechanical earthquake actuators.



(a) Simulateur mono-axial de l'université de Californie à Davis.
1-D shaker of UC Davis University installed on the swinging basket.



(b) Simulateur 2D de l'université de Hong Kong.
2-D shaker of the University of Hong Kong (Shen *et al.*, 1998).

FIG. 19 Exemples de simulateurs de séismes à servo-vérins hydrauliques.
Examples of 1-D and 2-D hydraulic shakers.

Ces tables vibrantes doivent posséder des caractéristiques très particulières pour les raisons suivantes :

- les fréquences des séismes modèles doivent être n fois supérieures à celles des séismes réels donc de plusieurs dizaines de Hz à 200 voire 300 Hz ;

- le poids du conteneur à entraîner est multiplié par n sous l'effet de l'accélération centrifuge ;
- la mise en vibration du conteneur et du modèle excite aussi la nacelle et les bras de la machine imposant des essais préalables pour ajuster le spectre d'entrée.

Un simulateur innovant est en cours de fabrication chez Actidyn Systems incluant un équilibrage dynamique, tant sur le plan mécanique que sur le plan asservissement-contrôle. Il devrait permettre de générer des excitations d'amplitude, direction et fréquence choisies à l'avance et pilotées. Son second avantage découlant de l'équilibrage dynamique est de réduire ou éliminer les sollicitations actuellement transmises à la machine.

Les simulateurs existants génèrent en effet des stimuli mal connus sur la machine qui peuvent traverser plusieurs fois les fréquences de résonance les plus basses du bras et de la nacelle. La solution souvent préconisée du bras rigide n'est pas adaptée car l'augmentation de masse ne peut résoudre un problème dynamique.

D'autres difficultés existent et ont fait l'objet d'intenses travaux par exemple sur la recherche d'un fluide de substitution et sur la conception de contenants spéciaux ou de traitements des parois pour réduire les effets de bords et la réflexion des ondes sismiques.

Si les matériaux du modèle (sol et fluide interstitiel) sont les mêmes que ceux du prototype, des conflits de similitude sur les échelles de temps apparaissent par exemple entre les phénomènes inertiels ($t^* = 1/n$) et les phénomènes de diffusion ($t^* = 1/n^2$). Ils imposent l'utilisation sur le modèle d'un fluide n fois plus visqueux que l'eau.

L'huile de silicone est le fluide le plus généralement retenu mais d'autres produits sont employés comme des solutions de cellulose (metolose) à l'université du Colorado à Boulder (Dewoolkar *et al.*, 1999a et b) ou un liquide spécialement mis au point par GeoDelft mais dont la composition n'a pas été dévoilée (Allard *et al.*, 1994).

L'autre solution parfois adoptée (Balakrishnan et Kutter, 1999) consiste à conserver l'eau comme fluide du modèle et à considérer que le prototype simulé possède une perméabilité n fois supérieure à celle du modèle. On exploite alors le concept du pseudo-prototype dont Butterfield (2000) a proposé une formulation plus générale.

Des progrès significatifs pour le développement de cette approche expérimentale ont été réalisés dans le cadre du programme nord-américain VELACS (VERification of Liquefaction Analysis using Centrifuge Studies) associant huit laboratoires pour plusieurs séries d'essais croisés de liquéfaction et des comparaisons avec des modèles numériques (Arulanandan *et al.*, 1994). La répétabilité des essais de liquéfaction en centrifugeuse n'est assurée que lorsque les simulateurs sont capables de reproduire le spectre correct des fréquences imposées. La préparation des massifs de sol joue également un rôle important.

Un autre pas sera franchi avec le nouveau programme nord-américain NEES (Network for Earthquake Engineering Simulation) lancé en octobre 2000 avec un budget total de 82 millions US\$. Il a pour objectif la création d'un réseau associant dans les mêmes projets les laboratoires spécialistes de modélisations numériques et de modélisation physique.

Plus de 7 millions US\$ permettront d'équiper les centrifugeuses de Davis (UC Davis) et New York (RPI). Sur celle de Davis, une table vibrante deux axes (horizontal et vertical) sera installée en même temps qu'un robot. Des traitements d'images en 3D sont prévus

ainsi que des techniques de tomographies sismique et électrique. Les données obtenues lors des essais de simulation de séisme en centrifugeuse seront transmises en temps réel sur le réseau NEES (Wilson, 2000). Un nouveau simulateur de séismes à 2 axes (horizontaux) et un robot seront aussi construits au RPI.

Des ouvrages très divers ont été testés en modèles centrifugés sous sollicitations sismiques (cf. compte rendu de l'atelier « Effet de séismes et problèmes dynamiques » de la conférence Centrifuge 98, Elgamal et Horikoshi, 2000). Comme on peut s'y attendre, les ouvrages les plus sensibles aux effets des séismes sont les plus étudiés (pentes et remblais, murs cloués, soutènements, culées de pont, pieux en zone liquéfiable) et les spectres observés lors du séisme de Kobé constituent désormais la référence des séismes simulés.

3.2.2

Migration de polluants et techniques de confinement et de dépollution

Les études sur le transport de polluants dans les sols constituent un autre domaine en extension (Fig. 17). A la différence du précédent, l'essentiel des travaux porte encore sur l'étude des conditions de similitude et sur la validation de l'approche expérimentale.

Comme déjà mentionné, un réseau européen NECER réunissant onze partenaires tous dotés de centrifugeuses géotechniques a été créé en 1996 avec un large soutien de la Commission européenne (4^e PCRD). Ses objectifs étaient précisément de développer des capteurs et des techniques expérimentales adaptées à ce domaine (§ 3.1.1) et d'examiner les lois de similitude (Garnier *et al.*, 2000b). Le problème est assez complexe puisqu'il traite de matériaux à trois voire quatre phases et quelques résultats sont présentés dans la partie II de cet article sur les conditions de similitudes en sol non saturé.

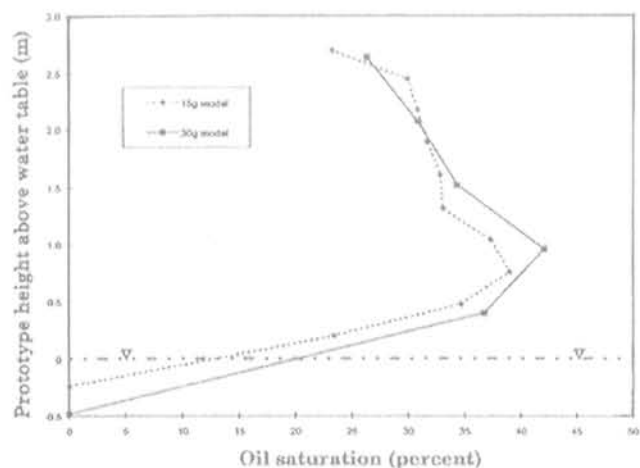
Un premier état de l'art sur ce sujet a été publié par Culligan-Hensley et Savvidou (1995) et de nombreux exemples peuvent être trouvés dans les actes du symposium *Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics* (Garnier *et al.*, 2000a). Les applications concernent avant tout les polluants miscibles ou non mais non réactifs. Les phénomènes accompagnés de réactions chimiques qui peuvent être prépondérantes pour certains polluants ne sont pas à ce jour étudiés sur modèles réduits centrifugés. En revanche, des expériences en macrogravité sont réalisées pour contribuer à l'étude des problèmes de cinétique. Nous avons par ailleurs mentionné la centrifugeuse bi-poutre spécialement conçue par Mitchell au Canada (Queen's University) pour des modélisations et des essais sur la migration de polluants dans les sols.

Dans ce domaine en effet, on distingue deux types d'expériences pratiquées en centrifugeuse (Mitchell *et al.*, 2000) :

- la modélisation physique (*centrifuge modelling*) consistant à réaliser des essais sur modèles réduits dans lesquels on tente de simuler à d'autres échelles les phénomènes existant sur un site ou dans un ouvrage en grandeur réelle ;
- les essais en macrogravité (*centrifuge testing*) sans référence à un prototype en grandeur réelle, dans lesquels des expériences sont reproduites sous différentes accélérations pour obtenir de nouvelles données sur

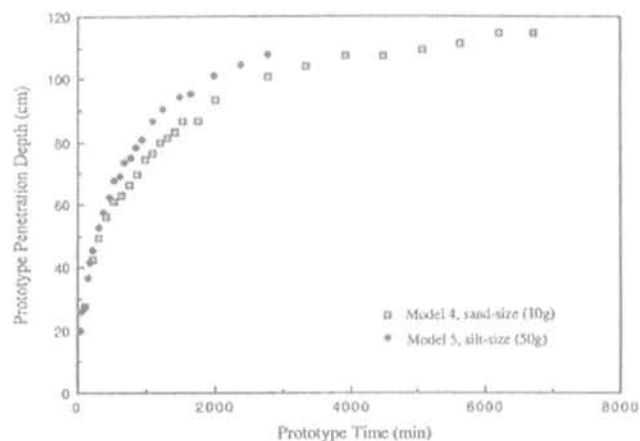
des phénomènes physiques. Cette seconde approche a aussi été utilisée sur la centrifugeuse du LCPC lors de recherches conduites par différentes équipes (universités, CNRS) et portant sur la croissance cristalline, la combustion, la mécanique des milieux granulaires (avalanches, écoulement en sablier périodique, intrusion de fluides).

En ce qui concerne la première voie (modélisation physique), des résultats intéressants pour la validation de la méthode ont déjà été obtenus sur des polluants non miscibles en sol saturé (DNAPL plus dense que l'eau) ou non saturé (LNAPL plus léger que l'eau). Dans les deux cas, les travaux récents de Knight *et al.* (2000) et de Pantazidou *et al.* (2000) sur des modèles à différentes échelles de réduction (modelling of models) ont montré que des similitudes satisfaisantes pouvaient être obtenues (Fig. 20).



(a) Concentrations en huile obtenues dans des modèles aux échelles 1/15 et 1/30 après 2 mois de migration du polluant.

Oil concentration obtained in 1/15 and 1/30-scale models after 2 months of pollutant migration (Knight *et al.*, 2000).



(b) Évolution de la profondeur de pénétration du polluant avec le temps pour deux modèles au 1/10 et 1/50.

Penetration depth of pollutant vs time for two models at 1/10 and 1/50 scale (Pantazidou *et al.*, 2000).

FIG. 20 Migration de polluants non miscibles lors d'essais sur modèles à différentes échelles de réduction.

Modelling of model tests of transport of non-miscible pollutants.

Dans une situation encore plus complexe, lorsque par exemple des instabilités produisent un phénomène de digitalisation, Griffioen et Barry (1999) ont également obtenu des résultats encourageants sur les conditions de similitude (Fig. 21).

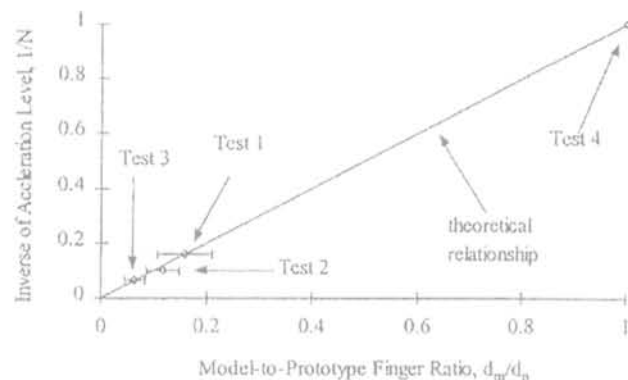


FIG. 21 Comparaison des facteurs d'échelle théoriques et expérimentaux sur la taille des digitalisations dans des écoulements instables.

