



**HAL**  
open science

## Mesures en macrogravité sur modèles réduits d'ouvrages géotechniques

Luc Thorel, Gérard Rault, Jacques Garnier, Carol Murillo, Patrick Gaudicheau, Alain Neel, Claude Favraud

### ► To cite this version:

Luc Thorel, Gérard Rault, Jacques Garnier, Carol Murillo, Patrick Gaudicheau, et al.. Mesures en macrogravité sur modèles réduits d'ouvrages géotechniques. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2008, 273, pp 93-131. hal-00376812

**HAL Id: hal-00376812**

**<https://hal.science/hal-00376812v1>**

Submitted on 20 Apr 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Mesures en macrogravité sur modèles réduits d'ouvrages géotechniques

Luc THOREL\*  
Gérard RAULT  
Jacques GARNIER  
Carol MURILLO  
Patrick GAUDICHEAU  
Alain NÉEL  
Claude FAVRAUD  
*LCPC, RMS, Nantes, France*

## ■ RÉSUMÉ

Après une brève description historique des moyens de mesure utilisés en centrifugeuse géotechnique, cet article dresse un panorama des mesures réalisées sur les modèles réduits d'ouvrages géotechniques testés dans la centrifugeuse du LCPC depuis plus de vingt ans. Le modèle réduit est instrumenté de capteurs devant supporter un champ de macrogravité égal à 100 fois l'accélération de la pesanteur terrestre, généré par la rotation de la centrifugeuse. Le bon fonctionnement des capteurs dans des conditions où leur poids est augmenté n'est jamais garanti. Pour ce faire, des procédures de vérification des capteurs sont adaptées à la macrogravité. Les capteurs utilisés proviennent soit du commerce et sont alors adaptés aux conditions d'essai, soit d'un développement spécifique associé à une méthode adaptée à la macrogravité (mesures optiques ou non destructives, capteurs miniaturisés). Dans tous les cas une veille technologique et une réflexion métrologique sont nécessaires. Sont exposés dans cet article les spécificités des équipements assurant les mesures (chaînes d'acquisition, capteurs), ainsi que les essais miniaturisés réalisés en cours de rotation (pénétromètre, scissomètre, pressiomètre, T-Bar, FWD). Certains appareillages élaborés sont présentés (téléopérateur, simulateur de séismes).

## ■ Macrogravity measurements on reduced-scale models of geotechnical structures

### ■ ABSTRACT

*Following a historical summary of the measurement techniques used on a geotechnical centrifuge, this article will offer a broad overview of the measurements performed on reduced-scale models of geotechnical structures tested in the LCPC centrifuge over the past twenty-plus years. The reduced-scale model has been fitted with sensors intended to withstand a macrogravity field, equal to 100 times the acceleration of gravity on earth, generated by centrifuge rotation. The successful operations of these sensors under conditions of increasing weight can never be guaranteed. To proceed, a set of sensor verification procedures were adapted to the macrogravity environment. The sensors introduced were either purchased, and thus adapted to test conditions, or output from a special development effort in association with a method specific to macrogravity (i.e. optical or non-destructive measurements, miniaturized sensors). In all cases, a technological monitoring and metrological assessment step proves necessary. This article will present the specificities of equipment used to conduct measurements (data acquisition systems, sensors) as well as the miniaturized tests carried out during rotation (penetrometer, vane test, pressuremeter, T-Bar, Falling Weight Deflectometer). Some of the devices produced will also be exhibited (robot, earthquake simulator).*

\* AUTEUR À CONTACTER :

Luc THOREL  
Luc.Thorel@lcpc.fr

## INTRODUCTION

Les expérimentations en centrifugeuse ont pour principe d'augmenter artificiellement la gravité sur un dispositif d'essai. Ce dernier, placé dans la nacelle pivotante fixée à l'extrémité du bras de la centrifugeuse, subit lors de la rotation de celle-ci une force centrifuge permettant de générer l'intensité de macrogravité souhaitée. Qu'il s'agisse de modélisation en centrifugeuse, c'est-à-dire d'expérimentations suivant des conditions de similitude reliant le modèle réduit à un ouvrage prototype en vraie grandeur, ou d'essais en centrifugeuse, pour tester par exemple du matériel aéronautique sous accélération, le problème de l'instrumentation est de même nature. La mesure, *l'opération permettant de passer de l'espace continu du Réel à l'espace discret du Connu* [1], doit être réalisée dans un champ de macrogravité, où tout objet voit son poids augmenté. Il convient ensuite de transmettre, si possible en temps réel, les résultats de la mesure vers un système d'acquisition de données, en ayant conditionné et numérisé le signal. De plus, pour suivre les essais, il faut assurer la transmission des données d'un repère tournant vers un repère fixe où se trouve l'opérateur.

## PRINCIPE DE LA MODÉLISATION EN CENTRIFUGEUSE

La modélisation en centrifugeuse d'ouvrages géotechniques sur modèle physique s'appuie sur le respect de relations de similitude (e.g. [2-3]) qui relient le modèle (réduit), placé dans un champ de macrogravité, au prototype (en vraie grandeur) que l'on cherche à simuler. C'est une méthode aujourd'hui répandue [4] qui permet de réaliser des études paramétriques, de mener éventuellement les ouvrages à la rupture et d'obtenir des données qui peuvent être exploitées soit pour une comparaison avec des ouvrages réels, soit pour le calage de modèles numériques. L'un des points forts de cette approche se trouve dans le respect des états de contrainte et de déformation entre deux points homologues du modèle réduit et de l'ouvrage prototype. Cette condition doit en effet être satisfaite car le comportement des sols, et plus généralement des matériaux granulaires, dépend très fortement du niveau de contrainte auquel ils sont soumis.

Les principales relations de similitude sont récapitulées dans le **tableau 1** où  $N$  représente l'intensité de la macrogravité. Par exemple, une expérimentation réalisée à  $N = 100$ , correspond à un champ de macrogravité de  $100 \times g$  et à une échelle du modèle réduit de  $1/100$ .

**tableau 1**  
*Relations de similitude.*

Longueur, déplacement	$L^* = 1/N$
Accélération centrifuge et sismique	$g^* = N$
Contrainte, pression	$\sigma^* = 1$
Déformation	$\varepsilon^* = 1$
Force	$F^* = 1/N^2$
Masse	$1/N^3$
Énergie	$1/N^3$
Impédance	1
Temps (dynamique)	$t^* = 1/N$
Fréquence	$f^* = N$
Vitesse, célérité des ondes	$v^* = 1$

L'accélération centrifuge ( $\omega^2 \cdot R$ ) dépend de la vitesse de rotation angulaire  $\omega$  et du rayon  $R$  auquel est placé le modèle. Il est intéressant de travailler avec des centrifugeuses de rayon important ( $\geq 5$  m) afin de minimiser les gradients d'accélération dans les massifs de sols modélisés. Cela permet également de travailler sur des modèles réduits assez *gros* au regard de la taille de l'instrumentation.

Pratiquement tous les types d'ouvrages géotechniques sont susceptibles d'être étudiés sur modèles réduits, comme on peut le constater en consultant les actes des congrès *Centrifuge* périodiquement organisés depuis 1988 [5-10].

## UN PEU D'HISTOIRE

La mesure sur un modèle réduit centrifugé se heurte au problème récurrent de la taille du capteur qui, une fois mis à l'échelle du prototype, peut finalement représenter un objet assez gros, pénalisant au regard de l'information à acquérir. Par exemple, un capteur de pression interstitielle miniature de 6 mm de diamètre équivaut à  $100 \times g$  à un objet de la dimension d'une roue de voiture !

L'ingéniosité des ingénieurs et des chercheurs préparant des expérimentations sur modèles réduits centrifugés doit notamment gérer le compromis entre réaliser une mesure ou ne pas la réaliser si cela risque de perturber le développement du phénomène étudié.

L'histoire de la modélisation physique en centrifugeuse [11-12] remonte aux années 1930. L'évolution des techniques expérimentales en centrifugeuse s'est faite selon un scénario lié aux moyens disponibles et au temps nécessaire au développement des appareillages. Comme le soulignait Bachelard [13], *on pourrait déterminer les différents âges d'une science par la technique de ses instruments de mesure*. Sans avoir la prétention de parler d'une science, le développement de la modélisation physique en centrifugeuse se décompose en quatre grandes périodes : celle de l'observation des modèles avant et après essai, celle des modèles instrumentés (liée au développement de l'électronique), celle de l'intervention en vol sur les modèles puis, avec l'apparition des robots, celle de l'enchaînement des interventions sans arrêt de la centrifugeuse [14].

### ■ Observations des modèles

Dans les premières expérimentations en centrifugeuse, la mesure principale consistait à observer les modèles avant et après rotation. Cela a permis par exemple de tirer des informations sur la hauteur maximale d'un barrage en terre avant rupture. Pour ce faire, le modèle réduit est soumis à une accélération centrifuge de plus en plus forte, entrecoupée d'arrêts pour observation. Pour une même hauteur du modèle, la hauteur de son prototype est ainsi accrue par l'augmentation de la gravitation.

Le chargement de fondation en vol se faisait, dans les premiers temps, par écoulement progressif de mercure sur les fondations [15 cité par 16]. Les tassements étaient indiqués automatiquement pendant ces tests par un système comprenant une amplification mécanique du mouvement et des contacts électriques ouverts ou fermés, alimentant des lumières.

### ■ Premières mesures de pression

Dans les années 1930, la pression interstitielle maximale était mesurée à l'aide d'un capteur particulier [17] : un dynamomètre aérostatique, constitué d'un tube rempli d'un fluide visqueux coloré, fermé par une membrane en caoutchouc. La hauteur à laquelle le liquide monte dans le tube capillaire immergé dans le liquide, indique la pression exercée sur l'appareil pendant l'essai. Ainsi, en fin d'essai, après arrêt de la centrifugeuse, il était possible d'accéder à la pression maximale atteinte au point de mesure. Vers 1965, le contrôle de niveaux d'eau dans la centrifugeuse est devenu possible par l'introduction, au Japon [18], d'un simple joint tournant d'air comprimé.

### ■ Photographies argentiques

La technique photographique permet d'obtenir des observations en vol qui peuvent, dans certains cas, être utilisées pour des mesures. L'appareil photographique argentique était soit placé sur le bras de la centrifugeuse (avec éventuellement un miroir sur la nacelle) et piloté à distance, soit placé dans la salle de la centrifugeuse (au plafond ou sur le mur latéral) et synchronisé avec la rotation de la centrifugeuse et un flash stroboscopique. Plusieurs dispositifs sont décrits dans les actes du congrès Centrifuge88 [5]. Un tel dispositif avait été envisagé au LCPC : une trappe amovible a été aménagée à cette fin dans le mur cylindrique de la salle de la centrifugeuse. De plus, les montants de la nacelle et le carénage arrière (offrant une large ouverture centrale) ont été conçus dans cette perspective.

La mesure de contraintes dans des structures a été étudiée dès 1935 [19] par la méthode de photo-élasticimétrie. Un appareil photo fixe et une lumière stroboscopique obtenue par arc électrique au mercure formé dans un tube, lui-même placé en vis-à-vis de l'appareil photo de l'autre côté du modèle, permettaient de suivre l'évolution de franges dans le matériau photo-élastique.

Dans le cas de la photographie de modèles de sol bidimensionnels derrière une face transparente, un traitement par stéréophotogrammétrie en faux relief était possible, afin de remonter aux déformations du modèle. Cette technique était encore utilisée en 1998 au Port and Harbour Research Institute au Japon. La photographie argentique a été remplacée par des caméras vidéo CCD (Coupled Charge Device), puis par des appareils photographiques numériques.

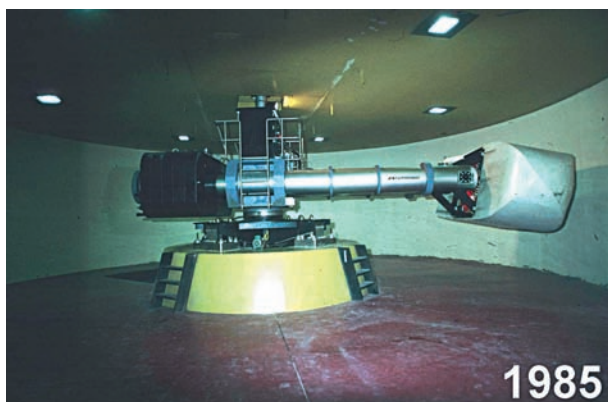
### ■ Avènement de l'électronique

Les premières expérimentations utilisant des jauges de déformations remontent aux années 1950 [20]. Les données étaient transmises du rotor vers le stator au travers de contacts tournants. Elles permirent d'ouvrir le champ des applications aux essais non destructifs [16]. Dès les débuts de la centrifugeuse du LCPC, le développement de la micro-électronique a profité aux essais sur modèle réduit. Par exemple, un appareil photographique (cinq images par seconde) et une caméra vidéo étaient embarqués dans le bras de la centrifugeuse (mais seulement pour des accélérations inférieures à  $40 \times g$ ), permettant d'observer les modèles par-dessus. Un éclairage spécial supportant  $200 \times g$  avait également été mis au point [21].

### ■ Au LCPC en 1985

La mesure à réaliser dans la nacelle pivotante de la centrifugeuse (figure 1) est transformée le plus souvent en tension et transmise à un conditionneur pour être amplifiée et numérisée, puis envoyée vers le système d'acquisition de données. La spécificité de la transmission depuis la nacelle vers le poste de commande nécessite le passage d'un repère mobile à un repère fixe. Plusieurs options sont possibles : voie hertzienne, contact tournant électrique ou contact tournant optique. Au LCPC [22] sont utilisés des contacts tournants, la transmission optique offrant d'ailleurs, depuis le début des années 2000, un débit et une qualité de signaux meilleurs que la transmission électrique.

**figure 1**  
La centrifugeuse du LCPC. Entre 1985 et 2008 des modifications sont apparues sur la centrifugeuse : la baie électronique au pivot a été doublée pour accueillir en particulier l'électronique du téléopérateur ;



1985

a | b



2008

le simulateur de séisme a nécessité l'installation d'un contrepoids supplémentaire, d'un surpresseur placé sur les contrepoids et de tuyauteries sur le bras.  
a : centrifugeuse de 1985 en rotation  
b : centrifugeuse de 2008 à l'arrêt.

Pendant les vingt premières années de la centrifugeuse LCPC, le choix s'est porté sur un système de conditionnement sur le rotor [21], au pivot, chaque voie de mesure étant transmise depuis la nacelle jusqu'aux conditionneurs par des fils électriques individualisés. Cela représentait un faisceau de câbles de 720 fils pour l'alimentation et la mesure de 100 capteurs. Les signaux, conditionnés et numérisés par les chaînes de mesure, passaient ensuite par les contacts tournants, sans risque d'altération. L'utilisation du multiplexage permet en outre le suivi d'un nombre de paramètres très supérieur à celui fixé par le nombre de contacts tournants dans le cas de liaisons directes. La liaison entre les chaînes embarquées et le calculateur du poste de pilotage nécessitait un câble coaxial et deux contacts tournants à haute fréquence (liaison aux normes IEEE428 sérialisées par deux Extenders

HP-IB 37203A). Le débit atteignait  $50 \text{ ko} \cdot \text{s}^{-1}$  pour les trente mètres de distance (1 octet étant codé sur 22 bits). Plusieurs chaînes pouvaient être mises en œuvre simultanément et quatre chaînes ont été couramment embarquées sur la centrifugeuse (**tableau 2**).

**tableau 2**  
Caractéristiques des chaînes utilisées au LCPC avant 2006, selon [21].

Chaîne	Capacité	Résolution	Cadence	Mémoire	Utilisation
HBM UPH3200	100 voies : capteurs inductifs, tension, courant, thermocouple, PT100, extensométrie (*)	$\pm 10\,000$ points	10 ou 80 voies par s		Essais quasi statiques
HBM UPM60	60 voies : extensométrie, capteurs inductifs, tension, courant, PT100, thermocouple (*)				Essais quasi statiques
HP 3852	20 voies d'extensométrie et 24 sources de tension	$\pm 4\,096$ points (CAN 12 bits plus signe et multiplexeur)	5 000 ou 100 000 voies par s		Essais cycliques à quelques dizaines de Hz
KRENTZ TRM 4010	10 voies extensibles	1 024 points (1 CAN par voie sur 10 bits)	400 000 conversions par voie et par s	2 × 8 192 octets par voie	Essais dynamiques

(\*) Les voies sont conditionnées par décades (conversion tension fréquence et multiplexage)

## CHAÎNES DE MESURES EMBARQUÉES

Depuis 2006, grâce à l'utilisation de modules d'acquisition de données Spider8 de HBM et le développement [23] du logiciel de visualisation et d'enregistrement Logarithme (Logiciel d'acquisition rapide interactif de transmission et de traitement de mesures électriques), la géométrie de la mesure a été modifiée, avec des modules de conditionnement placés au plus près de la mesure, dans la nacelle. L'intérêt est de dédier ce type de module à l'instrumentation particulière d'un essai dont on a amorcé la préparation hors centrifugeuse (exemple : suivi de pression interstitielle dans un massif d'argile en phase de préparation). Par ailleurs, le développement d'expérimentations en dynamique (chocs et sollicitations sismiques) a conduit au développement de la chaîne CAREMBA (Chaîne d'acquisition rapide embarquée).

### ■ Spider HBM/Log

Ces appareils permettent le conditionnement et la numérisation des mesures par modules de 8 voies synchrones qui peuvent être chaînés (**figure 2**). Tout type de capteur peut être conditionné : pont complet, demi-pont, source de tension, sonde de température (**tableau 3**). La fréquence d'échantillonnage peut atteindre 1 200 Hz. Des essais avec 40 voies de mesure synchrones ont pu être menés avec succès à une fréquence d'échantillonnage de 50 Hz. Des tests ont montré qu'il est possible d'effectuer ces essais avec une fréquence d'échantillonnage de 1 200 Hz.