Relationship between finger size and centrifuge acceleration during unstable flow (Griffioen & Barry, 1999).

3.3

Reconstitution et caractérisation des massifs de sol

Le problème de préparation des massifs de sol est crucial puisque la modélisation physique est surtout mise en œuvre pour réaliser des études paramétriques. Il faut impérativement pouvoir disposer d'un certain nombre de massifs de sol identiques dont les caractéristiques géotechniques sont prédéterminées. Il n'est donc pas étonnant que cette question ait fait l'objet d'importants travaux comme le programme européen Science (1992-1995) mentionné au § 2.3 ou le programme d'essais croisés, organisé en 1997-1998 au niveau international par le Comité technique TC2.

A ce jour, les types de sol pour lesquels les techniques sont relativement bien maîtrisées sont les massifs de sable, sec ou saturé, et les massifs argileux saturés. Les sols intermédiaires, mélanges d'argile et de sable le plus souvent non saturés (Kimura *et al.*, 1994) ou sables traités (Ismail *et al.*, 2000) font toujours l'objet de recherche et l'utilisation de ces types de sols reste encore très rare.

Tous les massifs de sols utilisés dans les modèles sont actuellement reconstitués. La solution consistant à utiliser des échantillons intacts a été envisagée et testée par plusieurs laboratoires (Garnier *et al.*, 1991 ; Gurung *et al.*, 1994). Elle est restée très peu pratiquée en raison des trop grandes hétérogénéités locales des massifs (à l'échelle des modèles) et de la difficulté de disposer de plusieurs massifs identiques.

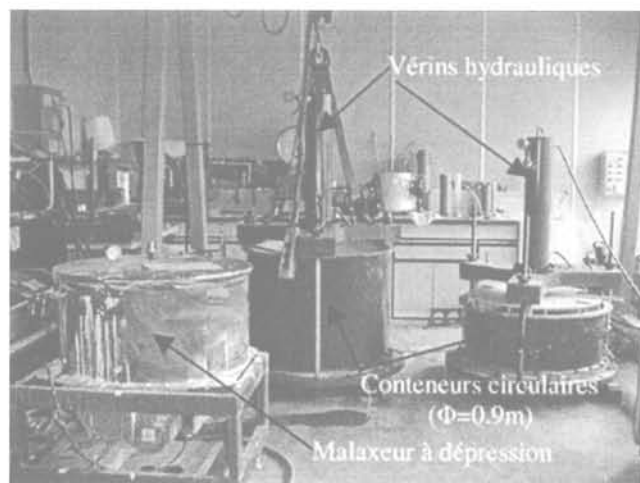
3.3.1

Argiles saturées

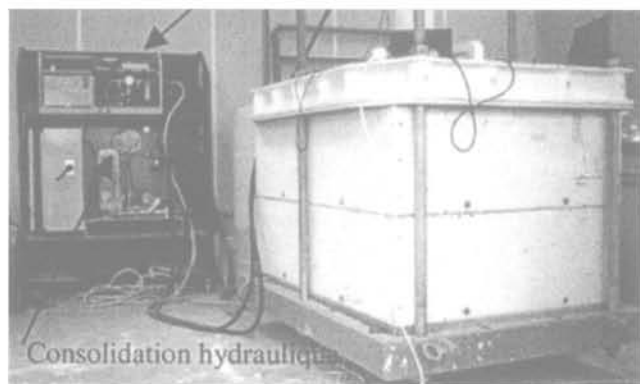
Le sol le plus utilisé du fait de sa relativement forte perméabilité réduisant les durées de consolidation reste le kaolin. Dans certains programmes de

recherche du LCPC, le matériau provenant du site de l'ouvrage à étudier a cependant été utilisé. Ainsi, plusieurs tonnes d'argile de Lysaker (près d'Oslo) et d'argile de Rion (250 km à l'ouest d'Athènes) ont été transportées au laboratoire pour des études évoquées dans la partie II de cet article.

La méthode courante consiste à malaxer l'argile avec de l'eau, sous dépression pour assurer une saturation totale du mélange, à des teneurs en eau voisines de $2w_L$. Ce matériau argileux est ensuite transvasé dans le conteneur d'essai à l'aide d'un tube plongeur et il est consolidé sous des pressions choisies en fonction des caractéristiques mécaniques souhaitées in fine (Fig. 22).



(a) Salle de malaxage et de consolidation.
Mixing and consolidation room.



(b) Conteneurs rectangulaires 1,4 m x 1 m).
Rectangular containers (1,4 m x 1 m).

FIG. 22 Matériels développés au LCPC pour la préparation des massifs argileux.
LCPC equipment developed for preparing the soil samples.

La consolidation est effectuée soit à l'aide de vérins hydrauliques, soit par la méthode du gradient hydraulique (Luong & Rivière, 1999 ; Rahman *et al.*, 2000), soit en associant les deux méthodes.

Des relations entre la cohésion non drainée c_u , le degré de surconsolidation OCR et la contrainte effective σ'_v ont été établies expérimentalement et sont utili-

sées dans ces opérations pour déterminer les programmes de consolidation des différentes couches :

$$c_u = 0,19\sigma'_v OCR^{0,59} \quad \text{Kaolin (Speswhite clay)} \quad (6)$$

$$c_u = 0,4\sigma'_v OCR^{0,57} \quad \text{Argile de Lysaker} \quad (7)$$

Les propriétés mécaniques des matériaux doivent bien entendu être mesurées sous accélération. Des matériels ont été développés pour ces mesures comme le scissomètre et le pénétromètre statique mobiles présentés au § 3.1.2. Pour ces matériels, des corrélations ont en outre été obtenues entre la cohésion non drainée c_u et la résistance de pointe q_c , toutes deux mesurées en cours de centrifugation (Fig. 23).

$$q_c = 18,5 c_u \quad (\text{Kaolinite}) \quad (8a)$$

$$q_c = 15 c_u \quad (\text{Argile de Lysaker}) \quad (8b)$$

$$q_c = 14,7 c_u \quad (\text{Argile de Rion}) \quad (8c)$$

Il est maintenant possible de reconstituer avec une précision correcte des massifs d'argile dont les profils de cohésion non drainée sont donnés *a priori*. La figure 24 montre à titre d'exemple la comparaison entre les spécifications imposées par le centre de recherche d'Exxon et les cohésions mesurées dans sept massifs successifs à la fin d'une consolidation de 24 heures sous 100 g (contrat d'étude sur les caissons à effet de suction).

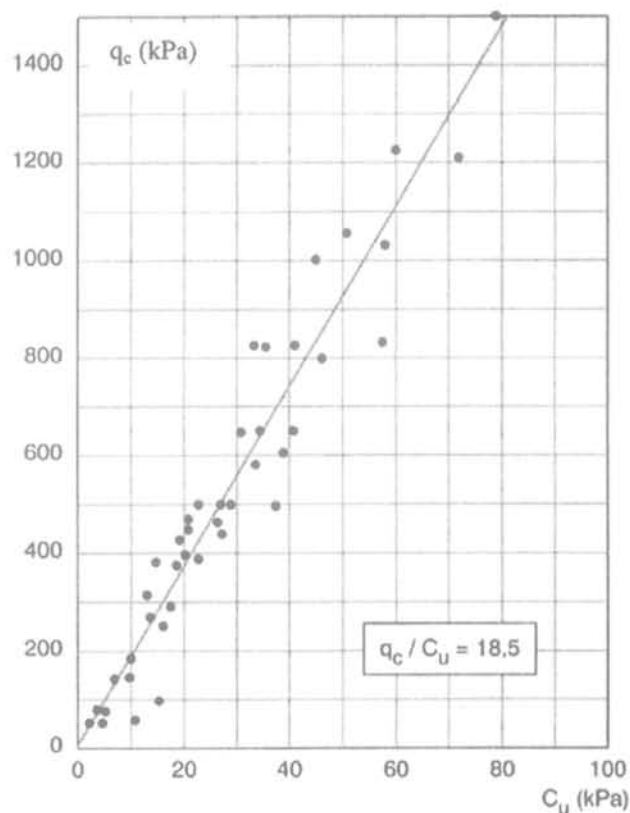


FIG. 23 Corrélation entre la résistance de pointe q_c et la cohésion non drainée c_u du kaolin.
Correlation between the tip resistance q_c and the undrained shear strength c_u of Speswhite clay.

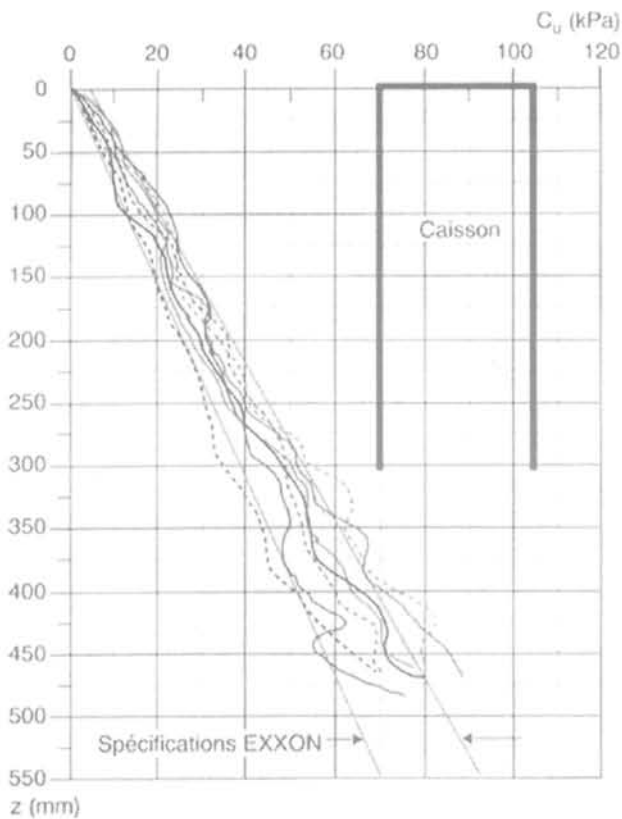


FIG. 94 Comparaison entre les spécifications et les profils de cohésion non drainée obtenus dans sept massifs successifs (essais sous 100 g).
Comparison between Exxon specifications and undrained shear strength profiles obtained in seven clay samples at 100 g.

3.3.2

Sables

Pour la reconstitution de sols sableux, les méthodes de pluviation (trémie suspendue, trémie mobile, trémie à diffuseurs) se sont largement imposées car, contrairement aux techniques de compactage, elles permettent d'atteindre des compacités élevées sans rupture des grains. Elles peuvent en outre être totalement automatisées, ce qui améliore beaucoup l'homogénéité et la répétitivité des massifs. L'intérêt de ces méthodes de pluviation pour reconstituer les éprouvettes de laboratoire nécessaires aux essais de cisaillement a aussi été largement démontré (Levacher *et al.*, 1994 ; Vaid *et al.*, 1999).

La trémie automatique du LCPC est utilisée presque quotidiennement pour reconstituer les massifs de sable, avec des résultats extrêmement satisfaisants. Une salle spéciale sous légère dépression est consacrée à cette opération et la compacité du dépôt est réglée à l'avance en agissant sur la hauteur de chute, la vitesse de translation horizontale de la trémie et sur la largeur de l'ouverture d'écoulement du sable (Fig. 25).

La reconstitution de massifs de sable homogènes nécessite que trois paramètres, qui sont en réalité couplés, soient maîtrisés et nous avons engagé des travaux sur ces trois axes :

– densité ou indice des vides (homogénéité et répétitivité) ;

– état des contraintes géostatiques caractérisé par σ_v , σ_h et k_0 (distribution) ;
– caractéristiques mécaniques évaluées par la résistance de pointe q_c mesurée au pénétromètre (distribution).

Les données relatives aux massifs reconstitués avec la trémie LCPC sont résumées dans les paragraphes ci-dessous.

• a) Cartographie de densité des massifs reconstitués par pluviation

Une technique de mesure ponctuelle par boîtes calibrées noyées a été développée et standardisée (Küs, 1992) permettant de mesurer les poids volumiques à moins de 0,3 % près (Ternet, 1999). La figure 26 montre à titre d'exemple la cartographie obtenue dans un plan horizontal situé à 0,225 m de profondeur (conteneur rectangulaire).

Les écarts sont inférieurs à $\pm 0,5$ %, les densités les plus fortes étant observées près des parois perpendiculaires à la direction de translation de la trémie (petits côtés du conteneur). Cette compacité plus grande est également détectée par les essais au pénétromètre (§ c, ci-après) et est due à une légère perturbation du rideau de sable à l'approche de la paroi (évacuation de l'air piégé entre le rideau et la paroi).

Des contrôles *a posteriori* sont effectués dans tous les massifs reconstitués et les données obtenues attestent de la bonne répétitivité des massifs. La figure 27 présente par exemple les poids volumiques obtenus par Remaud entre 1997 et 1999 sur 16 massifs de sable de Fontainebleau denses lors d'un travail de thèse sur les groupes de pieux (Remaud, 1999). La valeur moyenne des poids volumiques des massifs s'établit à $16,36 \text{ kN/m}^3$ avec des écarts à la moyenne inférieurs à $0,09 \text{ kN/m}^3$ (soit environ $\pm 0,5$ %).

Si nécessaire, les massifs reconstitués par pluviation peuvent ensuite être assez aisément saturés par une méthode dérivée de celle qui est mise en œuvre pour les éprouvettes triaxiales avec successivement :

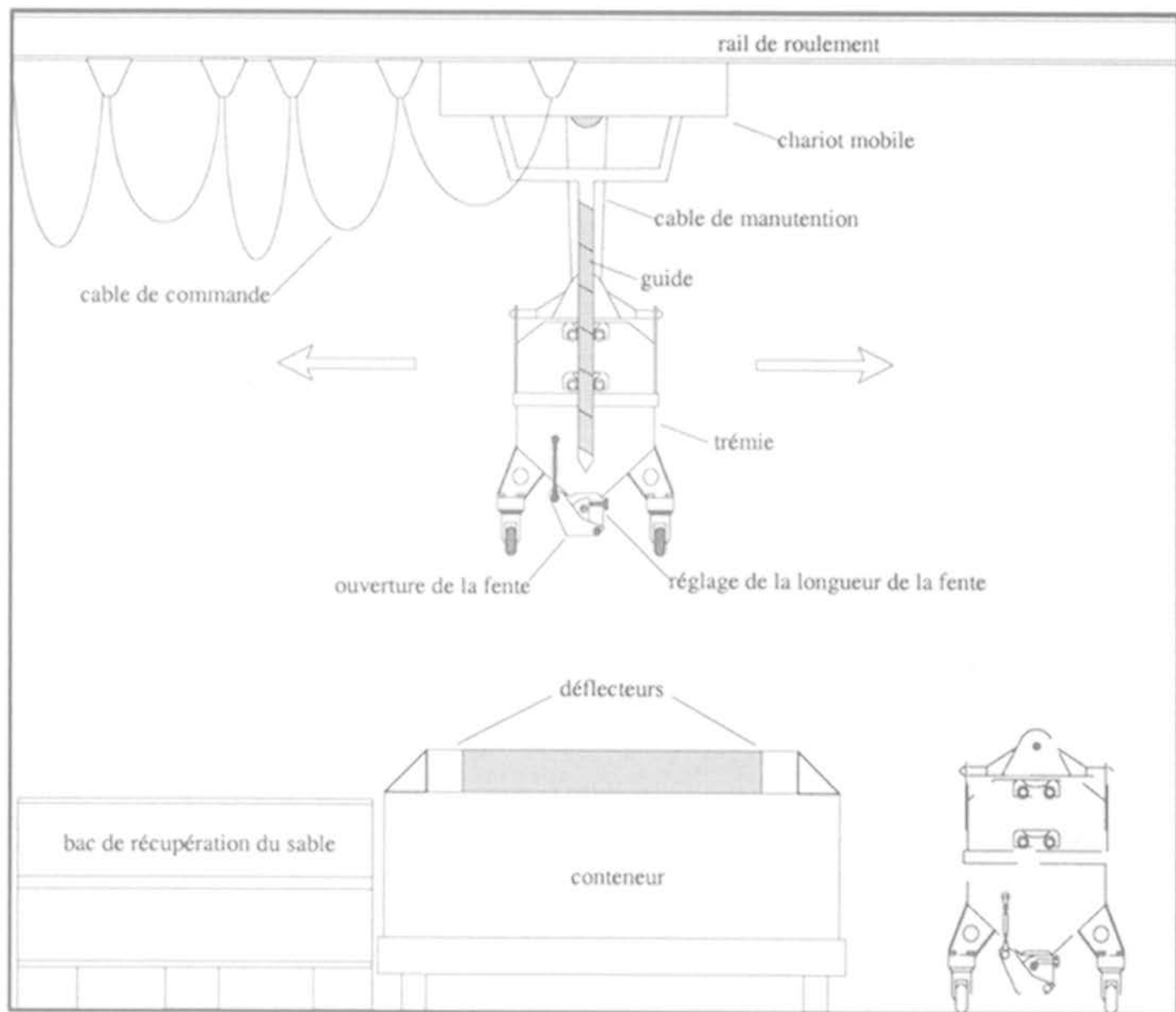
- application d'un vide partiel dans le massif ;
- circulation de dioxyde de carbone ;
- circulation d'eau désaérée.

Cette procédure est détaillée dans le guide de préparation des massifs de sable, élaboré sous l'égide du Comité technique international TC2 (Ueno, 2000). Lorsque pour des raisons de similitude des fluides beaucoup plus visqueux que l'eau sont utilisés (§ 3.1.3), cette saturation devient plus délicate et peut prendre plusieurs heures ou plusieurs jours (Dewoolkar *et al.*, 1999a ; Horikoshi *et al.*, 1998).

• b) État de contraintes géostatiques

Dans un dépôt naturel homogène et semi-infini, la contrainte verticale σ_v varie linéairement avec la profondeur et la contrainte horizontale σ_h en absence de déformation latérale est égale à $k_0 \sigma_v$. Il existe plusieurs raisons qui font que l'état des contraintes géostatiques dans les massifs de sols centrifugés pourrait différer de celles qui règnent dans des massifs réels semi-infinis :

– la contrainte verticale σ_v théoriquement égale à $\rho g z$ peut ne pas varier linéairement avec z du fait des effets « silo » (reprise d'une partie des forces de masse verticales par frottement sur les parois des conteneurs). Les écarts peuvent être considérables dans les conteneurs les plus élancés et cet effet est bien réel puisqu'il est pris en compte dans le dimensionnement des silos. La



(a) Schéma de la salle de pluviation.
Pluviation room.



(b) Trémie automatique et système pneumatique de chargement du sable.
Automatic hopper and pneumatic system used for handling sand.

FIG. 25 Salle de pluviation et trémie automatique du LCPC.
View of the LCPC automatic hopper system for sand pluviation.

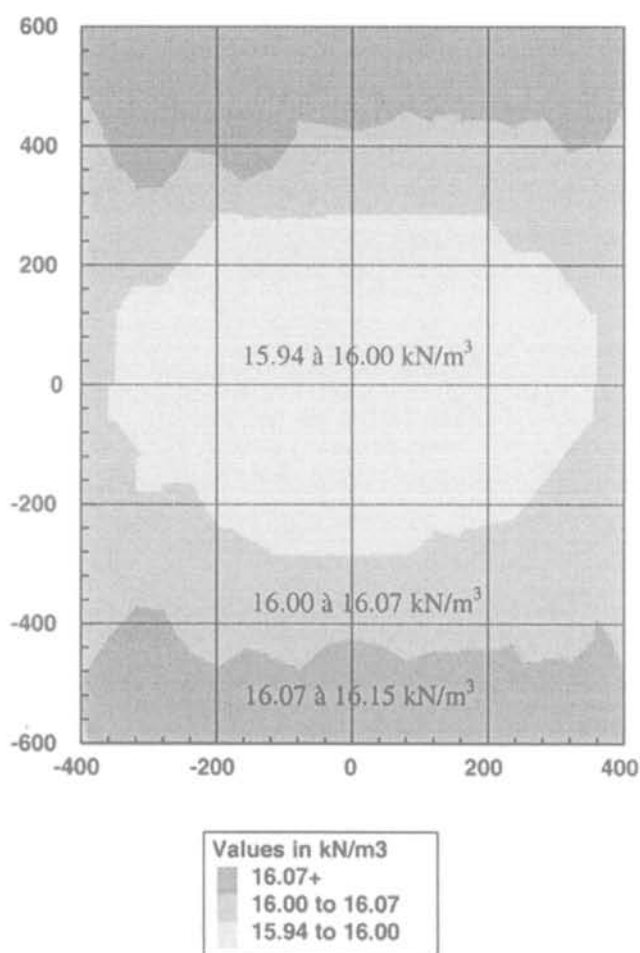


FIG. 26 Cartographie de poids volumiques à 0,225 m de profondeur dans un conteneur rectangulaire (sable de Fontainebleau). Horizontal distribution of unit weight at a depth of 0.225 m in a rectangular container (Fontainebleau sand).

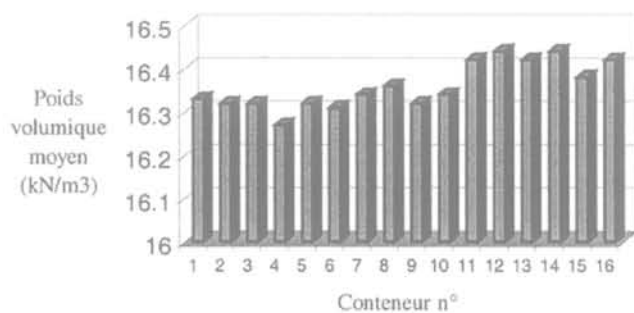


FIG. 27 Distribution des poids volumiques des 16 massifs de sable de Fontainebleau reconstitués par Remaud (1999). Unit weights of 16 Fontainebleau sand samples reconstituted by Remaud (1999) with the LCPC automatic hopper.

contrainte verticale peut finir par être constante avec la profondeur dans les silos les plus étroits ;
 – la contrainte horizontale σ_v , théoriquement égale à $k_0 \sigma_v$, peut être très inférieure à cette valeur si les parois du conteneur se déforment sous l'effet des très fortes contraintes auxquelles elles peuvent être soumises lors de la centrifugation. Ce problème est évidemment

beaucoup plus préoccupant pour des conteneurs rectangulaires que pour des conteneurs cylindriques.