L'application Log permet de piloter la chaîne d'acquisition depuis la salle de commande. Elle offre différentes fenêtres de visualisation en temps réel des mesures effectuées, adaptées aux expérimentations en centrifugeuse géotechnique (pénétromètre, courbe des moments d'un pieu, etc.). Elle permet d'enregistrer les mesures effectuées à la fréquence désirée, paramétrable à tout moment sous la forme d'un fichier exploitable par tableur.

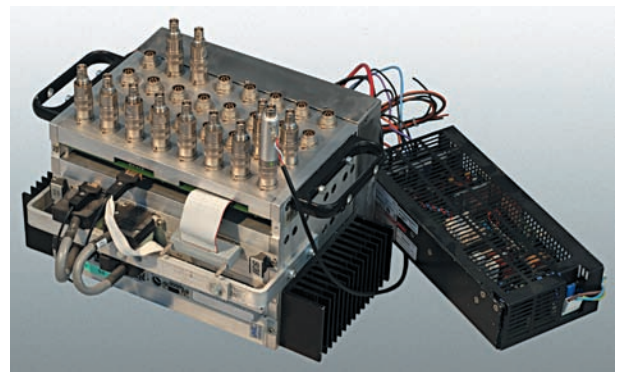
Les modules Spider sont placés dans la nacelle de la centrifugeuse et reliés par liaison parallèle à une unité centrale située au pivot de la centrifugeuse qui enregistre toutes les données. L'unité centrale, en rotation, est reliée par fibre et contact optiques à un ordinateur en salle de commande. Depuis ce dernier les données sont collectées grâce à Logarithme à la fréquence souhaitée en temps réel.

**tableau 3**  
Caractéristiques du Spider  
et de CAREMBA.

Chaîne	Capacité	Résolution	Cadence (kHz)	Mémoire	Utilisation
Spider	64 voies synchrones max. : capteurs résistifs, inductifs, température, ten- sion, courant	$\pm 25\ 000$ points	9,6 maxi.	Tampon de 20 000 mesures	Essais statiques et dynamiques jusqu'à 1 200 Hz
CAREMBA	32 voies synchrones	65 536 points (16 bits)	50 à 1 200	512 Mo	Essais dynamiques



a | b



**figure 2**  
Chaînes d'acquisition de  
données  
a : SPIDER  
b : CAREMBA.

## CAREMBA

L'acquisition de données dans une machine en rotation est soumise à la pollution électromagnétique, en particulier pour des fréquences proches de 50 Hz. Pour réduire la distance entre le capteur et le Convertisseur analogique numérique (CAN), la totalité du traitement est réalisée dans la nacelle de la centrifugeuse grâce à la chaîne CAREMBA développée par le LCPC (figure 2, [24-27]). Une liaison Ethernet permet le transfert de l'information numérique *via* le contact tournant optique. Ce dispositif utilise des cartes au standard VME (Versa Module Europa, nom d'un bus informatique industriel normalisé) utilisées dans le domaine militaire pour la mesure d'ondes acoustiques dans les sonars ou autre système de détection. Il comprend : une carte amplificateur de 32 voies à gain programmable sur chaque voie entre 42 dB et -12 dB par pas de 6 dB ; une carte de conversion équipée de 32 convertisseurs 16 bits permettant des mesures synchrones jusqu'à une fréquence d'échantillonnage de 1,2 MHz par voie ; enfin une carte PC VME sous Windows NT et un logiciel d'acquisition sous Labview permettant le réglage de chaque voie de mesure ainsi que les conditions d'acquisition, de déclenchement et de sauvegarde. Une interface de visualisation donne l'affichage dans le domaine temporel ou fréquentiel. L'ensemble des logiciels est implanté sur une carte flash 512 Mo. Une prise de contrôle à distance est réalisée par un logiciel dénommé VNC à partir d'un PC (Personal Computer ou littéralement *ordinateur personnel*) dans la salle de commande. D'une masse de 16 kg et de dimensions 21 cm  $\times$  19 cm  $\times$  35 cm, sa conception mécanique particulière permet une utilisation à 100  $\times$  g.

## ■ Enregistrement d'images

L'utilisation d'appareils photographiques argentiques est aujourd'hui abandonnée au profit des appareils numériques et des caméras vidéo. L'utilisation des caméras vidéo miniatures a été possible dès le milieu des années 1980. La technologie CCD (Charge-Coupled Device) a permis cette avancée. Aujourd'hui très répandue, elle est fondée sur la génération d'images matricielles grâce à un tableau de minicapteurs indépendants les uns des autres. Les images vidéo ont longtemps été enregistrées sur bandes magnétiques au format U-matic ou VHS (Video Home System ou système vidéo domestique) puis sur PC via une carte vidéo. Les photographies numériques sont quant à elles enregistrées sur la mémoire de l'appareil photo embarqué.

Les images d'un phénomène 2D se déroulant derrière la vitre d'un conteneur à face transparente peuvent être analysées par une technique de traitement d'image. Après de premiers travaux démarrés à la fin des années 1980 [28-29], le logiciel Picture a été développé en collaboration avec la section Traitement d'image du LCPC [30]. Il permet le suivi de marqueurs (punaises) préalablement positionnés [31] ou le suivi d'une ligne, par exemple le front de la frange capillaire dans un matériau initialement sec [32-33].

Depuis, sous l'impulsion de l'Université de Cambridge [34], la technique dite de PIV (Particle Image Velocimetry), initialement développée pour la mécanique des fluides expérimentale, a été adaptée aux expérimentations en centrifugeuse. Le PIV permet de remonter aux déplacements, à partir d'une série de photographies numériques enregistrées pendant une expérimentation sur un modèle réduit géotechnique. Les images sont comparées en s'appuyant sur un module Matlab. Le PIV permet de suivre individuellement une sélection de grains d'un massif de sable, sans utiliser de marqueur, ce qui introduit une grande souplesse d'utilisation [35].

## MESURES COURANTES

Les ouvrages géotechniques testés en modèle réduit sont toujours instrumentés afin de mesurer les déformations, les déplacements, les efforts, les pressions... Ces capteurs doivent être les plus compacts possibles pour ne pas entraver le comportement du modèle réduit. Tous les capteurs utilisés sont des capteurs électriques, c'est-à-dire des éléments d'un circuit électrique [36]. Si la grandeur est active, le capteur peut être considéré comme un générateur : il délivre immédiatement un signal, qui est une charge, une tension ou un courant [1]. Les matériaux piézoélectriques, comme le quartz, se polarisent sous l'effet d'une contrainte et permettent, par exemple, de mesurer les forces ou les accélérations. Si la grandeur est passive, le capteur électrique est équivalent à une impédance. Un circuit de conditionnement annexe, alimenté par une source extérieure, est alors nécessaire pour transformer les variations de résistance, d'inductance ou de capacité en un signal directement exploitable, par exemple en utilisant un pont d'impédance.

Les capteurs, s'ils sont étalonnés initialement par les constructeurs, subissent régulièrement des vérifications permettant de les relier aux étalons internationaux, via des capteurs de référence eux-mêmes vérifiés par le service Métrologie et Instrumentation du LCPC, ou en utilisant des dispositifs propres à la centrifugeuse. Les vérifications sont effectuées sur la centrifugeuse, dans les conditions des essais qui seront réalisés afin de prendre en compte tous les éléments de la chaîne de mesure (capteur, chaîne d'acquisition, longueur de câble, conditionneurs, transmission des données jusqu'en salle de commande). Une courbe reliant grandeur physique et grandeur électrique est disponible pour chaque capteur.

Le choix des capteurs suit les évolutions technologiques et les besoins accrus des expérimentateurs, tout en conservant les solutions robustes.

Bien que le milieu dans lequel sont placés les capteurs soit soumis à un champ de macrogravité augmentant le poids de tous les corps qui lui sont soumis, l'évaluation des incertitudes de mesure se fait selon les méthodes classiques utilisées au laboratoire (e.g. [37]).

### ■ Parc de capteurs

Le parc des capteurs utilisés en centrifugeuse (tableau 4) est suivi minutieusement depuis la mise en service de celle-ci en 1985. Plusieurs systèmes de suivi ont été successivement utilisés : cartes individuelles de capteur, classeurs contenant les spécifications du constructeur de chaque capteur. Les moyens informatiques actuels ont permis, au fur et à mesure, de faire évoluer le recensement et la classification de l'instrumentation : tableaux Excel et, depuis 2001, la base de données développée au LCPC via le progiciel OPTIMU (Outil pour le traitement informatique de moyens de mesure usuels), selon une procédure qualité [38]. Accessible seulement par une personne qualifiée (le correspondant métrologie), cette base contient toutes les informations relatives à la vie de chaque capteur. Actuellement, la section Mécanique des Sols et Centrifugeuse dispose d'un parc de près de 250 capteurs.



**tableau 4**  
*Parc des capteurs utilisés  
dans les modèles réduits  
centrifugés.*

Grandeur	Principe	Nombre de capteurs et étendue de mesure	Marque
Force (traction et compression)	À jauges de type galettes à bras cisailés, à membrane ou en S	44 capteurs (250 N à 50 kN)	TME, ENTRAN, FGP, SCHAEWITZ
	Dédié pénétromètre	250 N à 5 000 N	
Déplacement	Inductif Potentiométrique Laser Potentiométrique à fil	94 capteurs (10 à 400 mm)	ENERTEC, HBM, MCB, PENNY & GILES, SENSO-REX, SFERNICE, TME, TWK, WENGLOR
Rotation	Potentiométrique	10 (0 à 350°)	MCB
Pression	Interstitielle	63 capteurs (35 kPa, 100 kPa, 350 kPa et 700 kPa)	DRUCK, ENERTEC, ENTRAN, GEOKON, KYOWA, NSC, SCHLUMBERGER, TELLER
	Autres fluides	1 MPa et 35 MPa	
	Dédié pressiomètre	3 à 5 MPa	
Pression des terres	Mesure directe (jauges)	6 capteurs 0 à 500 kPa	KYOWA
	Mesure indirecte (piézo)	2 capteurs 0 à 300 kPa	CECP
Température	Sonde résistive	10 PT100	
Accéléromètre	Piézoélectriques	12 Mono-axe PCB 3 à 10 000 Hz 3 Tri-axe ENDEVCO 20 à 20 000 Hz	ENDEVCO, PCB
Couple-mètre		1 (50 N·m)	FGP
	Dédié scissomètre	1 (0,25 N·m)	FGP
Caméra CCD		752 × 582 pixels	SONY XC-999P JAI M10
		500 × 582 pixels	I2S IVC562BR

## ■ Force

Les capteurs de force (traction/compression) sont essentiellement de type galette ( $\varnothing$  100 ou 60 mm). Leur géométrie permet de les adapter sur les vérins utilisés pour le chargement des modèles. On trouve également quelques capteurs *en S*, notamment utilisés pour les essais à la boîte de cisaillement, ou adaptables dans les outils du téléopérateur. D'autres, de petite taille ( $\varnothing$  8 ou 12 mm, essentiellement en compression), de gamme 250 N à 5 kN pour le pénétromètre et 18 mm (compression et traction) jusqu'à 5 kN sont disponibles pour des montages particuliers. Plusieurs capteurs réalisés à partir de cahiers de charges précis sont devenus chez certains fournisseurs des *produits sur étagère*. La technologie utilisée pour tous ces capteurs est de type jauges d'extensométrie montées en pont complet.

Les capteurs de force sont vérifiés régulièrement suivant les besoins selon un procédé original : une masse adaptée à l'étendue de mesure du capteur est suspendue à ce dernier selon un montage mécanique simple installé dans la nacelle. Ensuite, une variation de l'accélération de la centrifugeuse permet d'obtenir plusieurs points de mesure (valeurs électriques) afin de tracer la droite d'exploitation du capteur. Les masses sont elles-mêmes vérifiées et reliées aux étalons internationaux.

## ■ Accélération

L'accélération particulière est mesurée à l'aide de capteurs piézoélectriques. La piézoélectricité [39] est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une charge mécanique (effet direct) et de se déformer lorsqu'un champ électrique leur est appliqué (effet inverse). De nombreux capteurs utilisent des céramiques piézoélectriques : capteurs de force ou de pression, hydrophones, géophones et accéléromètres. Cette propriété est exploitée sur certains

capteurs pour mesurer l'accélération générée par la propagation d'ondes dans les sols. Avec le développement de l'activité *simulation de séismes*, la section s'est équipée d'accéléromètres et de conditionneurs associés : soit émetteurs de charge (dans le cas des chocs), soit à électronique intégrée (dont la dynamique est réduite, mais suffisante). Le choix des capteurs est délicat pour la mesure des accélérations horizontales car la force centrifuge sollicite la masse d'inertie du capteur.

## ■ Déplacement

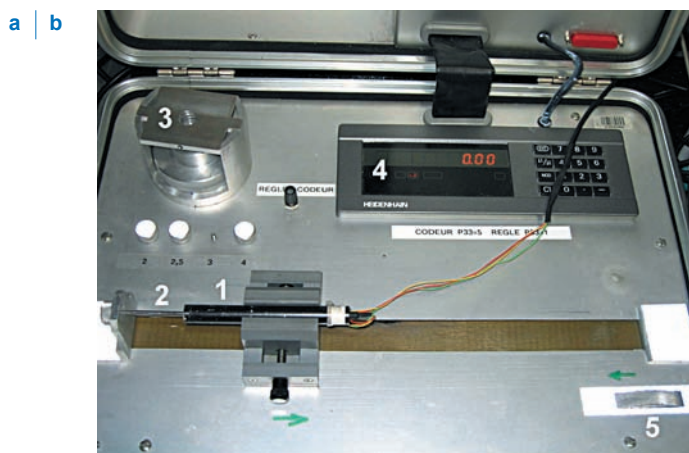
La majorité des capteurs de déplacement sont de type potentiométrique ou inductif. Les étendues de mesure sont de 0-25 mm à 0-40 mm pour les capteurs potentiométriques, et  $\pm 5$  mm à  $\pm 35$  mm pour les capteurs inductifs. Certains dispositifs d'essais (servovérins, pénétromètre, ...) intègrent leurs propres capteurs. Le choix d'un capteur s'appuie sur l'étendue de mesure et la résolution, ainsi que sur des considérations ayant trait à l'environnement de mesure, comme par exemple la possibilité d'immerger les capteurs.

Les mesures de déplacement avec contact, les plus simples à réaliser, nécessitent l'application d'une petite force de contact. Si l'intensité de cette force est faible (poids propre du palpeur de capteur ou frottement interne du noyau) vis-à-vis d'un chargement de compression (cas des pieux sous charge latérale), elle apparaît non négligeable dans d'autres cas (exemple de l'excavation devant une paroi de soutènement). Des capteurs laser, utilisés lors de ces essais, sont sans contact, de type actif, et nécessitent une alimentation externe (18 V à 30 V). Les plages de mesure actuellement disponibles sont de 50 mm à des fréquences de 100 à 1 000 Hz.

### › Vérification, la valise LCPC

La vérification s'effectue sur la centrifugeuse en incluant toute la chaîne de mesure. On utilise pour ce faire une valise test (étalonnée annuellement par le Service Métrologie et Instrumentation du LCPC) équipée d'un capteur linéaire Heidenhain ND221 0-300 mm et d'un codeur 360 degrés.

La valise (**figure 3a**), qui permet la vérification de tous les capteurs de déplacement, est placée dans la nacelle de la centrifugeuse. Le corps du capteur est maintenu sur la règle par une pince mobile, sa tige vissée sur un élément fixe en bout de règle (**figure 3b**). Le capteur est raccordé à la chaîne d'acquisition placée elle aussi dans la nacelle. On déplace le corps du capteur en agissant sur la molette et le déplacement s'affiche sur l'écran digital (**figure 3b**). La valeur électrique du capteur est ainsi lue en salle de commande sur l'ordinateur relié à la chaîne d'acquisition, ce qui permet de tracer la courbe d'exploitation.



**figure 3**

Valise de vérification des capteurs de déplacement.

a : vue d'ensemble

b : capteur testé (1) et sa tige (2),

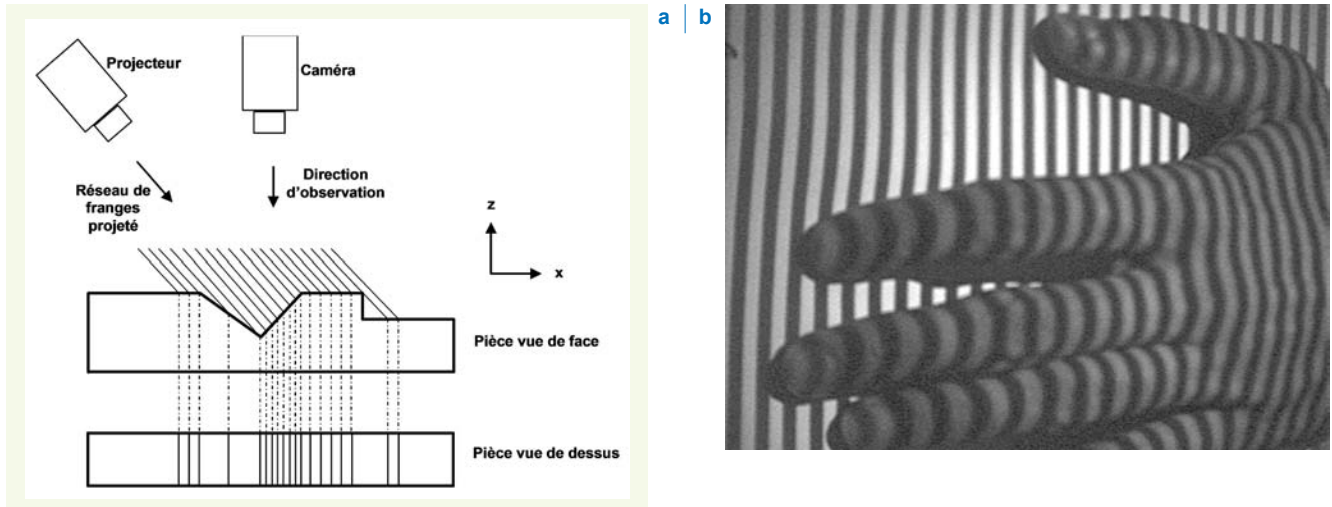
codeur 360 degrés pour capteurs rotatifs (3), écran digital (4),

molette de déplacement de la règle (5).