Les travaux sur la détermination des contraintes dans les massifs centrifugés ont abouti récemment, grâce à la coopération engagée avec C. Brown de l'université Brunel de Londres et avec le professeur V. Askegaard de l'université de Lyngby (Copenhague). Les capteurs prototypes à action indirecte conçus par Askegaard (1998) ont une très grande raideur (déflexion inférieure à 1 micron sous 100 kPa) limitant ainsi les redistributions de contraintes (Fig. 28). La mise en place des capteurs a par ailleurs une importance considérable comme nous l'avons montré récemment (Garnier *et al.*, 1999a). Un outil de pose et une procédure standardisée ont dû être développés permettant la mesure des contraintes normales dans les milieux granulaires à $\pm 5\%$ (Ternet, 1999).

A titre d'exemple, la figure 29 présente les contraintes verticales σ_v observées dans un sable de Fontainebleau de poids volumique 16,2 kN/m³ mis en place par pluviation dans un conteneur circulaire de

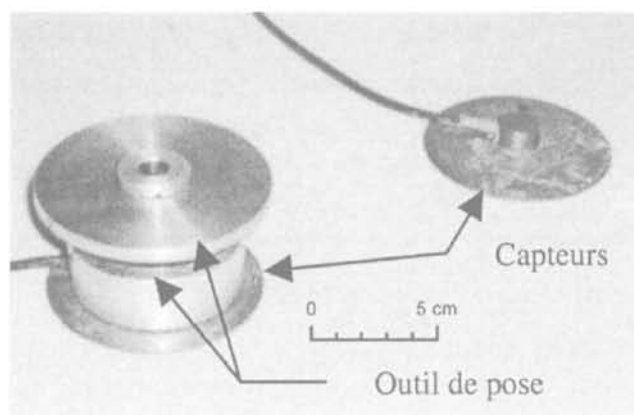


FIG. 28 Vue des capteurs Askegaard et de l'outil de pose. View of Askegaard cells and placement tool (Ternet, 1999).

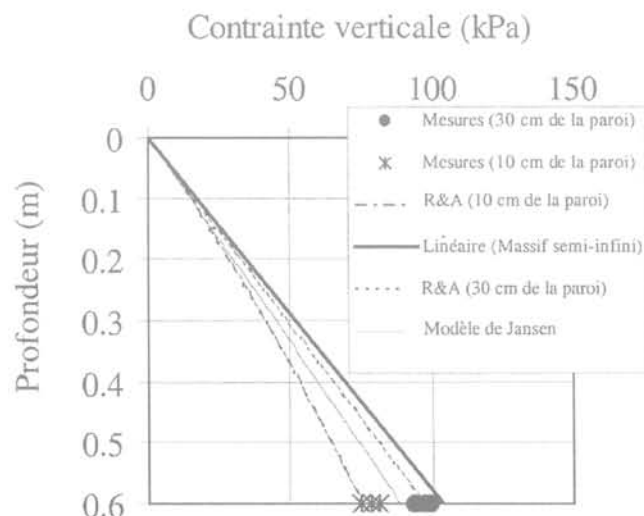


FIG. 29 Profils de contraintes σ_v avec la profondeur en conteneur circulaire de 0,9 m de diamètre sous 10 g (R&A : modèle de Ragneau & Aribert, 1994). Profiles of vertical stress σ_v with depth in a circular container 0.9 m in diameter under 10 g.

0,9 m de diamètre. Les contraintes verticales σ_v sont plus faibles près des parois qu'au centre du conteneur comme le prévoit la théorie développée par Ragneau et Aribert (1994) alors que la théorie de Jansen plus simplificatrice suppose que σ_v est constante dans un plan horizontal. Par rapport à la valeur théorique $\rho g z$ du massif semi-infini, la contrainte verticale à 0,6 m de profondeur est inférieure de 26 % à une distance de 10 cm de la paroi et de 6 % à 30 cm de cette paroi. Les données expérimentales sont en bon accord avec la théorie de Ragneau et Aribert.

Cet effet « silo » peut être à l'origine de bien des erreurs lors de l'interprétation d'essais en cuve, en station et en centrifugeuse. Il a par exemple abouti à des conclusions discutables sur l'existence de deux profondeurs critiques dans la portance des fondations profondes en sol homogène pulvérulent (Puech, 1975) ou sur l'évolution de la résistance de pointe des pieux avec la profondeur (Kerisel, 1961).

Les contraintes horizontales σ_h et le coefficient k_0 ont également été étudiés. Dans tous les essais, le coefficient k_0 s'est révélé indépendant de l'accélération centrifuge pour des valeurs supérieures à 10 ou 15 g. Il dépend en revanche étroitement de la compacité du matériau (Fig. 30). La relation de la figure 30 pour le sable de Fontainebleau peut s'exprimer sous la forme approchée suivante :

$$k_0 = 2,37 - 0,13 \gamma_d \quad (8)$$

Les écarts entre ces valeurs expérimentales et celles de la formule de Jaky ($k_0 = 1 - \sin \phi'$) sont inférieurs à 15 % (Ternet, 1999).

L'étude a aussi permis de déterminer l'effet d'une surconsolidation sur le coefficient k_0 alors noté k_{oc} . La relation suivante due à Schmidt (1983) rend bien compte des données expérimentales (Fig. 31) :

$$k_{oc} = k_0 (OCR)^\alpha \quad (9)$$

avec $\alpha = 1 - \sin \phi'$ d'après Flavigny (1992).

Les conteneurs et en particulier les conteneurs rectangulaires doivent être conçus avec des rigidités suffisantes pour que les états de contraintes y soient de type k_0 . Dans le cas de conteneurs très élancés, il peut en outre être nécessaire pour limiter l'effet « silo » de réduire le frottement entre le sol et les parois par traitement de surface ou utilisation de lubrifiant (Ueno, 1998).

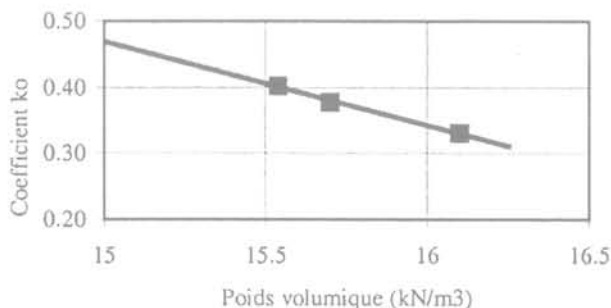


FIG. 30 Relation entre le coefficient k_0 du sable de Fontainebleau normalement consolidé et son poids volumique.

At rest coefficient k_0 vs. unit weight in the centrifuge Fontainebleau sand sample.

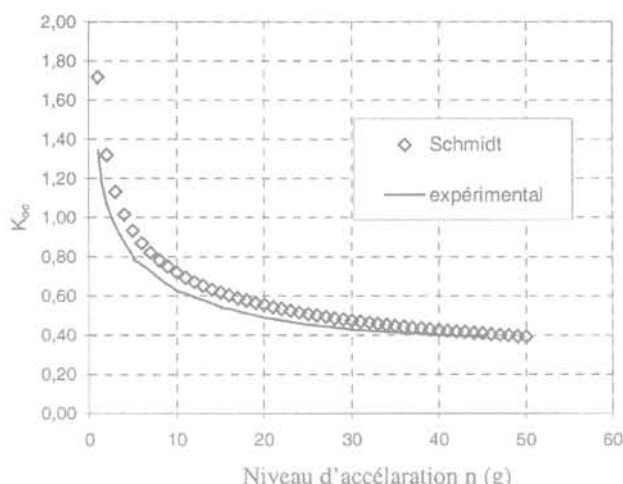


FIG. 31 Évolution du coefficient k_{oc} du sable de Fontainebleau surconsolidé (Ternet, 1999). Coefficient k_{oc} of overconsolidated Fontainebleau sand.

• c) Distribution des caractéristiques mécaniques

Le pénétromètre statique reste aujourd'hui le moyen le plus simple à mettre en œuvre en centrifugeuse pour étudier la distribution des propriétés mécaniques des massifs centrifugés et nous avons utilisé les dispositifs suivants (§ 3.1.2) :

- le pénétromètre mobile LCPC qui peut se déplacer horizontalement sur un axe et dispose d'une profondeur de pénétration dans le sol de 300 mm ;
- le téléopérateur qui peut décrire à peu près tout le conteneur d'essai. Les deux outils pénétrométriques (diamètre de pointe d_c de 8 mm ou 12 mm) disposent d'une course de 400 mm.

A partir des mesures de pointe q_c , une résistance normalisée $Q_c = (q_c - \sigma'_v) / \sigma'_v$ est ensuite déterminée où σ'_v est la contrainte verticale effective. La résistance normalisée Q_c présente assez logiquement dans ce type de sol (sable) une valeur sensiblement constante au-dessous d'une profondeur critique z_c voisine de $10 d_c$ où d_c est le diamètre de la pointe pénétrométrique (Fig. 32a).

Le léger accroissement de Q_c observé à la base des sondages sur la figure 32a est dû à l'effet du fond du conteneur. Un exemple de distribution de la résistance de pointe Q_c dans un plan horizontal est par ailleurs montré sur la figure 32b.

Ces cartographies ont permis de montrer que, dans la zone centrale du conteneur réservée aux essais sur modèles réduits, la variation de la résistance de pointe ne dépasse pas $\pm 3\%$.

Des recherches conduites dans une coopération européenne (programme « Science » évoqué au § 2.3) puis au niveau international (action du Comité technique TC2) ont conduit à proposer une certaine standardisation de l'essai au pénétromètre statique miniature (Gui *et al.*, 1998 ; Bolton *et al.*, 1999 ; Katagiri et Okamura, 2000).

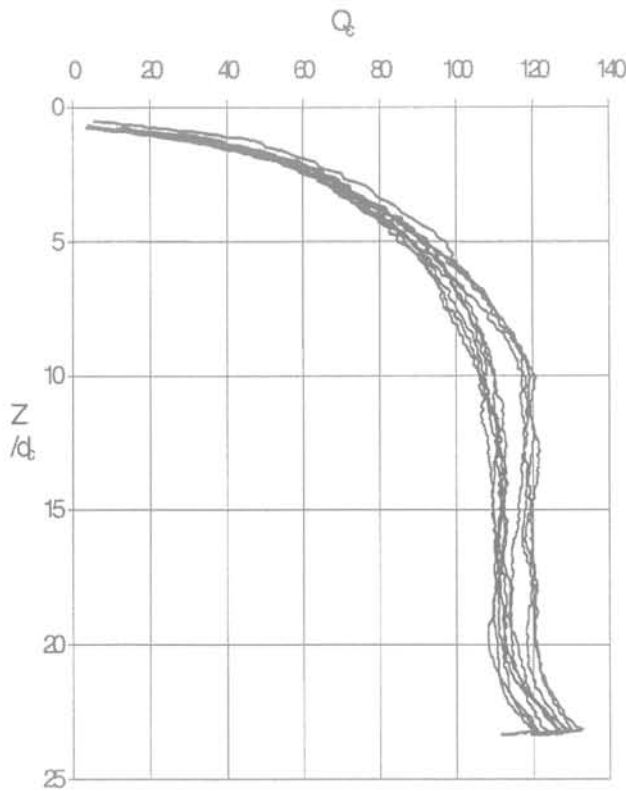
De nombreux paramètres ont été étudiés comme la distance entre essais, les rapports d_c/d_{sc} , d/d_c et D/d_c (d_c diamètre du cône, d distance à la paroi, D diamètre du conteneur), la densité du sable, le niveau d'accélération, la vitesse de pénétration (tableau II ci-après).

Les pénétromètres préconisés sont des modèles réduits (échelle 1/3) du pénétromètre de chantier nor-

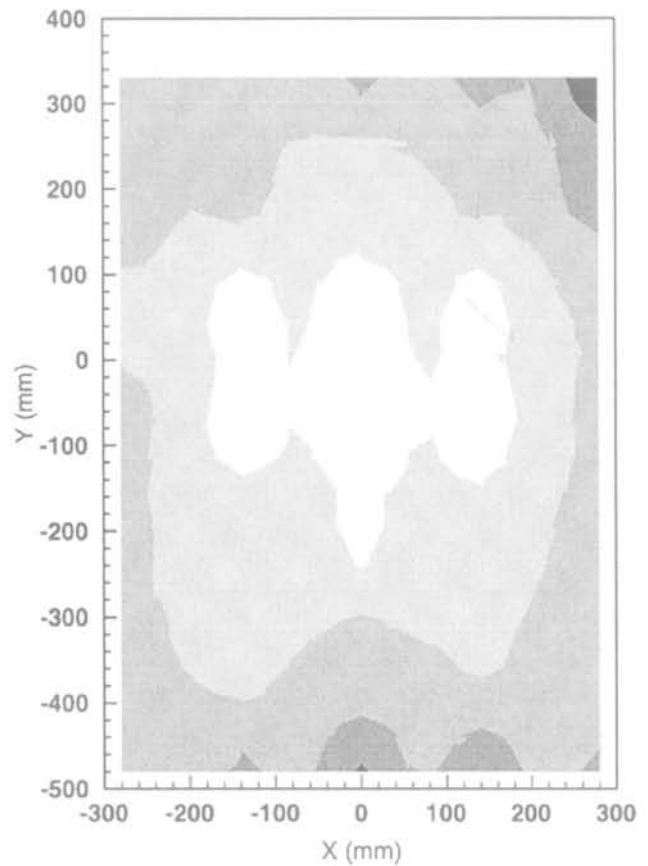
TABEAU II Recommandations pour la réalisation d'essais au pénétromètre statique dans des sables.
 Recommendations for centrifuge CPT tests in sand (Bolton *et al.*, 1999).

Paramètre	Valeur préconisée	Observations
Rapport d_c/d_{50}	> 20	Erreur inférieure à 10 % pour les plus faibles valeurs de d_c/d_{50}
Rapport d/d_c	> 10	
Rapport D/d_c	> 40	
Vitesse de pénétration	Entre 2 et 20 mm/s	Pas d'effet significatif en sable sec

d_c/d_{50} diamètre de la pointe, D diamètre du conteneur, d distance entre essais, d_{50} diamètre moyen des grains.



(a) Profils de résistance normalisée Q_c en fonction de la profondeur relative z/d_c .
 Dimensionless tip resistance Q_c vs. relative depth z/d_c .



(b) Cartographie de résistances de pointe Q_c dans un plan horizontal (profondeur 200 mm).
 Distribution of tip resistance Q_c in a horizontal plane (200 mm deep).

FIG. 32 Distribution des résistances de pointe normalisée Q_c obtenues sous 70 g dans un massif de sable de Fontainebleau en conteneur rectangulaire (Ternet, 1999).

Distribution of normalised dimensionless tip resistance Q_c obtained at 70 g in Fontainebleau sand pluviated at 15.85 kN/m³.

malisé au niveau européen (pointe de 36 mm de diamètre). Cette réduction du diamètre par rapport au pénétromètre normalisé ne semble pas induire d'effet de taille significatif comme l'ont montré les essais récents de Titi *et al.* (2000). Aucune correction n'est donc faite dans la pratique sur les valeurs de q_c mesurées en centrifugeuse. Les principales recommandations résultant des recherches conduites en coopération sont rassemblées dans le tableau II.

Ces travaux ont aussi démontré la très bonne reproductibilité des essais entre laboratoires ce qui confirme que la préparation de massifs de sable à densité imposée est bien maîtrisée (Fig. 33). Dans ces essais croisés du programme européen Science, le même matériau a été utilisé (sable de Fontainebleau) mais chacun des cinq laboratoires a effectué les essais avec ses propres matériels et techniques. Dans tous les cas, les massifs étaient cependant reconstitués par pluviation.

CENTRIFUGE CONE PENETRATION TESTS IN SAND

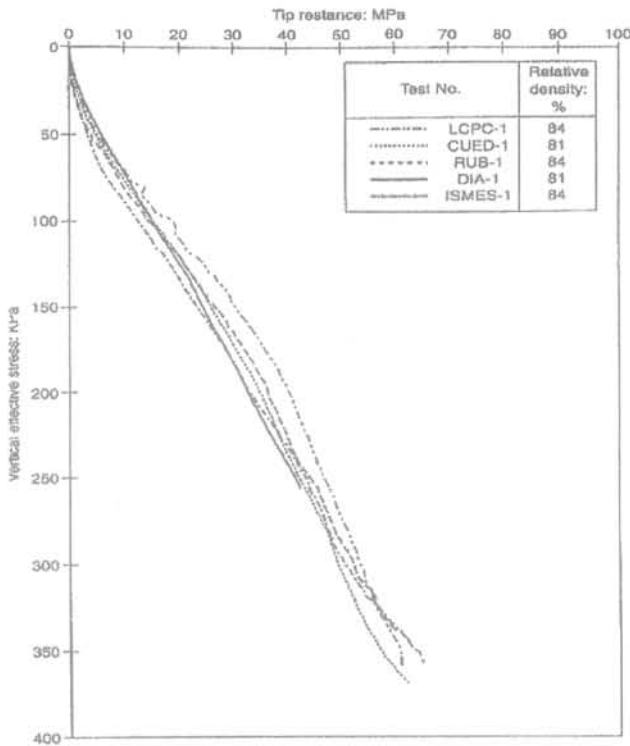


FIG. 33 Comparaison des profils pénétrométriques obtenus sous 70 g lors d'essais croisés entre 5 laboratoires européens - Programme Science (Bolton *et al.*, 1999).
Comparison of CPT test profiles during cross tests in 5 European laboratories - Science Programme (Bolton *et al.*, 1999).

• d) Évolution des sables d'essai

Les matériaux d'essai sont le plus souvent l'objet de réutilisations successives. Si le matériau n'était pas ainsi recyclé, plusieurs dizaines de m³ par an seraient nécessaires dont l'homogénéité serait très difficile à garantir. Lors d'études sur la portance des fondations (Bakir *et al.*, 1994), nous avons mis en évidence une lente dérive des caractéristiques mécaniques du sable de Fontainebleau utilisé (diminution de la portance de la fondation de référence de 11 % en un peu moins de deux ans).

L'étude spécifique que nous avons entreprise sur ce problème a montré que l'évolution des caractéristiques est provoquée par l'usure du sable (manutention, pluviation, centrifugation, chargement des modèles, sondages pénétrométriques, éventuels cycles saturation-séchage).

Seule la mesure directe de la résistance au cisaillement (essai à la boîte ou au triaxial) permet de détecter et de quantifier cette évolution car les autres essais que nous avons pratiqués (granulométrie détaillée, écoulement à travers un orifice calibré) ne sont pas assez fins. La réduction de l'angle de frottement due à cette usure peut atteindre 2° comme le montre la figure 34 qui compare les résultats d'essais de cisaillement à la boîte sur du sable de Fontainebleau vierge et du sable usagé (Maréchal, 1999). Toutes les éprouvettes nécessaires à ces essais de cisaillement à la boîte ont été reconstituées au même poids volumique de 16 kN/m³ à l'aide d'un pluviateur de laboratoire spécialement conçu pour garantir une densité constante (Levacher *et al.*, 1994).

McVay *et al.* (2000) ont aussi constaté ce vieillissement d'un sable d'essai conduisant également dans leur cas à une diminution de 2° de l'angle de frottement interne.

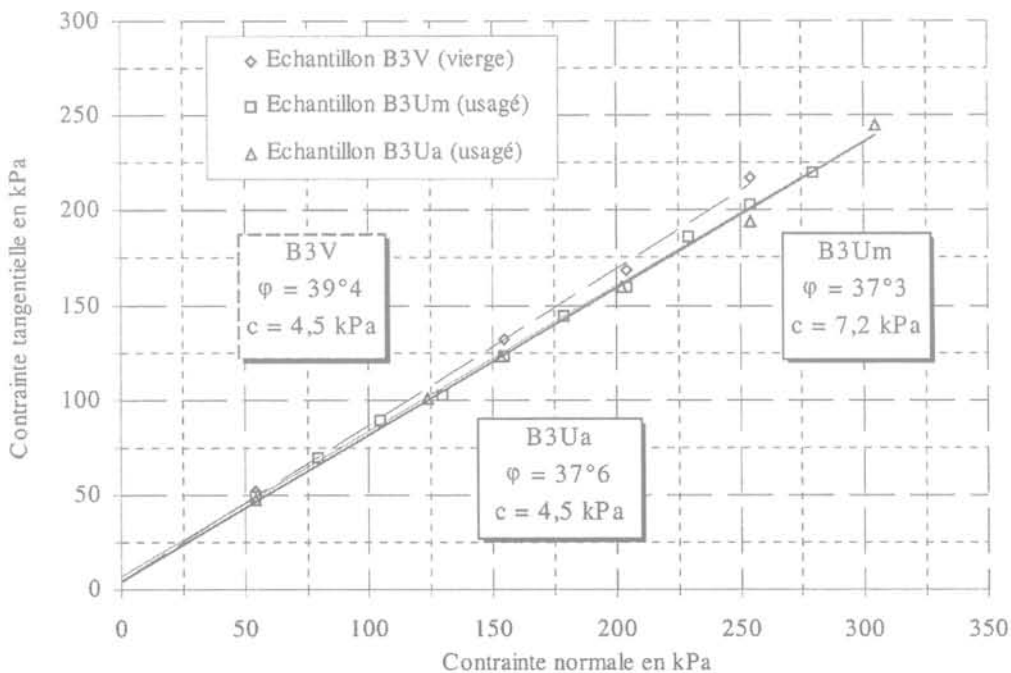
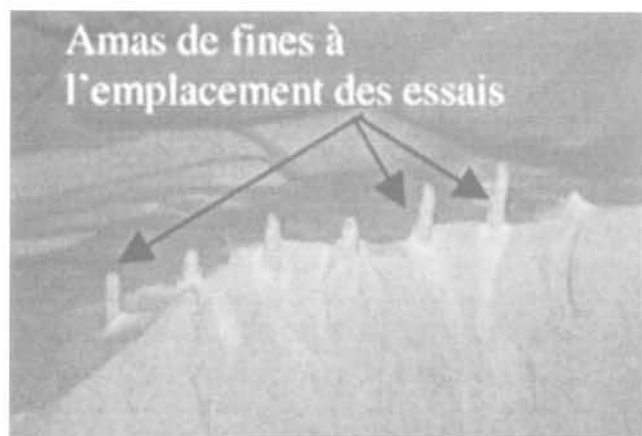


FIG. 34 Comparaison des résistances au cisaillement du sable de Fontainebleau vierge (échantillon B3V) et usagé (échantillons B3Ua et B3Um).
Comparison between shear strengths of virgin and worn Fontainebleau sands used in centrifuge models at LCPC (B3V : virgin sand ; B3Ua and B3Um : worn sand).