### › Lumière structurée

Cette technique [40] repose sur le principe de la triangulation. Elle consiste à projeter l'image d'un réseau de lignes sur l'objet à contrôler, puis à observer cet objet depuis un point faisant un angle non nul par rapport à la direction du faisceau projeté. L'équipement standard est composé d'un projecteur (émetteur), d'une caméra ou d'un appareil photographique (récepteur) et d'un ordinateur pour le traitement des données (figure 4a). Dans ces conditions d'éclairage et d'observation, la distribution des franges créées sur l'objet est directement liée à sa forme (figure 4b). Cette distribution est modifiée par un mouvement ou une déformation de l'objet.

**figure 4**  
a : schéma de principe de la lumière structurée  
b : images de franges sur une main.



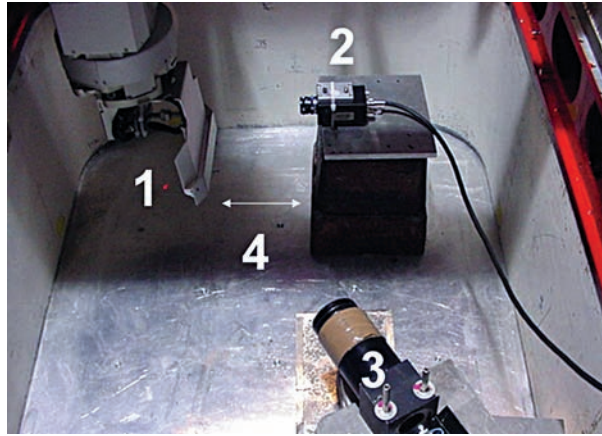
Si  $T$  est le pas du réseau projeté et  $\alpha$  l'angle entre le projecteur et la caméra, dans le cas particulier d'une translation d'un objet de  $\Delta z$ , la relation entre le déplacement de franges et le mouvement de l'objet se résume à  $\Delta z = \Delta x / \tan \alpha$ . Pour un déplacement  $\Delta x$  inférieur au pas  $T$  du réseau, la différence de phase  $\Delta \varphi$  en radian entre deux positions est telle que  $\Delta x = \Delta \varphi \cdot T / 2\pi$ . La relation entre la translation  $\Delta z$  d'une plaque et la variation de phase  $\Delta \varphi$  des franges observées peut être transposée à toute déformation ou forme d'objet. La grandeur à déterminer est donc ce terme de phase associé à chaque point.

Deux méthodes permettent de déterminer avec précision la phase optique pour chaque pixel de la caméra : le décalage de phases et l'analyse par transformée de Fourier de l'image. Quelle que soit la méthode, la différence de phase ainsi mesurée entre deux états d'un objet est directement fonction de la déformation de celui-ci et des caractéristiques géométriques du montage. Un calibrage rigoureux est nécessaire. Il donnera les correspondances  $(\varphi, N_i, N_j) \Leftrightarrow (X, Y, Z)$  où  $N_i$  et  $N_j$  sont les positions en pixel dans le plan du capteur CCD de la caméra et  $(X, Y, Z)$  les coordonnées en unité métrique du point à mesurer.

Des essais de faisabilité [41] ont été réalisés en appliquant à un objet des déplacements connus pour différents niveaux d'accélération centrifuge (jusqu'à  $50 \times g$ ). L'objet étudié était une pelle plate (figure 5) pilotée en translation (résolution  $10 \mu\text{m}$ ) et rotation par le téléopérateur.

La phase a été calculée en utilisant la technique de Fourier pour chaque point de l'image, puis moyennée sur la surface totale de l'image de franges. La mesure de déplacement de la pelle est calculée à partir de la phase moyenne (tableau 5). Les résultats ne sont pas influencés par le niveau d'accélération centrifuge. L'utilisation de la lumière structurée en centrifugeuse semble ainsi prometteuse, sous réserve de développer un appareillage plus compact. Pour des déplacements de  $100$  à  $1\,900 \mu\text{m}$ , la répétition de mesures de déplacement donne des résultats proches de la consigne au pour cent près, et un rapport écart type sur valeur moyenne inférieur à  $3\%$ .

**figure 5**  
Dispositif d'essai de lumière structurée embarqué dans la centrifugeuse. On voit sur la photo le téléopérateur (1), la caméra (2), le projecteur de franges (3), la translation de la pelle (4).



**tableau 5**  
Effet de l'accélération sur les mesures de translation de la pelle par lumière structurée.

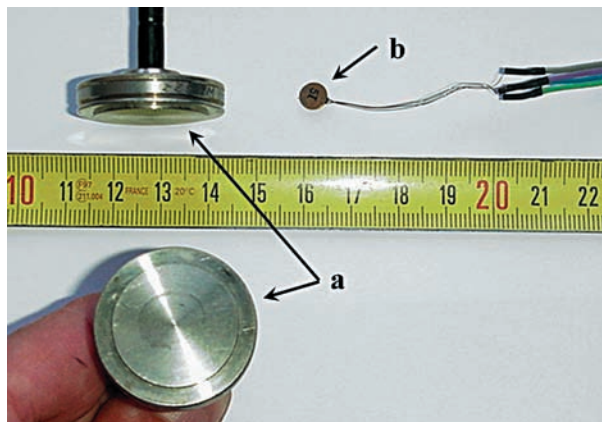
	Accélération ( $\times g$ )					Moyen	Ecart type	
	50	40	20	5	1			
	Déplacement ( $\mu m$ )							
Programmé	Mesuré							
50	40	35	47	48	48	44	11	
100	96	99	100	98	100	99	3	
400	390	395	402	400	399	397	8	
1 000	1 021	1 000	998	1 004	1 018	1 008	20	
1 900	1 924	1 895	1 899	1 923	1 921	1 912	27	

### ■ Pression des terres ou contraintes au sein d'un massif de sol

La mesure des contraintes régnant dans les massifs de sol est délicate car le capteur constitue une hétérogénéité du fait de la différence de module avec le sol : s'il est trop rigide, le capteur concentre les chemins de contraintes et se déforme peu ; s'il est trop mou, les chemins de contrainte le contournent et la mesure est erronée. Les capteurs de contrainte se déclinent en deux familles (figure 6) :

- les capteurs à action directe où la mesure est déduite de la déformation sensible d'une membrane équipée de jauges ; ces capteurs ont l'avantage d'être très petits (6 mm de diamètre et 6/10 d'épaisseur pour des gammes de 0 à 500 kPa), mais difficilement positionnables avec précision dans la direction de la contrainte à mesurer (influence des câbles, etc.) ;
- les capteurs à action indirecte, où la partie sensible est une cellule cylindrique précontrainte remplie d'un liquide incompressible ; la pression est transmise par un capillaire à un capteur électrique déporté ; pour une utilisation en centrifugeuse, la dimension de ces capteurs est comprise entre 30 et 65 mm et leur épaisseur n'excède pas 9 mm (étendues de mesure de 0 à 500 kPa).

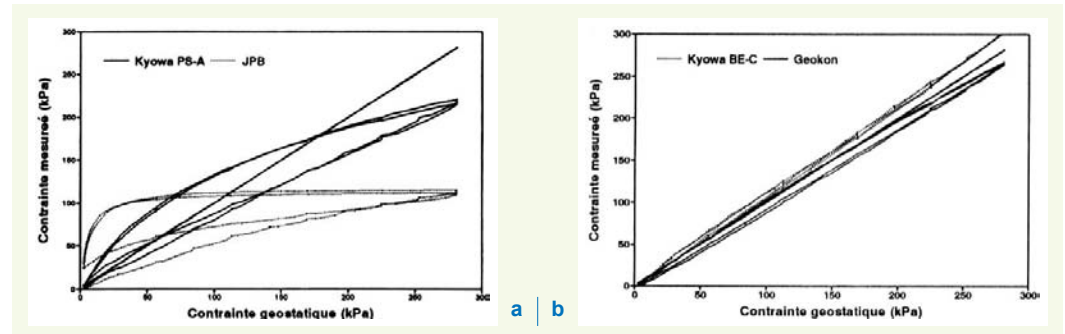
**figure 6**  
Exemple de capteurs miniatures de pression totale Kyowa à action directe (a) ou indirecte (b).



Placés dans un fluide, ces capteurs présentent des comportements très satisfaisants. Cependant, dans un massif de sol (sable de Fontainebleau par exemple), on note un comportement différent :

- les capteurs à action directe présentent une sévère non-linéarité affectée d'une forte hystérésis (**figure 7a**) ;
- les capteurs à action indirecte présentent une bonne linéarité, avec quelquefois une légère hystérésis (**figure 7b**) ; les valeurs sont estimées à  $\pm 10\%$ .

**figure 7**  
Réponse type de capteurs de pression des terres [42]  
a : à action directe  
b : à action indirecte.



Toutes ces observations, déjà analysées par V. Askegaard [43-44], avaient abouti à la définition d'un capteur à action indirecte. Il était principalement recommandé de respecter une très grande raideur, ce qui se traduisait par trois exigences, à savoir :

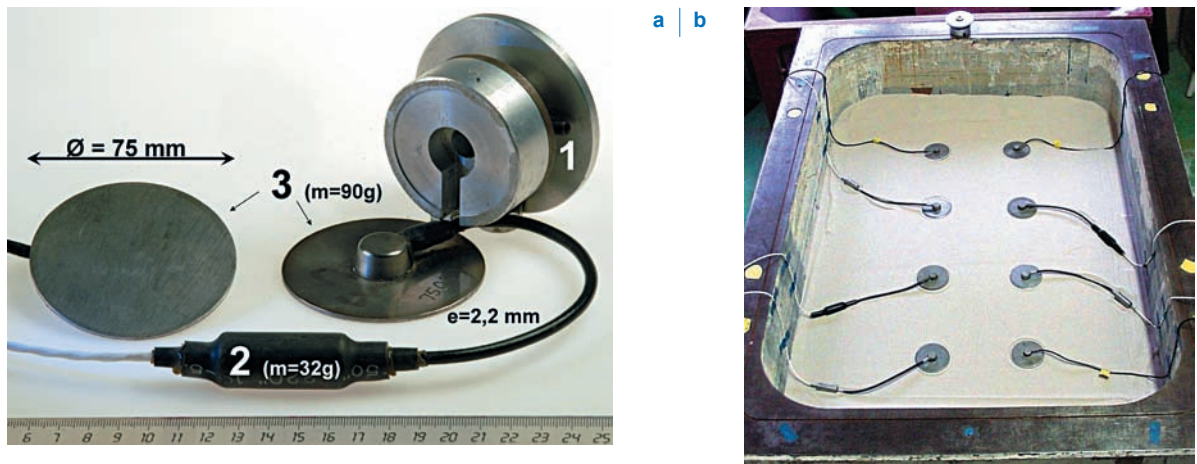
- une déflexion de la surface sensible inférieure à  $1\ \mu\text{m}$  sous  $100\ \text{kPa}$  ;
- un rapport entre la surface sensible et la surface totale proche de 1 ;
- une surface de contact sol-capteur permettant de respecter les deux premières exigences.

La proposition de design était accompagnée d'un mode opératoire qui mettait l'accent sur le caractère critique des conditions de pose du capteur [45].

Sur la base des acquis présentés ci-dessus, la conception et la fabrication d'un capteur de pression totale ont été confiées au CECP d'Angers [46]. Le film d'huile de silicone de  $0,2\ \text{mm}$  était emprisonné entre deux plaques circulaires en acier de  $1,5\ \text{mm}$  d'épaisseur, valeur que l'on a pu réduire ensuite à  $1\ \text{mm}$  compte tenu de l'avancée des techniques de soudure. Dans la chambre au centre du capteur est implanté un capteur électrique de pression absolue de type PA2 manufacturé par Keller : l'agent hydraulique vient alors au contact d'un diaphragme en silicium instrumenté d'un pont complet de jauges piézorésistives utilisant une technologie de micro-usinage. La phase la plus délicate de la réalisation est le remplissage sous vide du capteur avec l'huile, tout en maintenant un niveau de précontrainte de  $20\ \text{kPa}$  (initialement  $50\ \text{kPa}$ ). Le conditionneur-transmetteur est déporté (**figure 8**).

La gamme de mesure est comprise entre  $0$  et  $200\ \text{kPa}$  avec une surcharge maximale de  $300\%$ . Le capteur peut être alimenté en courant continu à  $8-28\ \text{V}$  pour un signal de sortie  $4-20\ \text{mA}$ . Destiné

**figure 8**  
Capteur de mesure des pressions des terres CECP-LCPC  
a : outil de pose (1), conditionneur-amplificateur de masse  $32\ \text{g}$  (2) capteur (3)  
b : implantation dans un massif.



aux sols de granulométrie uniforme ( $C_U < 1,5$ ), il possède un facteur de réponse en milieu pulvérulent très proche de 1.

Pour minimiser le facteur opérateur, un outil de pose a été développé qui, si la procédure d'installation, le champ d'investigation et les conditions expérimentales sont respectés, permet de garantir la répétabilité des mesures à  $\pm 5\%$  [45, 47]. À l'interface sol-structure, on observe que les capteurs de pression totale intégrés à membrane affleurante donnent des résultats fiables.

La taille des capteurs (diamètre de 75 mm) n'est pas très favorable pour une utilisation courante sur les modèles réduits centrifugés. Néanmoins, des problèmes de physique simples, tels que la répartition des contraintes sous un tas de sable de forme conique en fonction du mode de reconstitution du tas, ont pu être étudiés en centrifugeuse avec ces capteurs [48]. Il est recommandé d'utiliser ces capteurs dans des sables fins, de façon à éviter tout effet d'échelle dû au possible trop faible nombre de grains au contact du capteur. À titre d'exemple, on peut suivre les recommandations d'Ovesen [49] pour les fondations superficielles : le rapport entre le diamètre de la fondation et le diamètre moyen des grains ( $d_{50}$ ) doit être supérieur à 30.

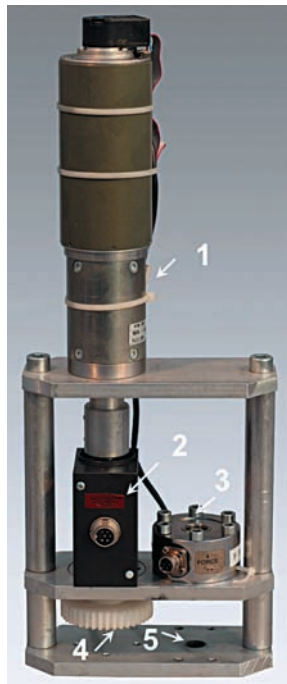
Notons que des capteurs matriciels de pression tactile (248 cellules par  $\text{cm}^2$  chez Tekscan par exemple) sont également utilisés par d'autres équipes (ETH Zurich, Suisse ou Rensselaer Polytechnic Institute, États-Unis) pour estimer des contraintes normales et leur distribution surfacique au contact entre le sol et une interface [50-51].

## ■ Couples

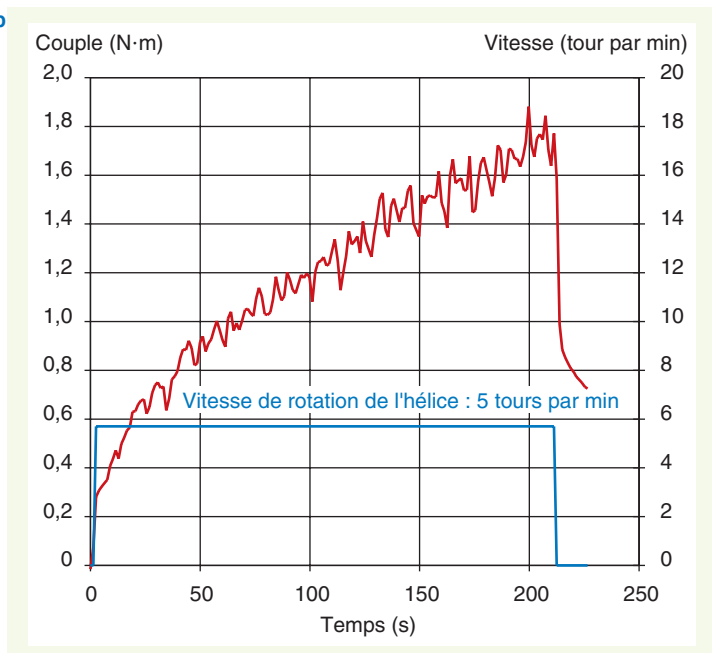
Un dispositif intégrant un moteur piloté et un couple-mètre dynamique sans contact (FGP Sensors CD 1140) a été développé [52] pour le vissage en vol de pieux à hélices, le tout étant adaptable sur la tête du servovérin SV2 (course maximale de 300 mm). Le moto-réducteur (MDP 2260 PLG 52 alimenté en 24V), équipé d'un variateur, a un encombrement  $L = 260,5$  mm et  $\varnothing = 40$  mm, une masse de 2,2 kg, une vitesse en charge de 0 à 5,2 tour par minute, un couple nominal de 24 N·m, des charges axiale et radiale admissibles de 500 N et 350 N, enfin un codeur 512 points. La carte de gestion et pilotage est positionnée dans la nacelle de la centrifugeuse. L'alimentation (12 V) du pont complet de jauges extensométriques et la mesure du couple sont transmises sans contact. Sa gamme de mesure est de 0 à 50 N·m avec une surcharge admissible de 100 N·m. Son encombrement (figure 9) est de  $145 \times 42 \times 58$  mm<sup>3</sup> et sa masse de 600 g. Un couple-mètre est également utilisé pour l'essai scissométrique.

figure 9

Couple-mètre dynamique sans contact intégré dans un dispositif d'essai de vissage de pieux à hélices  
a : moteur pilotable par variateur (1), couple-mètre dynamique (2), capteur de force (3), pignons de transmission (4), piston creux du servovérin SV2 (5)  
b : exemple de mesure du couple de vissage.



a | b



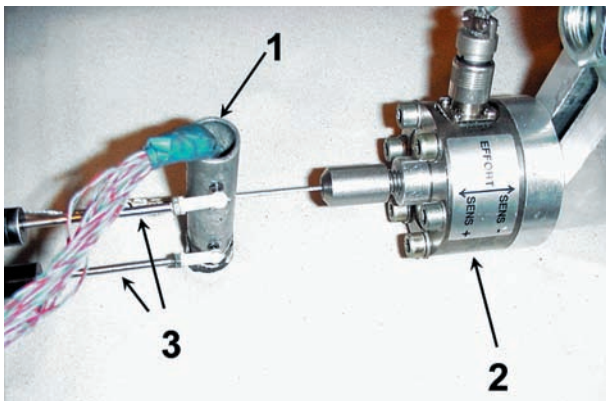
## ■ Instrumentations spécifiques

Souvent, la miniaturisation ne permet ni d'intégrer des produits manufacturés aux dispositifs existants ni de les adapter. De plus l'environnement de macrogravité est sévère (exemple : indice de protection vis-à-vis de l'immersion  $IP = 67$ ). Des instrumentations spécifiques ont donc été développées, par exemple pour étudier le comportement de fondations profondes terrestres (figure 10, e.g. [53-56]) ou off-shore [57], d'inclusions rigides [58-59] ou d'ouvrages de soutènement [60], ou encore pour quantifier les mouvements de sol générés par la construction de remblais [61].