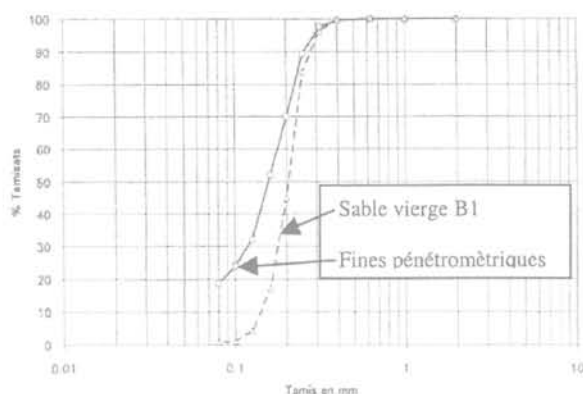
Il nous a été par hasard possible de mettre en évidence l'usure d'un sable par attrition lors d'essais au pénétromètre. La figure 35a montre les amas de fines qui sont apparus lors du démontage d'un modèle. Ces fines provenant de la rupture des grains au passage de la pointe se sont probablement accumulées au fond des sondages lors de la remontée du pénétromètre. Les matériaux recueillis ont été analysés et leur courbe granulométrique est comparée à celle du sable du massif sur la figure 35b où on observe une très nette réduction de la taille des particules.



(a) Vue des amas de fines produites au passage de la pointe pénétrométrique.

View of the fingers at the location of the centrifuge CPT tests.

Courbes granulométriques du sable vierge et des fines produites



(b) Comparaison de la courbe granulométrique du sable de Fontainebleau et de celle des fines produites par le pénétromètre.

Comparison of the gradation curves for the Fontainebleau sand and the particles from the fingers.

FIG. 35 Rupture des grains observée lors d'essais pénétrométriques.

Grain crushing observed after centrifuge CPT tests performed at 70 g.

Les matériels et les techniques actuellement disponibles permettent donc de confectionner avec une très bonne répétitivité des massifs homogènes ayant des caractéristiques déterminées *a priori*. Une certaine standardisation de la procédure de préparation a été tentée sous l'égide du Comité technique international TC2 (Ueno, 1998). En cas de réutilisations successives, les sables d'essais doivent toutefois faire l'objet d'une gestion rigoureuse et un suivi de l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques est indispensable.

Des progrès sont souhaitables sur plusieurs aspects :

- les essais *in situ* devraient être améliorés : miniaturisation du pénétromètre pour réduire les effets sur les contraintes horizontales dans les sables denses, poursuite du développement du minipressiomètre, généralisation de l'utilisation du piezocône ;
- certaines propriétés des massifs reconstitués devraient être étudiées : anisotropie des sables comme des argiles, effet de l'âge du sol reconstitué, différences de comportement entre les dépôts naturels et les massifs reconstitués ;
- les sols doués de cohésion et de frottement (intermediate soils) qui sont souvent non saturés sont encore mal maîtrisés et difficiles à reproduire de façon contrôlée et répétitive ;
- les possibilités d'utiliser des matériaux équivalents ou des sols artificiels n'ont guère été explorées. Il serait intéressant d'associer des chimistes à ces travaux dont l'un des objectifs pourrait être la maîtrise de la cohésion apparente. Cette technique de matériaux équivalents est très utilisée dans d'autres applications de la modélisation physique (transport sédimentaire, érosion, hydrodynamique). Dans le domaine géotechnique, on peut envisager de remplacer soit les grains du sol, soit le fluide interstitiel, soit les deux phases en même temps.

4

Conclusion

Le parc mondial des centrifugeuses géotechniques est en constante évolution et il est possible de distinguer plusieurs générations successives de machines :

- la première est celle des pionniers et elle s'étend des années 30 aux années 60. Le parc est alors pour l'essentiel en URSS. Les machines de cette première génération sont souvent de taille modeste. Elles ne permettent guère ni les interventions ni les mesures sur le modèle en cours de rotation. Les essais ont pour objectif la détermination des charges limites et des modes de ruptures (pentes, cavités, fondations) ;
- la seconde génération, du début des années 70 à nos jours, a au contraire progressivement bénéficié de l'arrivée dans les laboratoires des capteurs électriques, des chaînes d'acquisition puis des micro-ordinateurs et des caméras CCD. Grâce à ces nouveaux moyens, les mesures, les observations et les interventions sur le modèle sont devenues possibles pendant la rotation. Les essais permettent alors d'étudier le comportement de l'ouvrage du début du chargement monotone, cyclique, dynamique voire sismique, jusqu'à la rupture ;
- la troisième génération intégrera probablement dès la conception, des systèmes robotisés d'intervention sur le modèle, des tables vibrantes pour la simulation de séismes, des moyens de mesure embarqués dans la nacelle, des transmissions de données sans fils, une utilisation généralisée des méthodes de traitement d'images en temps réel et des réseaux de communication (dont le Web) permettant de suivre le déroulement d'un essai de n'importe quel point du globe. Ces développements ont déjà commencé mais ils se font sur des machines existantes et non dès leur conception.

La modélisation physique en macrogravité est devenue une méthode d'étude et de recherche à part entière

et pratiquement tous les types d'ouvrages géotechniques peuvent aujourd'hui être simulés. Compte tenu des immenses marges de progrès scientifiques et technologiques qui existent et qui vont encore étendre les

champs d'application, il est difficile d'imaginer ce que seront ces modèles dans une ou deux décennies et qu'elle sera alors leur place dans les programmes d'études et de recherches en géotechnique.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Comité français de mécanique des sols et de géotechnique qui m'a fait l'honneur de me confier cette première conférence Coulomb. Le développement et les applications de la modélisation physique conduits au LCPC depuis près de vingt ans sont une œuvre collective. Je tiens à remercier vivement ceux qui ont constamment soutenu ce projet et ces travaux, ceux qui leur ont donné les impulsions décisives et

tous ceux qui, à mes côtés, en ont été les acteurs quotidiens : les membres de la section Mécanique des sols et centrifugeuse, les nombreux étudiants qui ont pris part à nos recherches ainsi que mes collègues du réseau européen NECER, que j'ai le plaisir d'animer depuis 1995. Le soutien de la Commission européenne, qui a financé trois programmes de recherche successifs depuis 1986, a en effet été déterminant dans les progrès réalisés. Je remercie enfin W. Craig et l'université de Columbia pour m'avoir fourni la photographie de P. Bucky.

Bibliographie

- Akou Y., Magnan J.P., Rault G. – *Étude sur modèles de l'élargissement des remblais sur sols compressibles*. Études et Recherches des LPC, Géotechnique, GT64, 1998, 215 p.
- Allard M.A., Schenkeveld F.M. – *The Delft Geotechnics model pore fluid for centrifuge tests*. Centrifuge 94, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 133-138.
- Allard M.A., Hjortnaes-Pedersen A.G.I., Out J.G. – « Performance of a sand hopper ». *Centrifuge 94*, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 83-88.
- Allersma H.G.B. – « The university of Delft geotechnical centrifuge ». *Centrifuge 94*, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 47-52.
- Allersma H.G.B. – « Development of cheap equipment for small centrifuges ». *Centrifuge 94*, Tokyo, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 85-89.
- Allersma H.G.B., Esposito G.M. – « Optical analysis of pollution transport in geotechnical centrifuge tests ». *Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule, Garnier et al. (Ed.), 2000, p. 3-10.
- Arulanandan K., Manzari M., Zeng X., et al. – « What LELACS project has revealed ». *Centrifuge 94*, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 25-32.
- Askegaard V. – « Normal and shear stress on a silo wall and stress and strain in a silo medium ». *Silos : fundamentals of theory behaviour and design*, Brown & Nilsen (Eds.), E & FN Spon, 1998, p. 686-698.
- Avgherinos P.J., Schofield A.N. – « Draw-down failures of centrifuged models ». *Proc. 7th ICSMFE*, 2, 1969, p. 497-505.
- Balakrishnan A., Kutter B. – « Settlement, sliding and liquefaction remediation of layered soil ». *J. of Geotechn. and Geoenv. Eng.*, ASCE, 125 (11), 1999, p. 968-978.
- Bakir N.E., Garnier J., Canépa Y. – *Étude sur modèles centrifugés de la capacité portante de fondations superficielles*. Études et recherches des LPC, série Géotechnique, GT 59, octobre, 1994, 188 p.
- Beckerich O., Garnier J., Rault G., Levaucher D. – « Un mini pressiomètre pour essais sur modèles réduits centrifugés ». 5^e Journées nationales Génie civil-Génie côtier, Toulon, 1998, p. 399-406.
- Bodin D., Gaudin C., Garnier J. – « Étude sur modèles réduits du comportement d'une paroi de soutènement ». Journées Génie civil-Génie côtier, Caen, mai 2000, 8 p.
- Bolton M., Gui M.W., Garnier J., Corte J.-F., Bagge G., Laue J., Renzi R. – « Centrifuge cone penetration tests in sand ». *Géotechnique*, 49 (4), 1999, p. 543-552.
- Bonab Brownell K.C., Taylor T., Charlie W.A. – « Moisture content effects on explosion-induced craters in sand ». *Centrifuge 94*, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 331-336.
- Bruno D., Randolph M.F. – « Dynamic and static load testing of model piles driven into dense sand ». *Jour. of Geotech. & Geoenv. Engineering*, ASCE, 125 (11), 1999, p. 988-998.
- Buckingham E. – « On physically similar systems : illustrating the use of dimensional analysis ». *Phys. Rev.*, 4, 1914, p. 345-379.
- Bucky B.P. – *Use of models for the study of mining problems*. AIMME, Tech. Pub., 1931, 425 p.
- Butterfield R. – « Dimensional analysis for geotechnical engineers ». *Géotechnique*, 49 (3), 1999, p. 357-366.
- Butterfield R. – « Scale-modelling of fluid flow in geotechnical centrifuges ». *Soils and Foundations*, 40 (6), 2000, p. 39-45.
- Centrifuge 88* – Paris, 25-27 avril, Corté (Ed.), Balkema, 1988, 610 p.
- Centrifuge 88* – Boulder, 13-14 June, Ko (Ed.), Balkema, 1991, 616 p.
- Centrifuge 94* – Singapore, 31 August-2 September, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, 836 p.
- Centrifuge 98* – Tokyo, 23-25 September, Kimura et al. (Ed.), Balkema, vol. 1 & vol. 2, 1998, 1 171 p.
- Chazelas J.L. – *Conception d'un simulateur de séismes en centrifugeuse – Étude bibliographique*. Rapport LCPC, 1999, 78 p.
- Corté J.F., Garnier J. – *La centrifugeuse du LCPC Note de présentation des installations*. Rapport des Laboratoires, série GT5, 1984.
- Corté J.F., Garnier J. – « Une centrifugeuse pour la recherche en génie civil ». *Bull. des LPC*, 146, novembre-décembre, 1986, p. 5-28.
- Corté J.F. – « Review of geotechnical centrifuge testing in France ». *Centrifuges in Soil Mechanics*. Craig et al. (Ed.), Balkema, 1988, p. 61-80.
- Craig W.H. – *Model studies of the stability of clay slopes*. Thesis Doctor of Philosophy, Victoria University of Manchester, 1974, 380 p.
- Craig W.H., James R.G., Schofield A.N. – *Centrifuges in soil mechanics*. Balkema, 1988, 266 p.
- Craig W.H. – « Eduard Phillips (1821-1889) and the idea of centrifuge modelling ». *Géotechnique*, 39 (4), 1989, p. 697-700.
- Crançon P., Guy C., Pili E., Duthel S., Gaudet J.P. – « Modeling of capillary rise and water retention in centrifuge tests using time domain reflectometry ». *Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule, Garnier et al. (Ed.), 2000, p. 199-206.
- Culligan-Hensley P.J., Savvidou C. – « Environmental geomechanics and transport processes ». *Geotechnical centrifuge technology*, Taylor (Ed.), Blackie & Professional, 1995, p. 197-263.
- Davies M.C.R. – « Dynamic soil structure interaction resulting from blast loading ». *Centrifuge 94*, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 319-324.
- Davidenkov N.N. – « The new method of the application of models to the study of the equilibrium of soil ». *J. of Technical Physics*, Moscow, 3, 1933, p. 131-136 (in Russian).
- De Beer E.E. – *The scale effect on the phenomenon of progressive rupture in cohesionless soil*. Proc. ICSMFE, Montréal, 2, 1965, p. 13-17.
- De Nicola A., Randolph M.F. – « Centrifuge modelling of pipe piles in sand under axial loads ». *Géotechnique*, 49, 1999, p. 295-318.
- Derckx F., Merliot E., Garnier J., Cottineau L.M. – « On-board, remote-controlled centrifuge robot ». *Int. Conf. Centrifuge 98*, Tokyo, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1, 1998, p. 97-102.
- Dewoolkar M.M., Ko H.Y., Stadler A.T., Aftaneh S.M.F. – « A substitute pore fluid for seismic centrifuge modeling ». *Geotechnical Testing Journal*, 22 (3), 1999a, p. 196-210.
- Dewoolkar M.M., Ko H.Y., Park R.Y.S. – « Centrifuge modelling of models of seismic effects on saturated earth structures ». *Géotechnique*, 49 (2), 1999b, p. 247-266.
- Dupas A., Cottineau L.M., Thorel L., Garnier J. – « Capacitive sensor for water content measurement in centrifuged porous media ». *Int. Symp. on Phys. Model. and Test. in Env. Geot.*, La Baule, Garnier et al. (Ed.), 2000, p. 11-18.
- Duthel S. – *Simulation des effets d'une explosion enterrée – Essais sur modèles réduits en centrifugeuse*. Thèse de doctorat de l'École polytechnique, Paris, 1998, 155 p.

- Dyson G.J., Randolph M.F. – *Installation effects on lateral load-transfer curves in calcareous sands*. *Centrifuge 98*, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1998, p. 545-550.
- Elgamal A.W., Horikoshi K. – « Earthquake effects and dynamic problems ». *Proceedings of Workshop 3. Centrifuge 98*, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 2, 2000, p. 1025-1031.
- Esposito G., Allersma H.G.B., Selvadurai A.P.S. – « Centrifuge modelling of LNAPL transport in partially saturated sand ». *Jour. of Geotech. & Geoenv. Eng.*, 125 (12), 2000, p. 1066-1071.
- Esquivel E.R., Ko H.Y. – « Development of a miniature piezocene ». *Centrifuge 94*, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 89-94.
- Flavigny E. – *Estimation du coefficient Ko en place dans les matériaux surconsolidés*. *Archives of Hydrotechnics*, Gdansk, 38, 1992, p. 6-19.
- Garnier J. – *Modélisation par centrifugation. Pâtes souples, lisses et rugueuses*. *Compte rendu d'essais, LCPC, Rapport FAER 1.06.51.3*, 1983, 46 p. et annexes.
- Garnier J., Canépa Y. – « Effects of different footing conditions on the ultimate bearing pressure ». *Centrifuge 91*, Boulder, Colorado, Ko (Ed.), Balkema, 1991, p. 209-216.
- Garnier J. – « Modèles réduits en mécanique des sols ». *Les modèles réduits en génie civil*, AUGC, 1995, p. 21-44.
- Garnier J. – « Validation des modèles physiques et numériques : problème des effets d'échelle ». *Actes du XIV^e CIMSTF*, Hambourg, Balkema, 3, 1997, p. 659-663.
- Garnier J. – « Modélisation physique en génie civil : essais sur modèles en macrogravité ». *Récents progrès en génie des procédés*, Société française de génie des procédés, Lavoisier (Ed.) 13 (72), 1999, p. 151-160.
- Garnier J., König D. – « Scale effects in piles and nails loading tests in sand ». *Int. Conf. Centrifuge 98*, Tokyo, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1, 1998, p. 205-210.
- Garnier J., Ternet O., Cottineau L.M., Brown C. – « Placement of embedded pressure cells ». *Géotechnique*, 49 (3), 1999a, p. 405-414.
- Garnier J., Derckx F., Cottineau L.M., Rault G. – « Études géotechniques sur modèles centrifugés : évolution des matériels et des techniques expérimentales ». *Bull. des LPC*, 223, septembre-décembre 1999b, p. 27-50.
- Garnier J., Thorel L., Haza E. – *Proceed. Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule, 15-17 May, 2000a, 400 p.
- Garnier J., Thorel L., Lynch R., Bolton M., Soga K., König D., Wesstrate F., Oung O., Schrijver R., Taylor N., Allersma H., Davis M., Merrifield C., Craig W. – « NECER : Network of European centrifuges for environmental geotechnics research ». *Centrifuge 98*, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 2, 2000b, p. 957-979.
- Garnier J. – « Modèles physiques en géotechnique – II. Validation de la méthode et exemples d'application ». *Revue française de géotechnique*, 2002 (à paraître).
- Gaudin C., Garnier J., Rault G., Gaudicheau P. – *Use of a robot for in flight excavation in front of an embedded wall*. *Int. Conf. on Physical Modelling in Geotechnics*, St John's, July 10-12, 2002, 12 p.
- Glushikhin F.P., Kuznetsov G.N., Shklyarski M.F., Pavlov V.N., Zlotnikov M.S. – *Modelling in geomechanics*. Balkema, 1993, 243 p.
- Griffioen J.W., Barry D.A. – « Centrifuge modeling of unstable infiltration and solute transport ». *J. of Geotech. & Geoenv. Engineering*, ASCE, 125 (7), 1999, p. 556-565.
- Günzel F., Craig W.H., Cruickshank M., Merrifield C.M. – « Development and commissioning of apparatus to investigate capillary phenomena using radio-tracers ». *Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule, Garnier et al. (Ed.), 2000, p. 19-26.
- Gui M.W., Bolton M.D., Garnier J., Corte J.F., Bagge G., Laue J., Renzi R. – « Guidelines for cone penetration tests in sand ». *Int. Conf. Centrifuge 98*, Tokyo, Kimura et al. (Ed.), 1, 1998, p. 155-160.
- Gurung S.B., Kusakabe O., Kano S. – « Behavior of reconstituted and natural soil model under pull out force ». *Centrifuge 98*, Tokyo, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1998, p. 477-482.
- Habib P. – « Scale effect for shallow footings on dense sand ». *ASCE*, 100, GT1, 1974, p. 95-99.
- Hoek E. – « Experimental study of rock stress problems in deep level mining ». *Proc. 1st Int. Conf. on Experimental Mechanics*, 1961, p. 177-194.
- Horikoshi K., Tateishi A., Fujiwara T. – « Centrifuge modeling of a single pile subjected to liquefaction-induced lateral spreading ». *Soils & Foundations Special issue*, Sept. 1998, p. 193-208.
- Ismail M.A., Joer H.A., Randolph M.F. – « Sample preparation technique for artificially cemented soils ». *Geotechnical testing Journal*, 23, 2, 2000, p. 171-177.
- Itoh H., Katagiri M., Saito K., Terashi M. – « Self-weight consolidation behavior of fluid clay ». *Centrifuge 98*, Tokyo, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1998, p. 181-184.
- Katagiri M., Okamura M. – « Manual of basic centrifuge tests. Cone penetration tests ». *Centrifuge 98*, Tokyo, Kimura et al. (Ed.), 2, Balkema, 2000, p. 1059-1065.
- Kerisel J. – « Fondations profondes en milieux sableux : variation de la force portante limite en fonction de la densité, de la profondeur, du diamètre et de la vitesse d'enfoncement ». *Proc. 5th ICSMF*, Paris, 2, 1961, p. 73-83.
- Kerisel J. – « Le langage des modèles ». *Proc. 5^e ECSMF*, Madrid, 2, 1972, p. 9-30.
- Khoo E., Okumura T., Lee F.H. – « Side friction effects in plane strain models ». *Centrifuge 94*, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 115-120.
- Kimura T. – « Development of geotechnical centrifuges in Japan ». *Centrifuge 98*, Tokyo, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 2, 2000, p. 945-954.
- Kimura T., Takemura J., Hiro-Oka A., Okamura M. – « Mechanical behavior of intermediate soils ». *Centrifuge 94*, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 13-24.
- König D. – *Communication personnelle*. 2001.
- Knight M.A., Cooke A.B., Mitchell R.J. – « Scaling of the movement and fate of contaminant releases in the vadose zone by centrifuge modelling ». *Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Envi-*
- ronmental Geotechnics*, La Baule, Garnier et al. (Ed.), 2000, p. 233-242.
- Küs B. – *Pluviation des sables*. Rapport de stage de DEA, Université de Nantes-LCPC, 1992, 53 p.
- Kutter B.L. – *Centrifuge modelling of the response of clay embankments to earthquakes*. PhD Thesis, Cambridge University, 1982.
- Langhorne P.J., Stone K.J.L., Smith C.C. – *The bearing capacity of saline ice sheets : centrifugal modelling*. *Can. Geotech. J.*, 36, 1999, p. 467-481.
- Langhaar H. – *Dimensional analysis and theory of models*. John Wiley, New York, 1951.
- Laue J. – *Centrifuge technology. Constitutive and centrifuge geotechnical modelling : two extremes*, Ascona, Ascona Workshop, July 8-13, 2001, 28 p.
- Le Collinet J. – *Effets de taille et d'accélération dans le cisaillement des interfaces sol/pieu*. Rapport de stage de DEA, Université de Nantes-LCPC, 1998, 85 p.
- Le Tirant P., Luong M.P., Habib P., Gary G. – « Simulation en centrifugeuse de fondations marines ». *Actes IX^e CIMSTF*, 2, 1977, p. 277-280.
- Leung C.F., Lee F.H., Yet N.S. – « Centrifuge model study on pile subject to lapses during installation in sand ». *Int. Journal of Physical Modelling in Geotechnics (IJPMG)*, 1, 2001, p. 47-57.
- Levacher D., Garnier J., Chambon P. – « Reconstitution d'éprouvettes de sable. Appareils de pluviation ». *Revue française de géotechnique*, 67, 1994, p. 53-61.
- Leung C.F., Lee F.H., Yet N.S. – « Centrifuge model study of pile subject to lapses during installation in sand ». *Int. Journ. of Physical Modelling in Geotechnics*, 1, 2001, p. 47-57.
- Luong M.P. – *Similitude dans les essais rhéologiques*. Thèse de doctorat, 2^e partie, 1964, 22 p.
- Luong M.P., Rivière J. – « Sols argileux normalement consolidés reconstitués par gradient hydraulique ». *Revue française de géotechnique*, 87, 1999, p. 71-74.
- Lynch R.J., Treadaway A.C.J., Bailey G., Bolton M.D., Chandler S.G., Collison C.H., Sentenac P., Garrett J.A., Santos C.A., Silva M.A.G. – « Fibre-optic photometric probes for tracking groundwater pollutant tracers in geotechnical centrifuge studies ». *Int. Symp. on Phys. Model. and Testing in Env. Geot.*, Garnier et al. (Ed.), 2000, p. 35-42.
- Madabhushi S.P.G., Schofield A.N., Lesley S. – « A new Stored Angular Momentum (SAM) based earthquake actuator ». *Centrifuge 98*, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1998, p. 111-116.
- Mandel J. – « Essais sur modèles réduits en mécanique des terrains – Étude des conditions de similitude ». *Revue de l'industrie minière*, 44 (9), 1962, p. 1-10.
- Mandel J., D'escartha Y., Halphen B., Habib P., Luong M.P., Zarka J. – « Theoretical and experimental study of the stability of underground cavities ». *Symp. franco-polonais*, Nice, 1975, p. 225-270.
- McVay M.C., Zhang L., Han S., Lai P. – « Experimental and numerical study of laterally loaded pile groups with pile caps at variable elevations ». *Transp. Research Record 1736*, Paper n° 00-1409, 2000, p. 12-18.
- Merrifield C.M., Davies M.C.R. – « A study of low-energy dynamic compaction : field