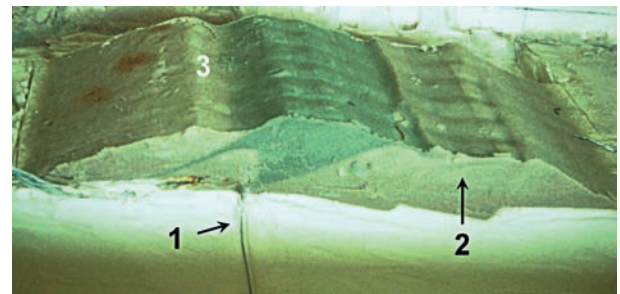
Pour les structures en flexion, outre le respect dimensionnel, on s'attache plus à respecter les similitudes sous l'aspect de la rigidité en flexion (produit  $EI$ ) que de la rigidité en compression (produit  $ES$ ), ce qui dimensionnera le corps d'épreuve (pieu tubulaire ou paroi).

La conduite de processus de construction et le suivi à court terme du comportement des ouvrages en terre sont facilités par l'usage de l'inclinométrie verticale pour évaluer les déplacements horizontaux (figure 11). Ce type d'essai transposé sur un modèle réduit nécessite l'intégration des dispositifs de mesure dans le massif de sol sans modification du comportement global de l'ouvrage. Pour ce faire, on utilise des chapelets de jauges collées sur de fines lames d'acier travaillant en flexion.

**figure 10**  
Pieu instrumenté (1) de 20 paires de jauges soumis à une charge latérale contrôlée en force (2) avec mesure des déplacements en tête (3) [53].



Ces équipements sont préalablement calibrés en flexion, compression ou torsion en intégrant toute la chaîne de mesure depuis le corps d'épreuve jusqu'au point de traitement de l'information. Leur tenue dans le temps est contrôlée, notamment en cas de conditions environnementales sévères (eau salée par exemple), ou lorsque les comportements limites sont recherchés.

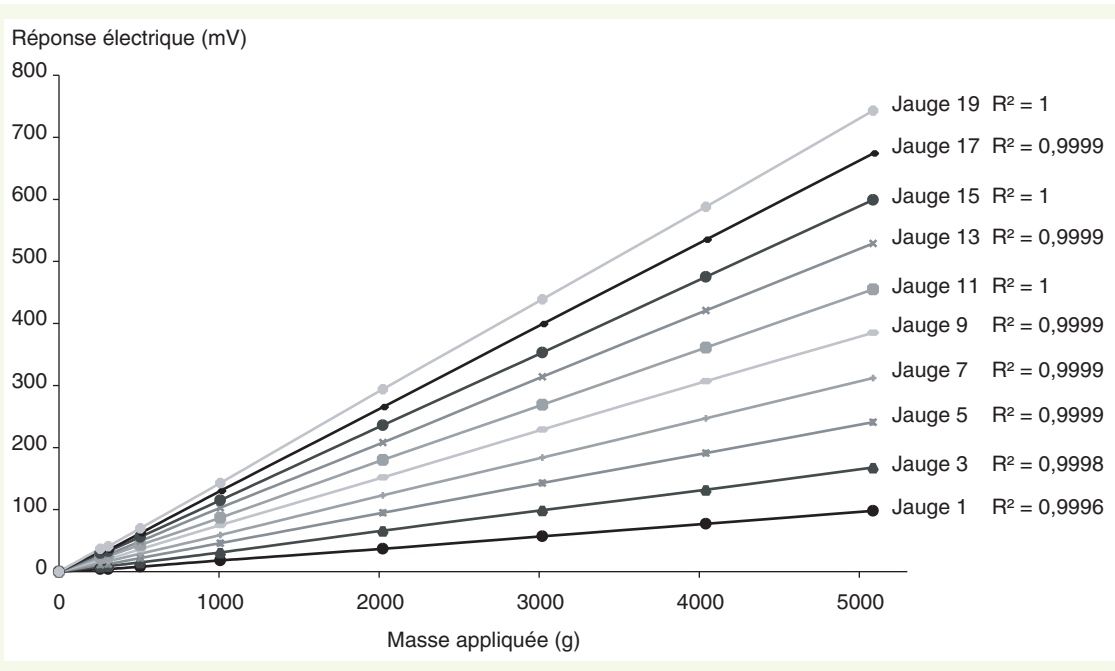


**figure 11**  
Inclinomètre vertical (1) instrumenté de 12 paires de jauges, prépositionné au pied d'un remblai [61]. On distingue le remblai principal (2) du remblai adjacent (3).

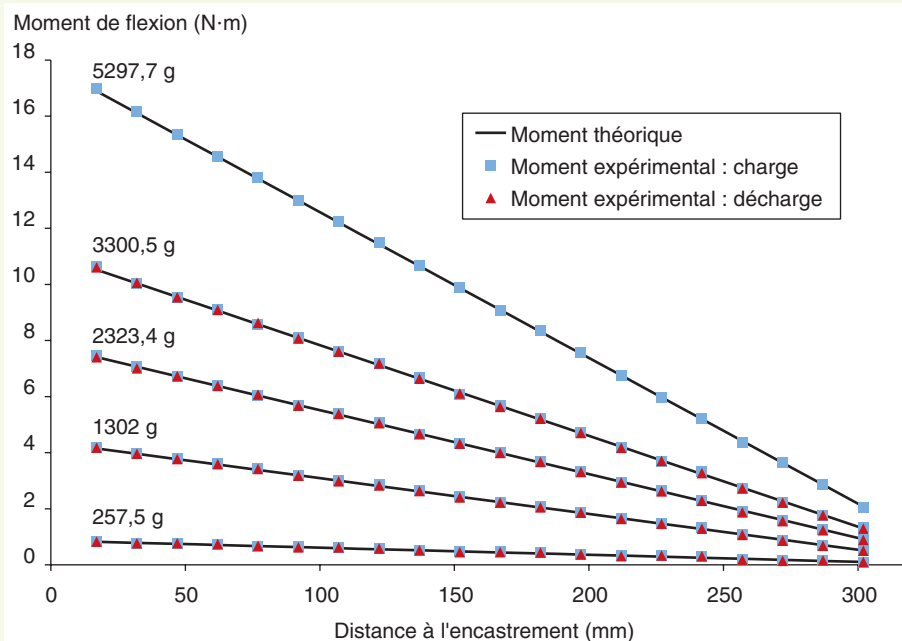
Après étalonnage des pieux instrumentés en flexion (figures 12 et 13), le traitement de l'information des mesures électriques provenant des jauges est effectué en deux étapes (figure 14).

- À l'aide des coefficients de calibration, on détermine le moment de flexion à chaque niveau de jauges et on trace en temps réel le profil des moments afin d'en suivre l'évolution et d'éviter une plastification du corps d'épreuve.
- En différé, après introduction de conditions limites, on obtient par simple et double intégration de la courbe de moments, respectivement les profils des rotations et les profils des déplacements. En utilisant une méthode de lissage rigoureuse, on obtient par simple et double dérivation respectivement les profils des efforts tranchants et ceux des réactions du sol.

Le choix est souvent conditionné par l'exiguïté des surfaces disponibles, les risques d'influence (critère de Saint-Venant) de tel ou tel équipement annexe monté sur le même corps d'épreuve (usinage, perçage, bague de serrage, etc.). Les surépaisseurs dues au passage de câbles peuvent conduire à des modifications du comportement global (en favorisant un drainage par exemple). Pour s'en affranchir dans la mesure du possible, les passages de câble se font par l'intérieur des corps d'épreuve (figure 15).



**figure 12**  
Réponse des jauges en fonction de la masse appliquée (pieu en flexion) [62].



**figure 13**  
Comparaison entre moment théorique et moment expérimental. [62].

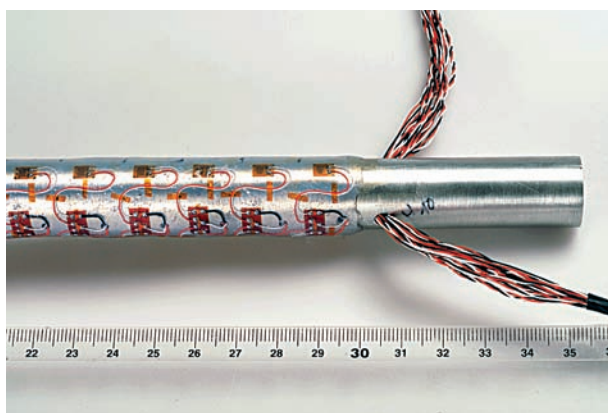
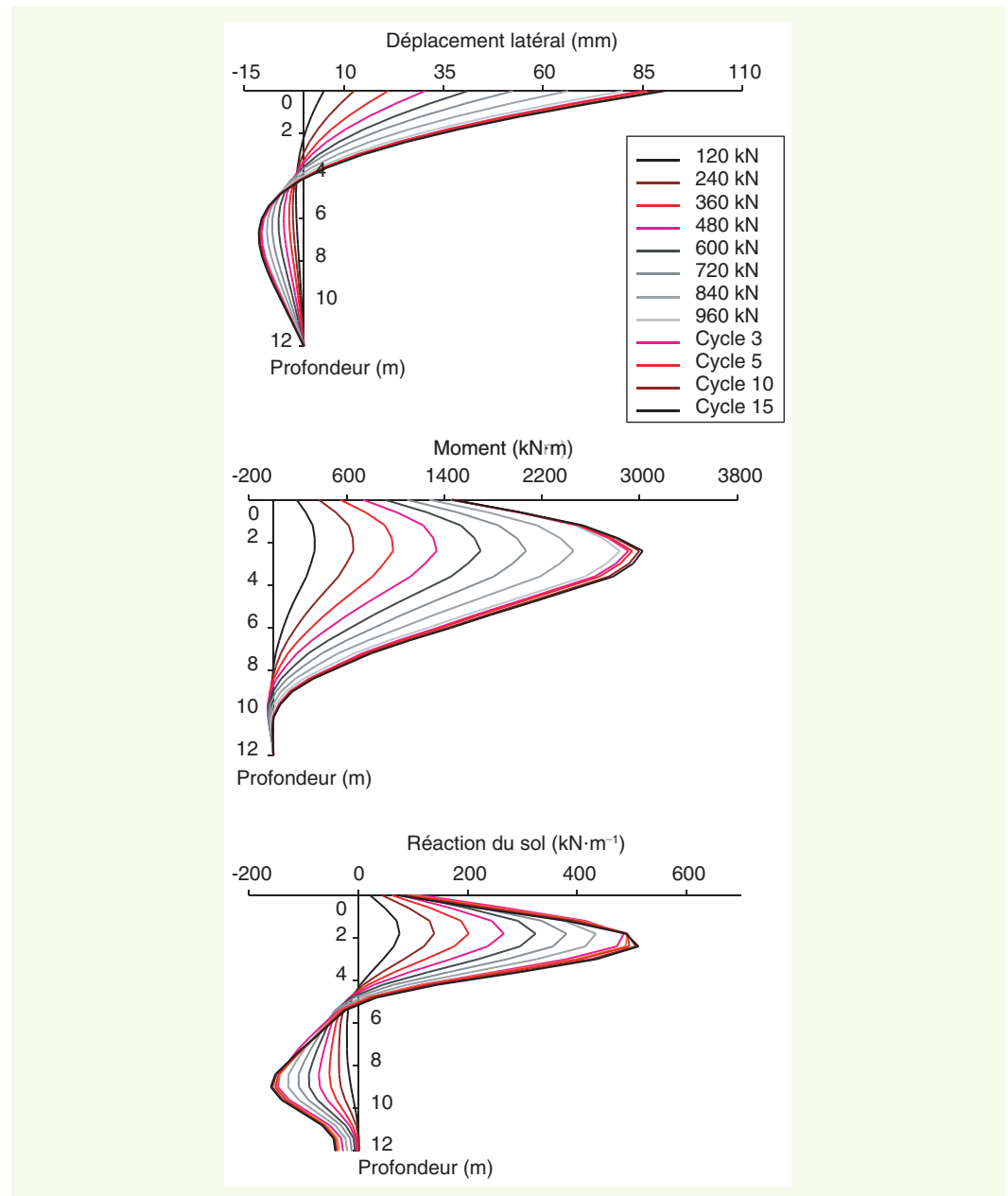
Les équipements extensométriques sont fonction de la nature des paramètres à mesurer ; les montages en demi-pont ou pont complet sont les plus courants (montage à 4 ou 6 fils) car permettant de s'affranchir des conditions de température et d'avoir une meilleure sensibilité à la sollicitation ; les montages en quart de pont sont rarement utilisés. Notons que des jauges à semi-conducteurs peuvent également être utilisées.

### ■ Pression fluide

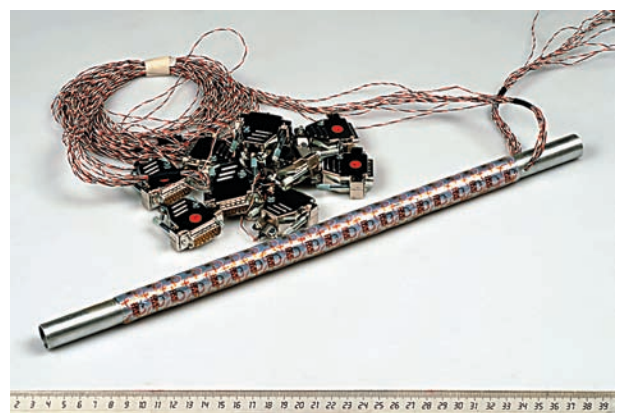
Deux types de capteur fluide sont utilisés : capteur de pression absolue ou de pression relative (par rapport à la pression atmosphérique). Les premiers sont en général utilisés sur les vérins hydrauliques (étendue de mesure 0-35 MPa) ou dans la cellule du pressiomètre. Les seconds corrigent l'effet de la pression atmosphérique. Tous les capteurs dédiés à la mesure de la pression interstitielle dans les sols (étendue de mesure 0-35 kPa à 0-700 kPa) sont de ce type. Ces capteurs,



**figure 14**  
 Courbes expérimentales  
 obtenues à partir d'un  
 pieu instrumenté soumis  
 à des charges latérales  
 monotones, puis cycliques  
 [62].



a | b



**figure 15**  
 Pieu instrumenté de 18 mm de diamètre  
 a : le câblage passe à l'intérieur du pieu  
 b : les jauges seront collées à la surface du pieu pour la mesure des moments.

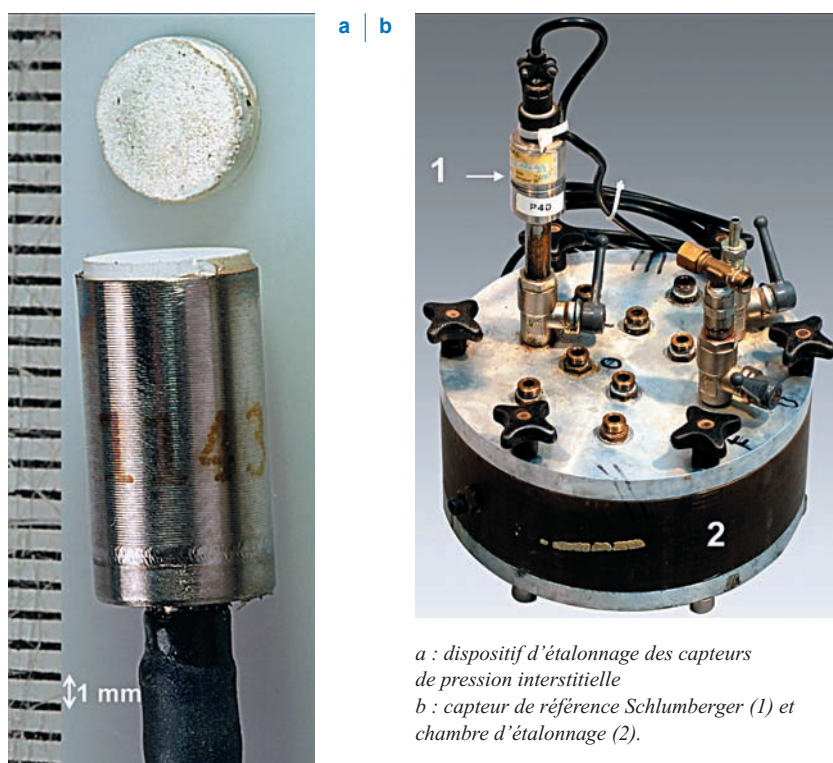
conçus et distribués par Druck, sont en général équipés de pierre poreuse, mais peuvent être utilisés sans (figures 16a et 16b). Leur faible encombrement permet de les introduire, par des réservations spécialement aménagées dans les parois des conteneurs d'essais, dans les différents massifs de sol centrifugés. Le mode de fonctionnement de ces capteurs est du type jauge pont complet. Leur utilisation avec pierre poreuse dans les massifs de sol nécessite une phase de saturation de celle-ci.

Les capteurs de pression peuvent aussi être contrôlés rapidement par la centrifugation d'une colonne d'eau équivalente à l'étendue de mesure du capteur (700 mm à  $100 \times g$  pour 700 kPa).

Mais, en général, les capteurs de pression interstitielle sont contrôlés en utilisant une enceinte d'étalonnage, posée dans la nacelle de la centrifugeuse pour tenir compte de tous les éléments inhérents à la mesure (figure 16a). Pour ce faire, l'enceinte est équipée d'un capteur de pression de référence Enertec Schlumberger 0-1 MPa (figure 16b), qui est étalonné annuellement.

Le capteur de référence et les capteurs à vérifier, mis en place dans la chambre d'étalonnage remplie d'eau désaérée, sont connectés à la chaîne d'acquisition. La chambre d'étalonnage est alors mise sous pression par incrément et décrétement de 50 ou 100 kPa (selon l'étendue de mesure du capteur) à l'aide d'un mano-détendeur. Les mesures électriques des capteurs et du capteur référent sont lues en salle de commande sur l'ordinateur lié à la chaîne d'acquisition.

**figure 16**  
Sondes de pression  
interstitielle Druck PDCR 81  
sans et avec pierre poreuse



a : dispositif d'étalonnage des capteurs  
de pression interstitielle  
b : capteur de référence Schlumberger (1) et  
chambre d'étalonnage (2).

### ■ Teneurs en eau par méthode capacitive

De nouveaux besoins de mesure sont apparus ces dernières années dans les essais sur modèles réduits en géotechnique. Les recherches sur la migration de polluants [63] s'inscrivent dans un domaine d'application où il devient nécessaire de reproduire des massifs de sols non saturés et d'en contrôler les caractéristiques (profils de teneur en eau et de succion). Le champ de macrogravité rend difficile l'usage d'une balance de précision. Lorsqu'un fluide s'écoule dans le massif de sol, le mouvement de l'eau est fortement influencé par le champ de gravité, de sorte que l'on peut s'interroger sur la représentativité de mesures de teneur en eau *a posteriori* après l'arrêt de la centrifugeuse. La mesure de la teneur en eau en vol nécessite l'utilisation d'une technique fondée sur un autre principe physique que la pesée, tel que recommandé dans la norme internationale [64] (une synthèse des techniques utilisées en centrifugeuse a été rédigée par Günzel *et al.* [65]).

La perméabilité relative (ou constante diélectrique) se définit par le rapport  $\kappa = \epsilon/\epsilon_0$  de la permittivité diélectrique du matériau par rapport à celle du vide ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ) où  $\kappa$  est la partie réelle d'un nombre complexe. Le principe du capteur capacitif s'appuie sur la variation de la permittivité diélectrique d'un sol avec sa teneur en eau du fait du contraste entre celles de l'eau ( $\kappa = 80$ ), du sol ( $\kappa = 4$  à  $10$ ) et de l'air ( $\kappa = 1$ ). Le circuit électronique est un oscillateur incluant une bobine et un condensateur, dont les propriétés sont directement liées aux propriétés diélectriques du matériau dans lequel sont noyées les électrodes du capteur.

Dans un milieu poreux à porosité connectée comme un sol, la permittivité diélectrique est liée à la teneur en eau. Elle dépend également de la densité du sol et de la fréquence de mesure. Dans le cas présent, la fréquence de mesure varie de 30 à 50 MHz, une gamme dans laquelle la permittivité diélectrique dépend peu de la fréquence. Il est alors possible d'estimer la teneur en eau si l'eau s'écoule, par exemple au cours du drainage d'un sable saturé, mais la mesure nécessite un étalonnage préalable.

Le LCPC a développé des capteurs fondés sur le principe capacitif pour les matériaux granulaires et l'argile, et des brevets ont été déposés sur ces techniques [66-67]. Les électrodes utilisées ici ont une forme filaire. La technologie CMS (Composants montés en surface) a été incorporée dans l'électronique de l'oscillateur de façon à en réduire la taille. Les caractéristiques principales sont données sur la **figure 17**. Pour des raisons pratiques (transmission à grande distance, effet de main, etc.), un diviseur de fréquence est implanté dans le circuit, de façon à travailler avec des basses fréquences. Le capteur capacitif est connecté à une carte de comptage Keithley, installée dans un ordinateur personnel. Lors des essais en centrifugeuse, les signaux sont transmis à travers des contacts tournants.

On a testé l'effet de l'accélération centrifuge sur la réponse en fréquence sur du sable sec (**figure 18a**), avant de réaliser des essais de drainage [66-67]. Puis le capteur a été utilisé lors d'expériences d'essorage de colonnes de sable saturé sous macrogravité. La fréquence peut être reliée à la teneur en eau après un étalonnage préalable. La **figure 18b** montre que la teneur en eau résiduelle à la fin du drainage décroît de 3,5 % à 2 % quand l'accélération centrifuge varie de 5 à 40  $\times$  g.

Des développements ultérieurs sont envisagés, en particulier en ce qui concerne la fréquence d'enregistrement, ainsi qu'une conversion du signal de sortie en tension.

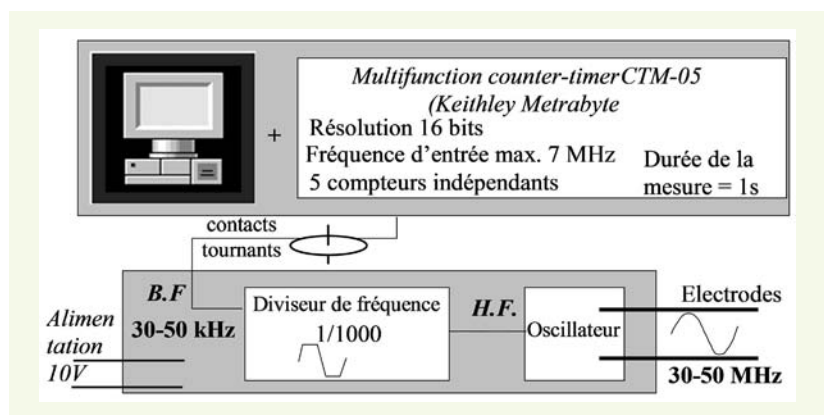
**figure 17**  
Caractéristiques principales du capteur à principe capacitif



a : capteur dans son boîtier de protection

b : schéma du dispositif électronique.

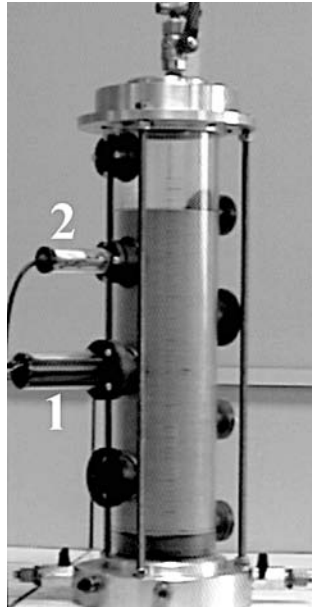
Dimensions du capteur Première génération : 2 cm $\times$ 8 cm, Deuxième génération (à partir de 2000) : 1,8 cm $\times$ 5 cm Électrodes en inox L = 35-65 mm, $\varnothing$ = 2 mm	10 V, 100 mA, 1 W Fréquence de mesure 30-50 MHz Fréquence d'enregistrement 42 kHz Gamme entre sable saturé et sec $\approx$ 4 kHz
---	--



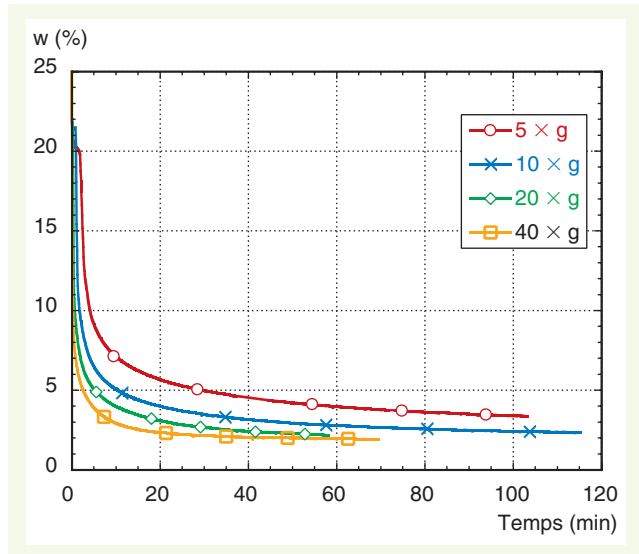
**figure 18**

Capteur LCPC

a : capteur sur une colonne de sable dans les versions de 1<sup>ère</sup> génération (1) et 2<sup>e</sup> génération, disponible à partir de 2000 (2)  
b : teneur en eau pondérale en fonction du temps au cours d'essais de drainage d'une colonne de sable dense en macrogravité.



a | b



## ■ Succion

En collaboration avec le CERMES (Centre d'enseignement et de recherche en mécanique des sols), une première série de mesures de succion a été réalisée dans une problématique de transport d'hydrocarbures dans un sol non saturé [68]. Les tensiomètres utilisés étaient dérivés de capteurs de pression interstitielle Druck-PDCR-81. Dans le cadre du programme Européen MUSE (Mechanics of Unsaturated Soils for Engineering, muse.dur.ac.uk), plusieurs expérimentations ont été réalisées sur du limon de Jossigny non saturé [69]. Dans différentes configurations d'alimentation en eau, des profils de succion ont pu être mesurés grâce à deux familles de tensiomètres développés par l'Université de Durham [70] et par le CERMES. Les tensiomètres ont d'abord été saturés dans une cellule pressurisée à 2 MPa. Ensuite, la pierre poreuse a été recouverte par un film de pâte de limon de Jossigny saturé afin de réaliser un excellent contact avec le sol. Enfin, on a mis en place les tensiomètres en position horizontale en les vissant à travers la paroi du conteneur centrifugé. Les mesures ont pu être comparées avec les profils théoriques de succion [71].

## PILOTAGE D'APPAREILLAGES EN VOL

La macrogravité qui règne dans la nacelle de la centrifugeuse ne permet pas d'intervention humaine. Tous les équipements embarqués sont pilotés à distance depuis la salle de commande. Des platines de huit prises 220 V sont disponibles dans la nacelle, ainsi qu'au pivot de la centrifugeuse. Ces prises sont commandées par des modules ADAM (type relais) à partir de la salle de commande via un bus RS 485. Elles permettent le démarrage à distance de différents appareils électriques (lumière, moteur...) et le pilotage de vannes pneumatiques.

## ■ Vérins

Les servovérins hydrauliques SV1 et SV2 (tableau 6), en aluminium, ont été développés spécialement. Ils sont équipés d'une servo valve électro-hydraulique Moog pouvant travailler jusqu'à 100 × g. Chaque vérin est alimenté en huile (filtrée à 5 et 2 μm en entrée) successivement par des raccords rapides, des tuyaux fixes courant le long du bras de la centrifugeuse et au travers de joints tournants. Une centrale hydraulique fixe côté stator fournit la puissance nécessaire à son fonctionnement (débit de 6,8 litres par minute à 50 °C sous 15 MPa).

Le piston annulaire creux de diamètre intérieur  $\varnothing = 30$  mm déploie une surface de 2 563 mm<sup>2</sup>. Les vérins sont équipés d'un capteur de déplacement LVDT HBM de ± 50 mm (SV1) ou ± 150 mm

Nom	Fabricant	Hydraulique/ Électrique	Capacité (daN)	Masse (kg)	L × l × h (mm) (piston rentré)	Course (mm)	Vitesse minimale (mm · s <sup>-1</sup> )	Vitesse maximale (mm · s <sup>-1</sup> )	Fréquences	Applications
SV1	ASTEVA	H	3 200	32	150 × 220 × 500	70	0,002	130	20 Hz pour ± 1 mm 13,7 Hz pour ± 2 mm	Chargements statiques ou cycliques
SV2	Ardennes- Vérin	H	3 200	45	150 × 220 × 830	300	0,002	130	20 Hz pour ± 1 mm 10 Hz pour ± 2 mm	Chargements statiques ou cycliques
Type 1A	SNT	É	1 000	40,5	700 × 400 × 230	400	0,3	3,8	–	Déplacement vertical statique
Type 1B	SNT	É	1 000	40,5	700 × 400 × 230	400	0,3	3,8	–	Déplacement vertical statique
Type 2	SNT	É	500	20,3	600 × 300 × 190	400	0,2	2,3	–	Déplacement vertical statique

**tableau 6**

*Propriétés des vérins et servovérins (utilisation jusqu'à 100 × g).*

(SV2) à 0,2 %. Ils peuvent recevoir, par des adaptations mécaniques particulières, tout type de capteur de force de 50 à 5 000 daN (capteur de type galette à bras cisailé FGP ou TME). Un tiroir électronique Schenck permet de piloter la boucle d'asservissement en déplacement ou force contrôlée. Le corps du vérin SV2 est équipé de tourillons qui permettent de l'orienter dans toute position angulaire de la verticale à l'horizontale grâce au berceau dans lequel il est intégré.

Trois vérins électriques SNT (deux de type ACL 2140-1-L-40 et un de type ACL 2125-1-X-40, 230/240 V), sont équipés de variateur de fréquence OMRON à commande vectorielle. Les trois vérins peuvent être pilotés indépendamment ou simultanément (pilotage informatique) : ils sont équipés d'un capteur de déplacement potentiométrique de course 400 mm et de fins de course de sécurité préréglables. L'ensemble (vérin réducteur) est monté dans un berceau mécano-soudé, testé et réglé jusqu'à 100 × g. Les embouts des tiges de vérin peuvent être équipés de capteurs ou de dispositifs particuliers qui nécessitent un pilotage externe (dispositif d'application de la succion, par exemple).

## ■ Essais géotechniques miniaturisés

Entourés d'équipements spécifiques aux conditions de macrogravité [72], les massifs de sol reconstitués (essentiellement du sable ou de l'argile) doivent être correctement caractérisés pour permettre de vérifier l'homogénéité et la reproductibilité des essais sur modèle réduit. Pour ce faire, plusieurs essais géotechniques *in situ* ont été miniaturisés afin d'être exécutés en vol, dans un massif de sol soumis aux mêmes états de contrainte qu'en vraie grandeur : pressiomètre, pénétromètre, scissomètre et T-Bar.

Grâce à deux poutraisons prépositionnées sur le conteneur de sol en test, plusieurs profils d'un même type d'essai peuvent être réalisés en vol sans qu'il soit nécessaire d'arrêter la centrifugeuse ; chaque poutraison est pourvue d'un chariot mobile, pilotable électriquement depuis le poste de contrôle, qui peut à volonté être déplacé d'une implantation à une autre sur une distance maximum de 700 mm (cf. figure 22).

Le chariot mobile de la première poutraison est pourvu d'une noix pouvant recevoir alternativement le pénétromètre à enfoncement hydraulique (course 300 mm) ou le scissomètre. Quant au chariot de la seconde poutraison développée à partir de 2003, dont le dispositif est fondé sur le même concept, mais est destiné à la reconnaissance dans les sols médiocres, il permet de mettre en œuvre le pénétromètre à commande électrique ou le T-bar. La commande électrique présente deux avantages importants : d'une part des reconnaissances peuvent être faites sur des puissances de sol jusqu'à 600 mm, d'autre part l'interchangeabilité rapide des tiges offre la possibilité de conduire

deux campagnes d'essais de natures différentes sans risque d'altérer les capteurs de force équipant les pointes. Les contrôles de positionnement sont assurés par des capteurs potentiométriques (pistes collées sur les supports), ou par des capteurs rotatifs équipés d'un pignon denté (chariot mobile). Des fins de course électriques réglables (ou butées mécaniques) permettent de limiter les déplacements assurant ainsi la protection des dispositifs d'essais.

### › Pressiomètre

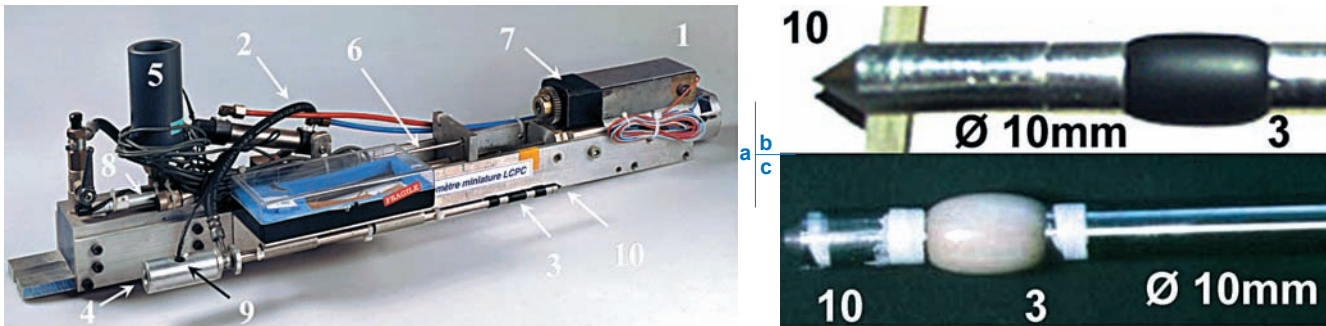
Un pressiomètre monocellulaire de dimension réduite ( $\varnothing = 10$  mm, élancement 2) a été développé au LCPC. Il permet de déterminer les caractéristiques représentatives des sols : le module pressiométrique  $E_M$ , la pression de fluage  $p_F$  et la pression limite  $p_{LM}$ . Conçu pour fonctionner dans la centrifugeuse géotechnique, cet appareil est inspiré du pressiomètre Ménard [73-74]. Il peut être mis en place de différentes manières selon la nature du sol étudié : après forage préalable dans un sol cohérent, par moulage lors de la reconstitution du massif de sable, ou par fonçage [73-74].

Le Contrôleur pression volume (CPV), assemblé dans un montage mécano-soudé rigide, est posé à l'horizontale sur le bord du conteneur en test, au plus près de la sonde pour réduire les longueurs de tubulures. L'encombrement du dispositif embarqué, de masse 10 kg, est de  $800 \times 10 \times 25$  mm<sup>3</sup>.