- trials and centrifuge modelling ». *Géotechnique*, 50, 2000, p. 675-681.
- Mikasa M., Takada N., Yamada K. – « Centrifugal model test of a rockfill dam ». *Proc. 7th ICSMFE*, 2, 1969, p. 325-333.
- Mitchell R.J., Knight M.A., Benson K.D. – « Centrifuge short course for geoenvironmental learning ». *Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule, Garnier et al. (Ed.), 2000, p. 353-359.
- Ng Y.W., Lee F.H., Yong K.Y. – « Development of an in-flight sand compaction piles (SCPs) intaller ». *Centrifuge 98*, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1998, p. 837-843.
- Nomoto T., Inamura S., Hagiwara T., Kusakabe O., Fujii N. – « Shield tunnel construction in centrifuge ». *J. of Geotech. & Geoenv. Eng.*, ASCE, 125 (4), 1999, p. 289-300.
- Okamura M., Matsuo O., Tamoto S. – « A high rate image acquisition system for dynamic centrifuge tests ». *Int. Journ. of Physical Modelling in Geotechnics*, 1, 2001, p. 71-76.
- Pan S.S., Pu J.L., Yin K.T., Liu F.D. – « Development of pile driver and load set for pile group in centrifuge ». *Geotechnical Testing Journal*, 22 (4), 1998, p. 317-323.
- Pantazidou M., Abu-Hassanein Z.S., Riemer M.F. – « Centrifuge study of DNAPL transport in granular media ». *J. of Geotech. & Geoenv. Engin.*, ASCE, 126 (2), 2000, p. 105-115.
- Phillips E. – *De l'équilibre des solides élastiques*. Comptes rendus à l'Académie des sciences, Paris, 68, janvier-juin 1869.
- Pilot G. – *Centrifugation de modèles réduits d'ouvrages en terre et de fondations*. Rapport de recherche LCPC, 48, octobre 1975, 41 p.
- Pincet B., Blondeau F., Queyroi D., Pilot G. – « Study by centrifugation of a fill on soft clay ». *Proc. Int. Symp. on Soft Clay*, Bangkok, 1977, p. 527-546.
- Pincet B., Queyroi D., Blondeau F., Pilot G. – « Centrifugal testing of an embankment on soft clays ». *Bull. des LPC*, n° spécial VI, 1978, p. 195-205.
- Pokrovskii G.I. – « On the application of centrifugal force for the study of equilibrium of soil ». *J. of Technical Physics*, Moscow, 3, 1933, p. 537-539 (in Russian).
- Pokrovskii G.I., Fyodorov I.S. – *Centrifugal model testing in the construction industry*. Niedra Publishing House, Moscou, English translation by BRE, 1, 1975a, 173 p.
- Pokrovskii G.I., Fyodorov I.S. – *Centrifugal model testing in the construction industry*. Niedra Publishing House, Moscou, English translation by BRE, 2, 1975b, 195 p.
- Pol'shin D.E., Runitski N.Y., Chizhikov P.G., Yakovleva T.G. – « Centrifugal model testing of foundation soils of building structures ». *Proc. 8th ICSMFE*, 1.3, 1973, p. 203-208.
- Puech A. – *De l'influence de la compressibilité sur la force portante limite des fondations profondes*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 1975.
- Ragneau E., Aribert. – « Solutions analytiques pour les trémies coniques à la base de cellules cylindriques en phase de remplissage ». *AITBTP*, 526, Série 348, 1994, p. 0-115.
- Ramberg H. – « Experimental study of gravity tectonics by means of centrifuged models ». *Bul. Geol. Inst. Univ. of Uppsala*, 42, 1963, p. 1-97.
- Rahman Z., Takemura J., Kouda M., Yasumoto K. – « Experimental study on deformation of soft clay improved by low replacement ratio SCP under back-filled caisson loading ». *Soils & Foundations*, 40 (5), 2000, p. 19-35.
- Remaud D. – *Pieux sous charges latérales : étude expérimentale de l'effet de groupe*. Thèse de Doctorat de l'université de Nantes, 1999, 328 p.
- Rocha M. – « Conditions de similitude dans l'étude sur modèle de problèmes de mécanique du sol ». *Annales ITBTP*, 1955, p. 86.
- Sabourault P., Defauchy J., Mariotti C., Siboni S. – *Simulateur de chocs*. INPI, Paris, 1999, 13 p.
- Saint-Guilhem R. – *Les principes généraux de la similitude physique*, Collection de l'ANRT, Eyrolles, 1971, 103 p.
- Sassa S., Sekiguchi H. – « Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge ». *Géotechnique*, 49 (5), 1999, p. 621-638.
- Schofield A.N. – « Cambridge geotechnical centrifuge operations ». *Géotechnique*, 20, 1980, p. 227-268.
- Schofield A.N. – « Dynamic and earthquake geotechnical centrifuge modelling ». *Proc. Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Univ. Missouri-Rolla, 3, 1981, p. 1081-1100.
- Schmidt B. – « Discussion of Ko-OCR relationship in soils ». *Journal of Geot. Engineering*, 109 (6), 1983, p. 866-867.
- Sharma J.S., Bolton M.D. – « Centrifugal and numerical modelling of reinforced embankments on soft clay installed with wick drains ». *Geotextiles et Geomembranes*, 19, 2001, p. 23-44.
- Shen C.K., Li X.S., Ng C.W.W., Van Laak P.A. – « Development of a geotechnical centrifuge in Hong Kong ». *Centrifuge 98*, Kimura et al. (Ed), Balkema, 1998, p. 13-18.
- Sieffert J.G., Levacher D. – « Étude de l'effet d'échelle de pieux battus en cours de centrifugation ». *Revue française de géotechnique*, 1995, 10, p. 55-68.
- Springman S., Laue J., Boyle R., White J., Zweidler A. – « The ETHZ Zurich geotechnical drum centrifuge ». *Int. Journ. of Physical Modelling in Geotechnics*, 1, 2001, p. 59-70.
- Stewart D.P., Boyle R.S., Randolph M.F. – « Experience with a new drum centrifuge ». *Centrifuge 98*, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1998, p. 35-40.
- Szucs E. – *Similitude and modelling*, Elsevier, Amsterdam, 1980, 335 p.
- Takada N., Oshima A. – « Comparison between field and centrifuge model tests of heavy damping ». *Centrifuge 94*, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 337-342.
- Takemura J., Kondoh M., Esaki T., Kouda M., Kusakabe O. – « Centrifuge model tests on double propped wall excavation in soft clay ». *Soils & Foundations*, 39, 3, 1999, p. 75-87.
- Taylor D.W. – *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley, New York, 1948, 650 p.
- Taylor R.N. – *Geotechnical centrifuge technology*. Chapman & Hall, 1995, 296 p.
- Taylor R.N., Grant R.J., Robson S., Kuwano J. – « An image analysis system for determining plane and 3-D displacements in soil models ». *Centrifuge 98*, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1998, p. 73-78.
- Ternet O. – *Reconstitution et caractérisation des massifs de sable : application aux essais en centrifugeuse et en chambre de calibration*. Thèse de doctorat, Université de Caen, 1999, 184 p.
- Theriault J.A., Mitchell R.J. – « Use of a modelling centrifuge for testing clay liner compatibility with permeants ». *Can. Geotech. J.*, 34, 1996, p. 71-77.
- Thomas J., Fahey M., Jewell R.J. – « Pile down-drag due to surface loading ». *Centrifuge 98*, Tokyo, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 5, 1998, p. 507-512.
- Thorel L., Garnier J., Piau S., Haza E. – « Cleopatre : a data base on centrifuge physical modelling ». *Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule, Garnier et al. (Ed.), 2000, p. 369-377.
- Titi H.H., Mohammed L.N., Tumay M.T. – « Miniature cone penetration tests in soft and stiff clay ». *Geotechnical Testing Journal*, 23 (4), 2000, p. 432-443.
- Ueno K. – « Methods for preparation of sand samples ». *Centrifuge 98*, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 2, 2000, p. 1047-1055.
- Vaid Y.P., Sivatha Yalan S., Stedman D. – « Influence of specimen-reconstituting method on the undrained response of sand ». *Geot. Testing Journal*, 22, n° 3, 1999, p. 187-195.
- Vaschy A. – *Annales télégraphiques*, 1892, p. 25-28 et p. 189-211.
- Watson P.G., Randolph M.F. – « Torsional vane and plate load test ». *Centrifuge 98*, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1, 1998, p. 167-173.
- Wilson W.W. – *Communication personnelle*, 2001.
- Zhang L., McVay M.C., Lai P. – « Centrifuge modelling of laterally loaded single battered piles in sands ». *Can. Geotech. J.*, 36, 1999, p. 1074-1084.
- Zelikson A., Bergues J. – « Essais sur modèles réduits utilisant une centrifugeuse pour représenter l'action d'une explosion profonde dans une roche sur une cavité voisine ». *Proc. 6th Int. Symp. Military Applications of Blast Simulation*, 1979, 3 p.
- Zelikson A., Leguay P. – « Simulation sismique sur centrifugeuse ». *XIth ICSMFE*, San Francisco, Balkema, 1985, p. 955-958.
- Zelikson A., Raines D.D., Malalei P. – « Design and limitations of a pile driving robot ». *Centrifuge 94*, Singapore, Leung et al. (Ed.), Balkema, 1994, p. 467-472.