La pression  $p_r$  est mesurée par un capteur miniature de mesure absolue Entran ( $\varnothing = 3,2$  mm,  $l = 3$  mm, étendue de mesure 3,5 MPa), équipé de jauges piézorésistives (précision globale  $\pm 2$  %). Il est monté en tête de la tige creuse (figure 19) au moyen d'un presse-étoupe dans le manchon annulaire. Des tentatives de positionnement dans le corps de sonde se sont avérées difficiles, entraînant une détérioration irrémédiable du capteur lors des changements de membrane (rupture de l'isolation électrique).

figure 19

Contrôleur Pression Volume (1),  
liaison CPV-sonde (2),  
sonde pressiométrique (3),  
manchon annulaire (4),  
vase d'alimentation (5),  
vérin hydraulique (6),  
moteur électrique (7),  
capteur de déplacement (8),  
capteur de pression (9),  
cône (10)



a : pressiomètre miniature  
b : membranes en néoprène  
c : membrane en latex.

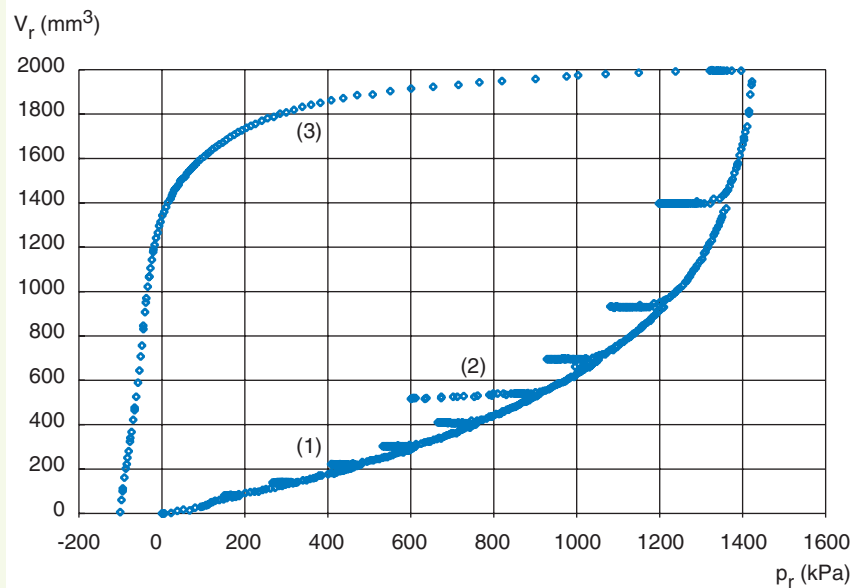
Le volume injecté est déduit de la mesure du déplacement du piston du CPV par un capteur de déplacement potentiométrique linéaire (MCB 150 mm à  $\pm 0,1$  %). Le volume de la sonde est donc connu à  $\pm 18$  mm<sup>3</sup> soit 1 % de son volume au repos ( $1\,624$  mm<sup>3</sup>). Le débit est ainsi contrôlé au cours de l'essai. Le choix de  $21$  mm<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup> correspond à une vitesse d'échantillonnage d'une acquisition par seconde. L'incrément de gonflement de la sonde est choisi en fonction de l'estimation de la pression  $p_{LM}$ . Pour chaque palier, il correspond à une expansion de l'ordre de  $60$  mm<sup>3</sup>. Compte tenu du type d'expansion sphérique, puis cylindrique, et de l'élancement de la sonde, la conduite de l'essai jusqu'au doublement du volume initial du forage ne peut être envisagée sans risque de détérioration de la membrane : une limitation à 75 % de déformation s'impose (figure 20)

### › Pénétromètres hydraulique et électrique

Une pointe instrumentée conique (figure 21) est foncée dans le sol et mesure la résistance de pointe, correspondant à un essai *in situ* très répandu [75]. Deux modes de propulsion ont été développés : hydraulique (vérin double effet) lorsque sont appliquées des résistances de pointe importantes (80 MPa par exemple dans le cas de sables), et électrique pour les efforts les plus faibles ( $< 10$  MPa dans le cas d'argiles). Les vitesses de pénétration peuvent être choisies entre  $2$  mm · s<sup>-1</sup> et  $20$  mm · s<sup>-1</sup> au moyen d'un limiteur de débit embarqué pilotable à distance (hydraulique) ou

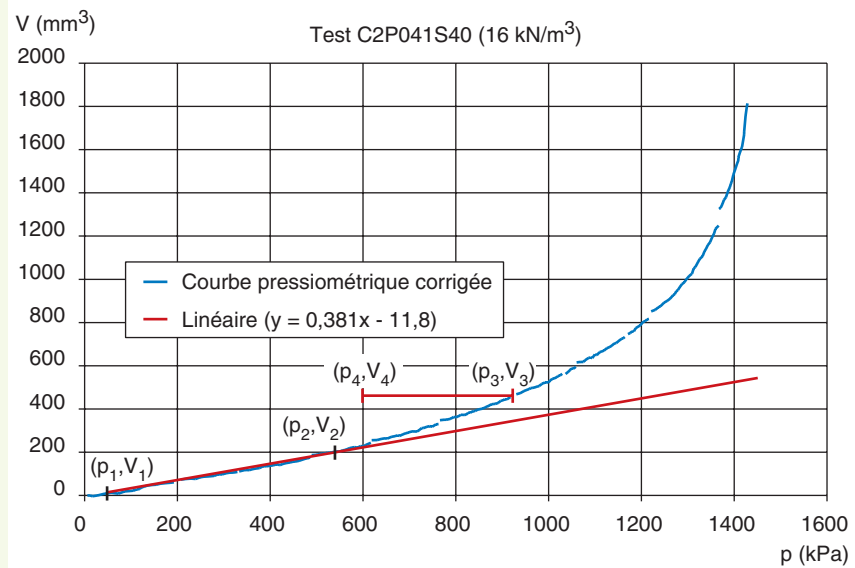
**figure 20**  
Exemple d'essai  
pressiométrique réalisé en  
centrifugeuse ( $40 \times g$ )

a : courbe expérimentale  
pression-volume  
sans correction ;  
chargement (1), cycle (2),  
déchargement final (3)



a  
b

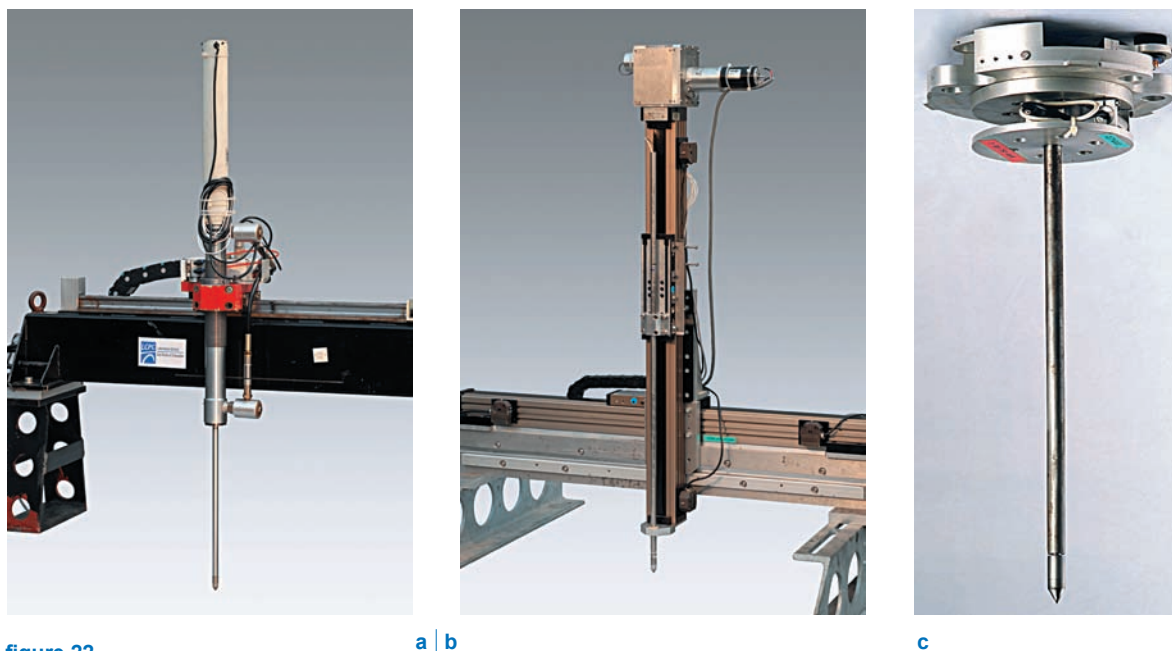
b : courbe pressiométrique  
corrigée ; les points  
indiciés 1 à 4 servent à  
déterminer le module  
pressiométrique Ménard  
et le module de  
rechargement.



**figure 21**  
Pointes pénétrométriques  
de diamètres 12 mm et  
8 mm.

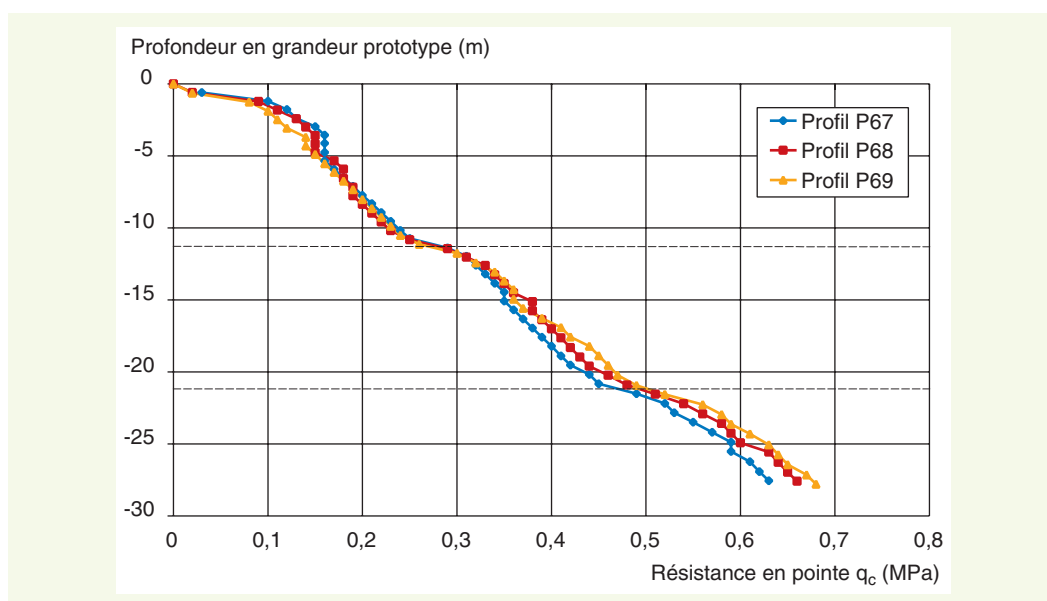


plus simplement par ajustement de la tension d'alimentation (électrique). Le pénétromètre hydraulique (**figure 22a**) est le premier à avoir été conçu. Le capteur de force ( $\varnothing$  12 mm), développé pour ce type d'application, est directement situé derrière la pointe normalisée (angle au sommet de 60 degrés) qui est un modèle réduit au 1/3 du pénétromètre statique aux normes européennes. Pour l'utilisation avec le pénétromètre hydraulique, l'ensemble capteur-pointe est vissé à la base d'une tige de même diamètre, qui n'est autre que le piston creux du vérin de fonçage ou une tige allonge de 300 mm, intercalée lorsque les profondeurs de reconnaissance le nécessitent. Le pénétromètre électrique (**figure 22b**) a fait l'objet d'avancées techniques, comme l'interchangeabilité des tiges qui évite la dépose délicate du capteur de force de pointe.



**figure 22**

Pénétrètres montés sur leur chariot mobile  
 a : pénétrètre hydraulique  
 b : pénétrètre électrique  
 c : outil adaptable sur la tête du téléopérateur.



**figure 23**

Exemple de profils pénétrétriques obtenus en temps réel.

Le capteur de force miniaturisé développé (diamètre de 8 mm monté sur une tige de même diamètre) équipe l'un des outils du téléopérateur (figure 22c). Un tel capteur de force est immergeable sous des pressions hydrostatiques jusqu'à 0,7 MPa. Des essais croisés impliquant plusieurs équipes de recherche européennes ont permis de valider le principe de reconnaissance pénétrétrique en centrifugeuse [76-77].

Le pénétrètre permet l'obtention d'un profil continu de la résistance en temps réel (figure 23).

### › Scissomètre

L'essai au scissomètre consiste à enfoncer un moulinet dans un sol à la cote choisie, à imprimer un mouvement de rotation d'axe vertical pour cisailer le sol autour du fût du moulinet. L'essai se pratique généralement dans des sols mous (cohésion non drainée inférieure à 100 kPa).

La vitesse d'enfoncement est relativement lente (entre  $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  pour éviter un drainage latéral) ; la profondeur d'investigation (300 mm) correspond à la course propre du vérin hydraulique de mise en place. Une tige-allonge de 300 mm peut être vissée sur la tige primaire, ce qui permet alors de prospecter jusqu'à 600 mm en deux opérations. Un moteur électrique pas à pas (Escap PP250) imprime le mouvement de rotation au moulinet (figure 24) ; la vitesse angulaire



est réglable de 0,075 tour par minute à 1,5 tour par minute ; on adopte généralement une vitesse constante de 1 degré par seconde. Le capteur de mesure du couple est placé au sommet de la tige ; la valeur maximum du couple est de 0,25 N·m.

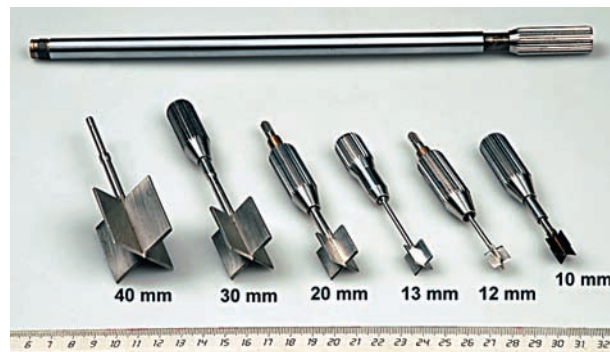
Seul le moulinet et la partie qui le surmonte directement sont en contact avec le sol cisailé. En effet, la tige d'entraînement du moulinet (300 mm ou 600 mm avec la tige-allonge) passe librement à l'intérieur d'un tube, la liaison mécanique entre les systèmes d'entraînement se faisant par un système d'arbres cannelés emboîtables. Le fût de la tige supportant le moulinet est équipé dans sa partie la plus fine d'un système mécanique autorisant la libre rotation du moulinet sur 10 degrés ; ce dispositif à ergot permet de s'affranchir des frottements parasites qui s'exercent toutefois sur la partie supérieure de la tige en rotation. Le contrôle de l'altitude du moulinet se fait au moyen d'un capteur de déplacement potentiométrique linéaire de 300 mm de course, intégré au dispositif (figure 24). Six moulinets d'élanement 1 sont disponibles selon la résistance du sol (figure 25).

**figure 24**  
Couple-mètre et moteur pas à pas monté sur la tige du vérin de fonçage.



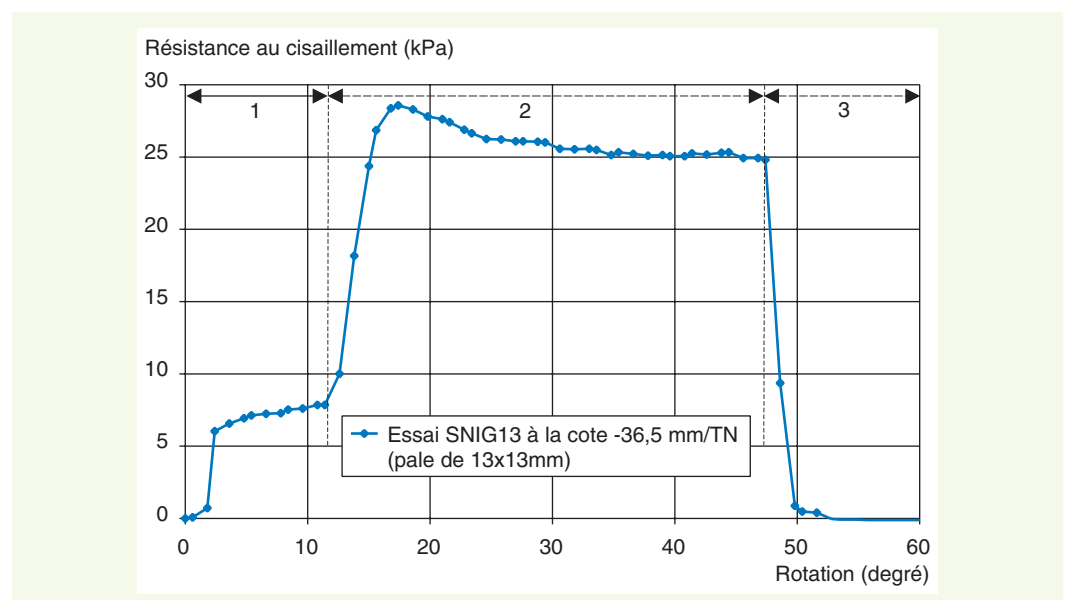
**figure 25**  
Moulinets adaptables sur le dispositif de fonçage (en haut la tige allonge intermédiaire).

24|25



Après chaque test (figure 26), le moteur inverse automatiquement la rotation du moulinet de façon à la repositionner dans sa position initiale ; le vérin est activé pour un nouveau positionnement du moulinet et un second essai est alors exécutable. Le scissomètre est opérationnel jusqu'à  $100 \times g$  ; il peut être monté sur un support fixe avec un système par noix de serrage ou sur le système de chariotage mobile en vol adapté sur la poutraison spécialement conçue à cet effet.

**figure 26**  
Exemple de courbe scissométrique acquise en temps réel. Rotation de la tige creuse porte-moulinet (1), rotation du moulinet de la tige porte-moulinet (2), retour du moulinet à sa position initiale (3).



## › T-Bar

Peu connu en France, cet essai, utilisé dans les sols très mous, ressemble à l'essai pénétrométrique, à la différence près que la pointe est remplacée par un cylindre horizontal (figure 27). Lors de la pénétration du T-bar dans un sol fin, cette forme cylindrique permet une cinématique de type *écoulement sans décollement* du sol argileux autour du T-Bar, et non pas un refoulement tel que le pénétromètre le génère. L'effort mesuré *en pointe* n'est pas à corriger de l'état de contrainte à la profondeur de mesure et peut ainsi être directement relié aux propriétés de résistance du sol [78].

Le T-bar permet une reconnaissance de la cohésion non drainée en continu dans les sols mous. Si le scissomètre est l'appareillage idéal pour déterminer la cohésion non drainée, il a le désavantage de ne procurer que des profils discrets. Avant l'acquisition du T-bar, les profils de cohésion non drainée étaient déduits d'une corrélation avec l'essai pénétrométrique [11, 79].

Fondée sur des solutions analytiques validées pour un cylindre infini, l'identification de la cohésion non drainée (scissométrique)  $s_u$  est effectuée à l'aide de la formule :

$$s_u = P / (d \cdot N_b)$$

où P est l'effort mesuré et d le diamètre du T-Bar

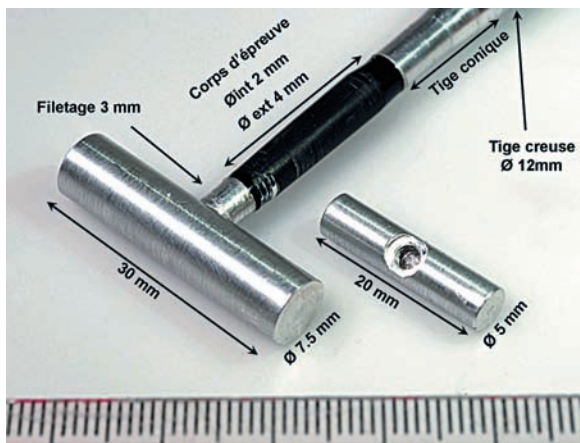
Le facteur adimensionnel  $N_b$ , dépendant de la rugosité du cylindre, est en général compris entre 9 et 12.

Le corps d'épreuve, en aluminium pour assurer une bonne sensibilité, est instrumenté de jauges montées en pont complet (EA 13 030 TU 120  $\Omega$ ) et le tout est noyé dans une résine époxy autorisant l'immersion de l'appareillage ; l'ensemble est monté sur une tige creuse assurant le passage du câble jusqu'au connecteur en surface. Deux embouts cylindriques (figure 27a) peuvent être montés, le choix d'utiliser l'un plutôt que l'autre dépendant de l'argile à analyser, très molle ou moyennement molle. Le dispositif d'essai permet de mesurer des efforts jusqu'à 375 N en traction ou compression. Il peut être monté sur les moyens de fonçage existants. L'enfoncement est suivi par un potentiomètre rotatif : la profondeur de reconnaissance atteint 400 mm.

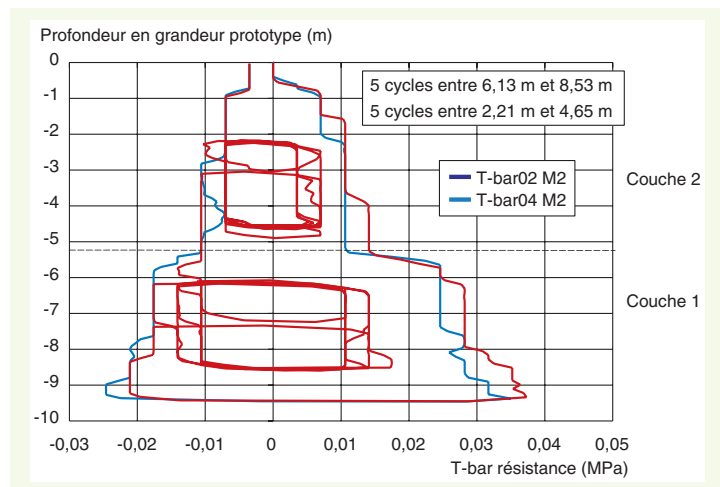
Le T-bar permet également d'apprécier la dégradation du massif de sol sous l'effet des cycles, puisque l'essai peut être réalisé à l'enfoncement, puis complété en remontant le dispositif et en y associant, à une cote précise, un certain nombre de cycles (figure 27b). Une estimation de la sensibilité de sol argileux peut ainsi être effectuée. Notons que ce dispositif, initialement conçu pour les reconnaissances de sols centrifugés, est aujourd'hui utilisé pour des reconnaissances *in situ*, en particulier dans le domaine off-shore (e.g. [80]). Éventuellement, le barreau cylindrique peut être remplacé par une sphère, géométrie pour laquelle des solutions analytiques sont également disponibles.

figure 27

a : T-bar avec les deux embouts interchangeables  
b : exemple de profil obtenu avec le T-bar (enfoncement et succession de cycles).



a | b

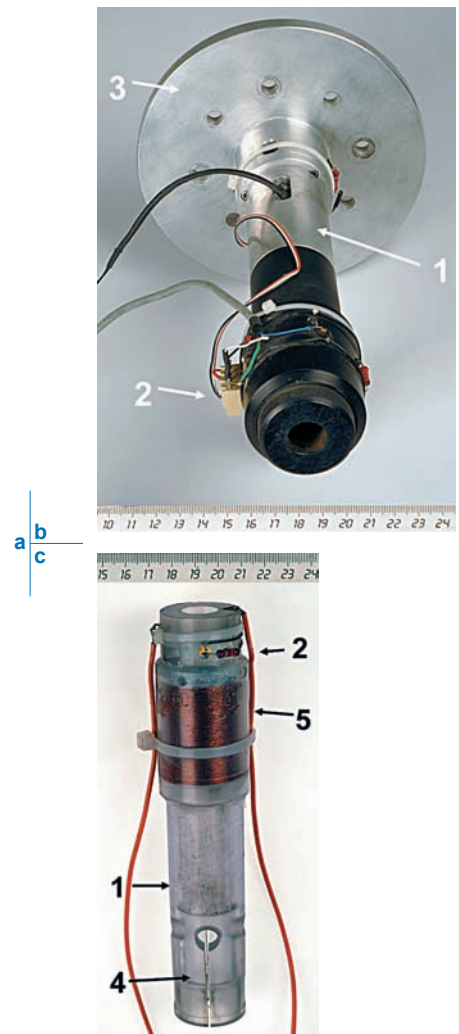
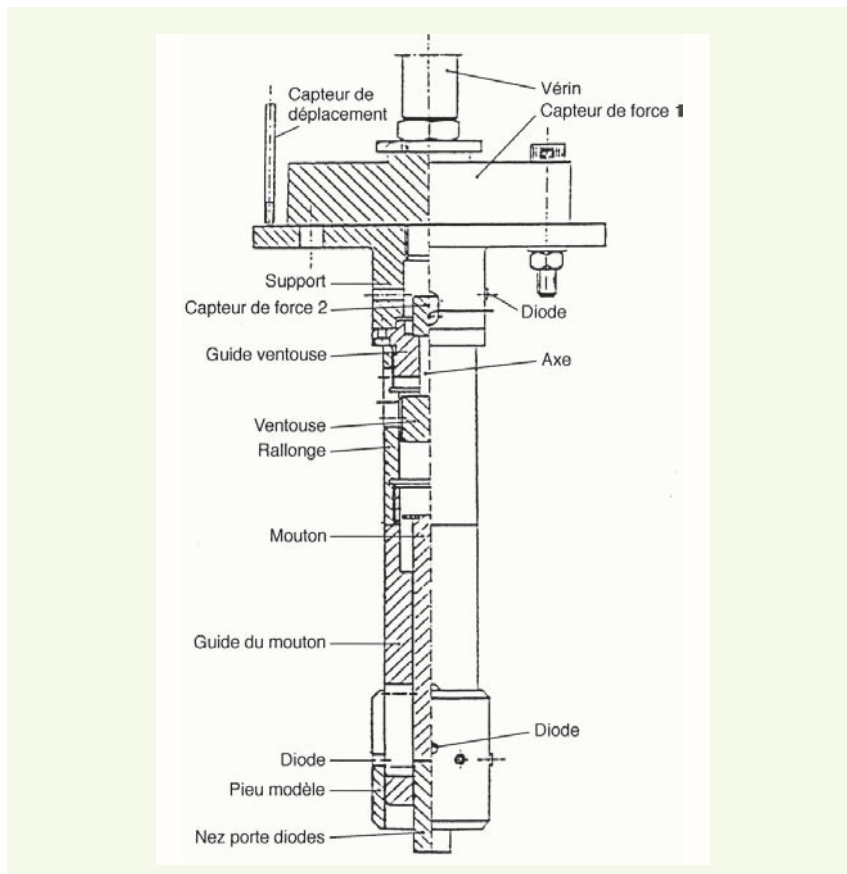


### › Battage de pieux

La mise en place de pieux par battage est une technique d'installation sur site éprouvée et très répandue. Pour vérifier le respect des conditions de similitude inhérentes au battage [81,98], le développement d'un batteur capable de battre des pieux en cours de centrifugation a démarré dans le cadre du programme national *Macrogravité 92/93*.

La solution technologique retenue s'appuie sur un système de vérin-ventouse magnétique (dénommé DLM16) qui peut se déplacer verticalement (figures 28a et 28b). L'enchaînement des phases de montée et de descente est contrôlé par des diodes agissant sur les fonctions du vérin et garantissant une hauteur de chute constante. La fiche est contrôlée par un capteur LVDT. Un capteur de force de type galette à bras cisailé (FGP 15 kN), fixé à la base du piston du vérin, supporte le dispositif de battage, ce qui permet d'exécuter l'essai de chargement du pieu battu sans arrêter la centrifugeuse. Le dimensionnement du système actuel est un compromis entre le diamètre du pieu (16 mm), la masse du mouton (163,8 g) en mouvement et la hauteur de chute (32 mm) : ceci a conduit à choisir un niveau d'accélération de  $31,25 \times g$ , notamment à cause des performances limitées de la ventouse au-delà de cette accélération. La cadence de battage est de 10 coups par minute.

Un second dispositif de battage (figure 28c) a été développé en suivant le principe des marteaux magnétiques utilisés sur site. L'injection d'un courant au travers d'un bobinage excite un noyau qui joue le rôle de marteau. Une cage non conductrice en altuglas annulaire est usinée à l'extérieur pour recevoir le bobinage et à l'intérieur au diamètre du noyau pour qu'il coulisse librement ; la partie basse est alésée au diamètre nominal du pieu à battre sur lequel le dispositif est serré. Le dispositif accompagne l'enfoncement du pieu en gardant toujours une hauteur de chute constante ; celle-ci est ajustée par réglage de la force électromagnétique. Des développements en cours concernent le battage de pieux en fond de trou.



**figure 28**

- a : principe du batteur LCPC de type DLMC 16
- b : photographie de ce batteur, avec le guide du marteau (1), le dispositif de comptage par diode (2), la plaque d'interface vérin-batteur (3)
- c : le marteau électromagnétique Pivert, avec le dispositif de comptage par diode (2), le tube fendu pour serrage sur le pieu (4), le bobinage (5).

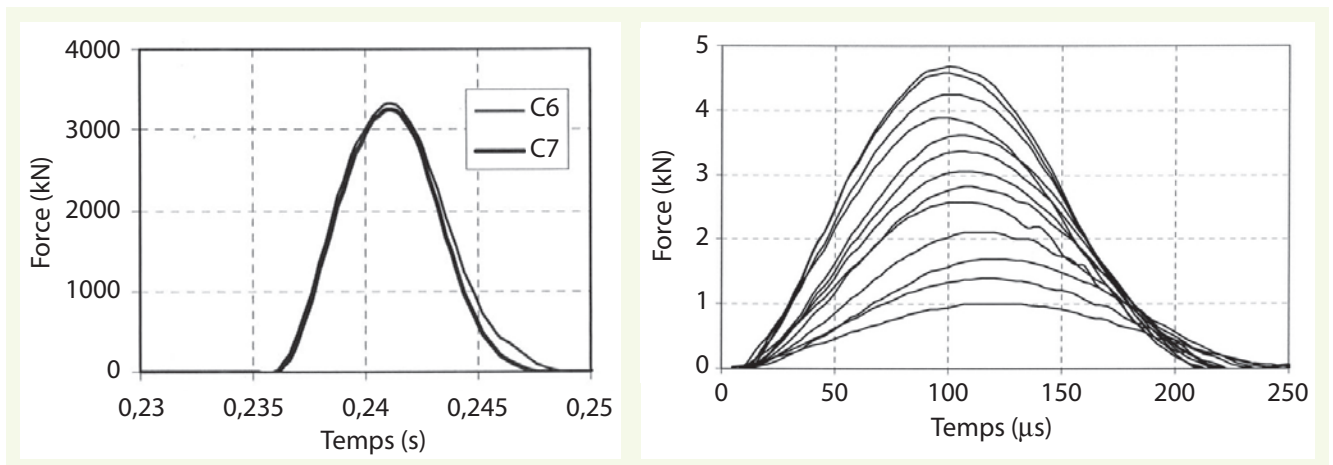
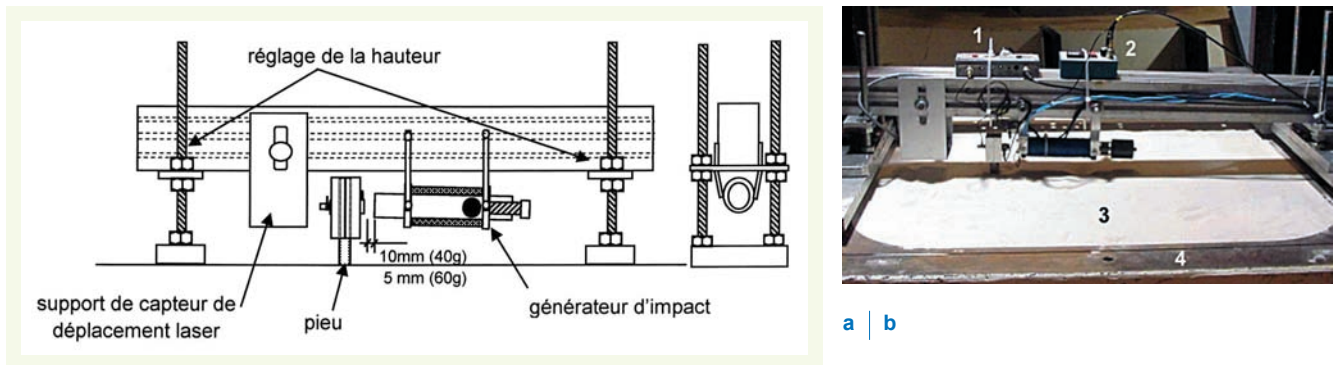
### › Canon électromagnétique

Ce dispositif d'essai, inspiré du système de battage, permet de générer des chocs quasi horizontaux sur une structure [82]. Il se compose d'un bobinage cylindrique à l'intérieur duquel est placée une bille en acier. La bobine est alimentée par une impulsion de courant générée par des condensateurs situés dans la nacelle de la centrifugeuse (figure 29).

**figure 29**

Le canon électromagnétique [83]  
 a : schéma  
 b : photographie avec le conditionneur d'accélération (1), le conditionneur de force (2), le massif de sable (3), reconstitué dans le conteneur (4).

Déclenché à distance, le choc de la bille dure moins d'un centième de seconde. Le canon étant situé à proximité du point d'impact, la bille revient dans le fût du canon après le tir, ce qui évite tout phénomène de rebond et permet de tirer une nouvelle fois si nécessaire. Une diode à infrarouge placée à la sortie du canon détermine la vitesse de passage de la bille avant et après le choc, ce qui permet d'évaluer la quantité de mouvement transmise à la structure. De plus, la force d'impact est mesurée sur la structure (avec un capteur PCB 200A04 ou A05). L'application de ce dispositif de chargement a jusqu'à présent principalement concerné la réponse des pieux à une sollicitation dynamique en tête [82, 86] (figure 30).



**figure 30**

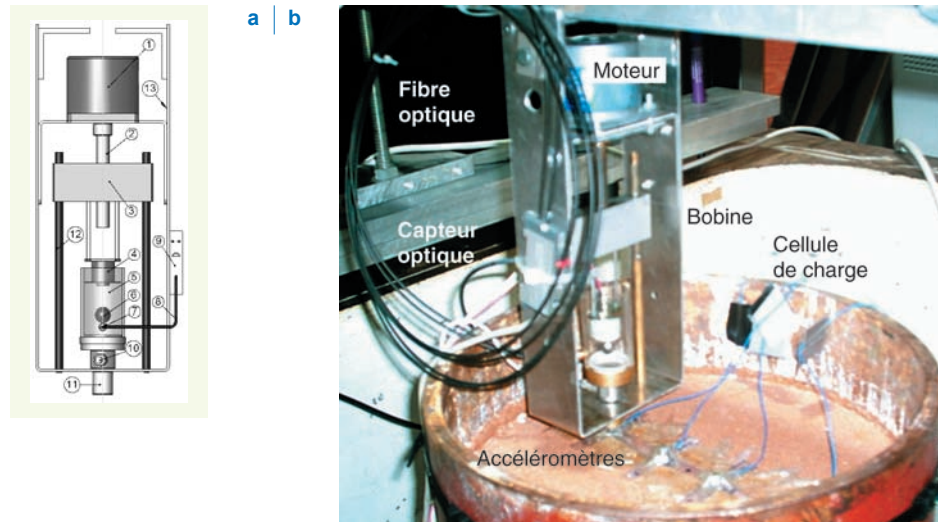
Impact sur la structure [82-85].

### › Mini-défectomètre à masse tombante

L'Université de Los Andes (ULA) de Bogota a développé un mini-Falling Weight Deflectometer [87] qui a été testé et validé sur la centrifugeuse du LCPC. Le principe de ce dispositif (figure 31) consiste à laisser tomber une bille d'une hauteur contrôlée sur la surface du sol, puis de mesurer, à l'aide de quatre accéléromètres piézoélectriques miniatures mono-axes ICP® model 352A10, l'accélération transmise en différents points de la surface. Une analyse des signaux générés par la propagation des ondes de surface, par la technique SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), permet ensuite de remonter, dans le cas de sols à stratification horizontale, à la structure du milieu stratifié. Le pilotage de l'essai et l'enregistrement des données sont gérés par un ordinateur placé en salle de commande. Les logiciels développés par ULA s'appuient sur une carte d'acquisition dynamique National Instruments (NI 4472) permettant l'acquisition synchrone des accéléromètres à une fréquence de 110 kHz. Cet essai, non destructif, ne génère que de petites déformations (les vibrations générées par l'impact). Il est inspiré du FWD (Falling Weight Deflectometer) utilisé *in*

situ pour caractériser la structure des chaussées, mais miniaturisé (**figure 31**). La masse tombante est une bille d'acier de 7 g et de 12 mm de diamètre. Une cellule de force Omega DLC 5k, d'une masse de 43 g, mesure l'effort lors de l'impact dont la durée est de l'ordre de 35  $\mu$ s. La répétabilité et la fiabilité des mesures ont été démontrées.

**figure 31**  
Mini FWD, déflectomètre  
à masse tombante  
miniaturisé [88]  
a : schéma  
b : expérimentation.



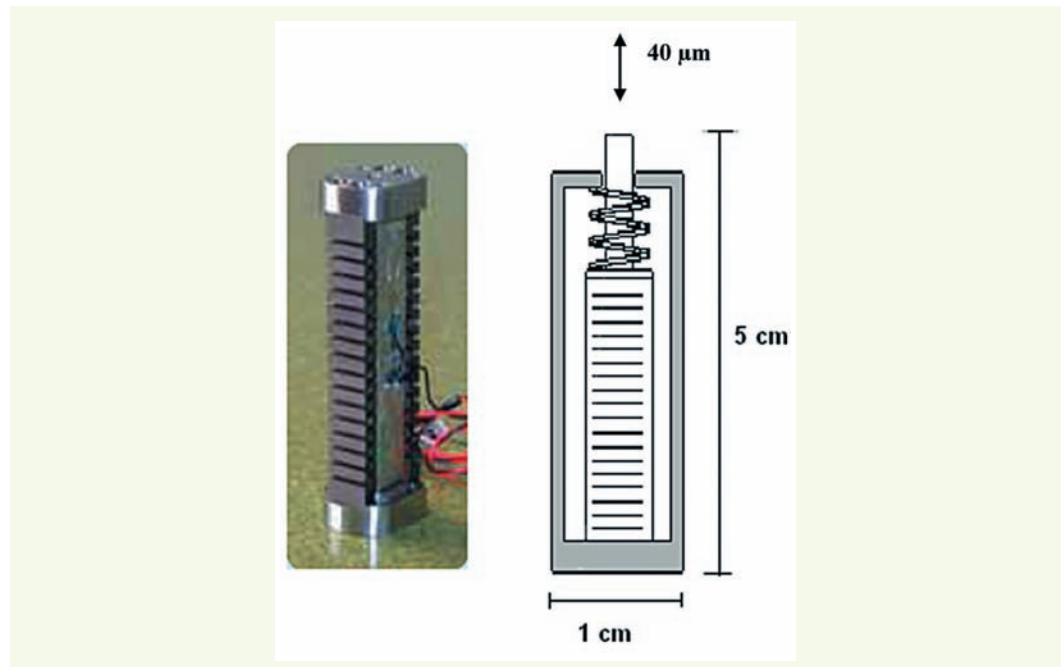
### ► Excitateur piézoélectrique

Cet appareil exploite la propriété d'effet inverse de la piézoélectricité. En 1922, Langevin proposa le premier excitateur à base de cristaux. Pour plus d'efficacité, l'excitateur était mené à la résonance. Les contraintes et les déformations sont reliées par le module d'Young de la céramique et dépendent du champ électrique appliqué. Le déplacement est relié au niveau de tension selon une relation pas exactement linéaire en raison de l'hystérésis du matériel actif.

L'excitateur piézoélectrique est un condensateur, dont la capacité est souvent très grande (telle que 10  $\mu$ F). Le niveau de précontrainte dans le capteur détermine la capacité de traction en force.

L'excitateur (**figure 32**) utilise un cadre extérieur déformable susceptible de précontraindre la céramique afin d'optimiser son comportement dynamique. Les caractéristiques de cet excitateur sont résumées dans le **tableau 7**.

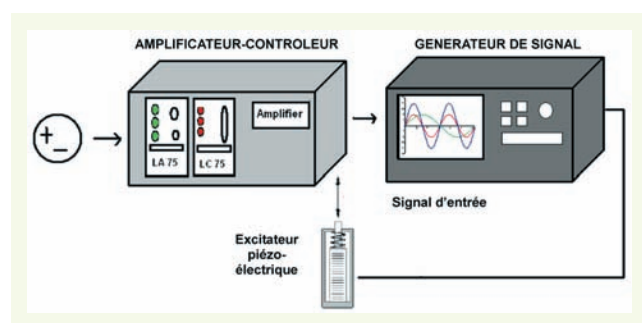
**figure 32**  
Excitateur parallèle  
précontraint PPA40M.



**tableau 7**  
Caractéristiques de  
l'excitateur piézoélectrique  
PPA40M.

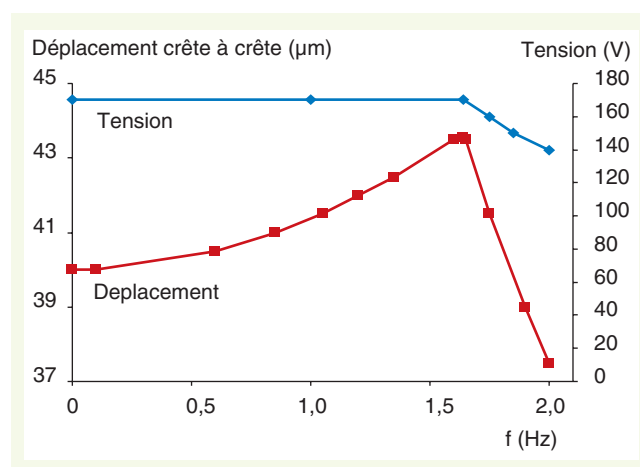
Grandeur	Unité	PPA40M
Déplacement	$\mu\text{m}$	40
Force	N	800
Rigidité	$\text{N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	20
Résonance en fréquence (libre-libre)	Hz	25 000
Réponse en temps (libre-libre)	ms	0,02
Résonance en fréquence (bloqué-libre)	Hz	12 500
Réponse en temps (bloqué-libre)	ms	0,04
Tension	V	[- 20,150]
Capacitance	$\mu\text{F}$	2,7
Résolution	nm	0,4
Comportement thermomécanique	$\mu\text{m} \cdot \text{K}^{-1}$	0,04
Taille	mm	48
Profondeur de base	mm	10
Largeur de base	mm	9
Masse	g	25

Pour piloter en dynamique, une électronique spécifique et puissante est indispensable [90]. Pour contrôler et piloter le capteur, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur LC75C et un amplificateur LA75C (figure 33a). La génération des signaux peut être réalisée avec un générateur traditionnel (Schlumberger 4450) pour contrôler la forme (sinus) et la fréquence du signal d'entrée (50-2 000 Hz). La tension d'alimentation doit tenir compte de la réponse de l'excitateur pour chaque fréquence. La réponse du capteur est associée à la masse totale à déplacer et à des conditions de vibration (bloqué, libre-libre, etc.). L'excitateur est dans ce cas supporté par une plaque d'aluminium de 30 mm de diamètre et de 5 mm d'épaisseur, placée à la surface du sol. La masse de la plaque est de 13 g. Dans ce cas, pour générer un déplacement de 40  $\mu\text{m}$  (bloqué), la tension d'excitation retenue doit avoir un offset (tension de décalage) de 3,25 V et une amplitude au pic de 4,25 V (figure 33b).



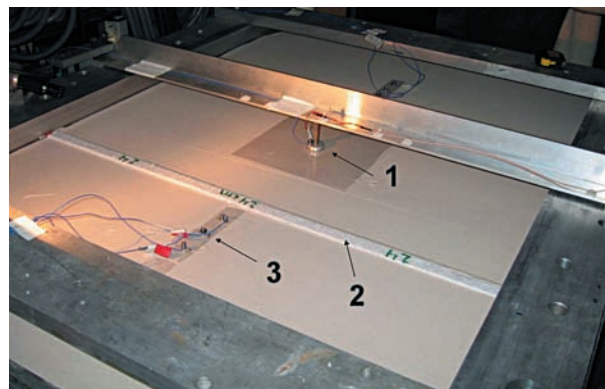
**figure 33**  
Système excitateur, amplificateur, générateur de signal [89]  
a : configuration du système  
b : exemple de réponse de déplacement en fonction de la tension.

a | b



Les premières applications concernent l'étude de mesures de protection de bâtiments vis-à-vis de la propagation des ondes [90]. Des essais non destructifs ont été réalisés en faisant varier la fréquence du signal (de 100 à 2 000 Hz) pour déterminer l'efficacité des barrières anti-vibration dans un modèle composé de sable de Fontainebleau (figure 34). La répétabilité et la fiabilité des mesures ont été prouvées pour le capteur piézoélectrique.

**figure 34**  
Barrières anti-vibration ;  
source (1), barrière (2),  
accéléromètres (3).



### ■ Simulateur de séismes

Cette approche expérimentale est très développée aux États-Unis et au Japon, mais peu en Europe, hormis à l'Université de Cambridge qui possède deux générations de simulateurs de tremblement de terre [91]. Les sessions réservées aux simulations de séismes en centrifugeuse dans les conférences spécialisées [5-10] montrent l'importance grandissante prise par cette approche dans les études sismiques. Les spécifications [26] arrêtées pour le simulateur de séismes du LCPC ont été établies pour des sollicitations harmoniques appliquées à la base du conteneur, tout en respectant les lois de similitude et en tenant compte des contraintes géométriques et de la capacité d'emport de la nacelle de la centrifugeuse (tableau 8).

**tableau 8**  
Caractéristiques  
principales du simulateur  
de séismes du LCPC.

Désignation	Valeur
Masse totale	2 200 kg
Charge utile	400 kg
Dimension de la table L × l × h	1 m × 0,5 m × 0,6 m
Force de vibration maximum	220 kN
Niveau de g centrifuge	20 à 80
Niveau de g sismique	40
Maximum $k_n = g_{\text{sismique}} / g_{\text{centrifuge}}$	0,5
Déplacement maximum	5 mm
Vitesse maximale	1 m·s <sup>-1</sup>
Durée maximum d'un essai	1 s
Réponse en fréquence (tremblement de terre)	20 à 250 Hz
Réponse en fréquence (sinus)	20 à 200 Hz

Ce simulateur peut également reproduire des séismes réels (sollicitations vibratoires à large bande). Les séismes de référence donnés sous forme d'accélérogrammes doivent être d'abord calibrés en amplitude (pour respecter les similitudes en accélération et en déplacement), puis en période d'échantillonnage (similitudes en temps ou en fréquence). Le contenu fréquentiel lui-même est réduit à la bande passante telle que définie dans le tableau 8. On doit enfin réaliser un deuxième calibrage de l'amplitude en vérifiant que ni l'accélération ni la vitesse ni le déplacement maximal ne dépassent les valeurs imposées à la machine.

Le simulateur de séismes est mono-axe (figure 35). Sa direction de sollicitation, perpendiculaire à la direction tangentielle de la rotation et parallèle à l'axe de rotation de la centrifugeuse, permet de limiter les forces de Coriolis et d'optimiser l'isolement mécanique des bras de la centrifugeuse vis-à-vis des vibrations induites par la nacelle pivotante.

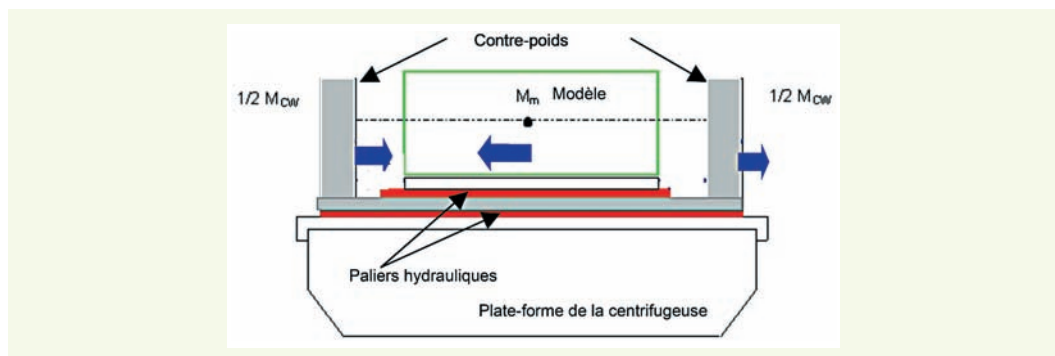
**figure 35**  
 Vue d'ensemble de la table vibrante embarquée.



Les tables sismiques classiques sont installées sur des massifs de réaction, importants pour filtrer les vibrations parasites. Cette solution n'est pas envisageable dans une centrifugeuse, car elle limiterait de façon drastique la charge utile. Par ailleurs, la centrifugeuse a ses propres modes de vibration, qu'il ne faut pas exciter pendant l'essai. Le découplage du simulateur et de la nacelle est donc très important pour la sécurité de la machine.

La société Actidyn Systèmes a résolu ce problème en embarquant des contrepoids : les vérins actifs transmettent le mouvement entre la table du simulateur et les contrepoids, lesquels sont découplés de la nacelle grâce à des paliers hydrauliques. L'équilibre dynamique global est maintenu par le déplacement réciproque de la charge utile et des contrepoids. Ainsi le simulateur comprend deux tables superposées sur des paliers hydrauliques : la table portant les contrepoids sur la base du simulateur et la table portant la charge utile au-dessus de la table de contrepoids (figure 36). La base du simulateur est un réservoir pour le retour de l'huile. Les centres de masse des contrepoids et de la charge utile doivent être sur le même niveau. Une installation hydraulique spécifique a été implantée sur la centrifugeuse pour faire fonctionner le simulateur de séismes visible en partie sur la figure 1 [24-26].

**figure 36**  
 Principe de la réciprocité des mouvements de la charge utile et des contrepoids.



L'ensemble de l'électronique de contrôle-commande du simulateur, comprenant l'électronique de pilotage des servoverins, et le contrôleur Matrix de Data Physics est installé sur le pivot de la centrifugeuse. Le tout est piloté par un PC, depuis la salle de commande située à une vingtaine de mètres, au travers d'une liaison fibre-optique et d'un contact tournant optique.

La table vibrante est mise en mouvement par deux vérins hydrauliques linéaires. Chaque vérin est alimenté par une servovalve proportionnelle à deux étages de la société Team Corporation, capa-



ble de forts débits associés à une bande passante très large. Les vérins, pilotés indépendamment, agissent en parallèle et développent une force totale de 220 kN appliquée simultanément à la masse mobile (contrepois et conteneur). Chaque ensemble vérin, servovalve, table vibrante est asservi en position. La bande passante de chaque ensemble ainsi asservi est de 120 Hz. Pour les fréquences supérieures à 120 Hz, le contrôleur de vibration supervise et pilote la table vibrante en accélération, compensant dans le même temps les non-linéarités du système hydraulique ainsi constitué. Pour cet ensemble, une méthode de mise en œuvre qui tient compte de la non-linéarité de la réponse du circuit hydraulique est de mise.

Après la mise en pression des paliers hydrauliques, puis la mise en rotation de la centrifugeuse, une première étape de pré-test est engagée. Le signal de commande est une série de séquences de bruit blanc à bas niveau. Deux accéléromètres placés sur les têtes des vérins permettent de calculer des fonctions de transfert par moyenne des réponses à ces bruits blancs successifs. Dès qu'une première fonction de transfert est obtenue, le signal de commande est calculé à partir de la valeur désirée du séisme, puis réduit de 12 à 18 dB. La fonction de transfert est adaptée à partir du résultat et l'opération est répétée en utilisant un plus faible facteur de réduction du séisme objectif. Cette correction progressive des fonctions de transfert et du signal de commande permet de tenir compte de la non-linéarité du système. L'opérateur choisit le rythme de l'augmentation d'amplitude et le taux de correction.

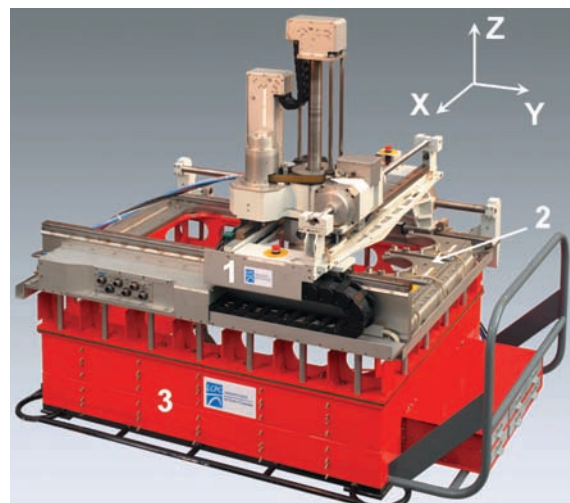
### ■ Téléopérateur

À la suite d'essais sur le comportement de parois de soutènement, Garnier [92] a évoqué pour la première fois l'intérêt de développer un robot multifonction permettant d'enchaîner différentes opérations sur un modèle. Ce robot à quatre axes (les trois coordonnées cartésiennes et la rotation d'axe vertical ; **figure 37a**) a été mis en service en 1997 au LCPC [93]. Les premières applications ont concerné l'étude de soutènement [94, 60, 95-97]. Piloté en manuel ou en automatique, ce robot dispose d'un magasin à trois outils interchangeables (**figures 37a** et **37b**). Chaque outil est équipé d'une interface standard permettant une alimentation en fluide (eau, air ou huile) et une connexion électrique.

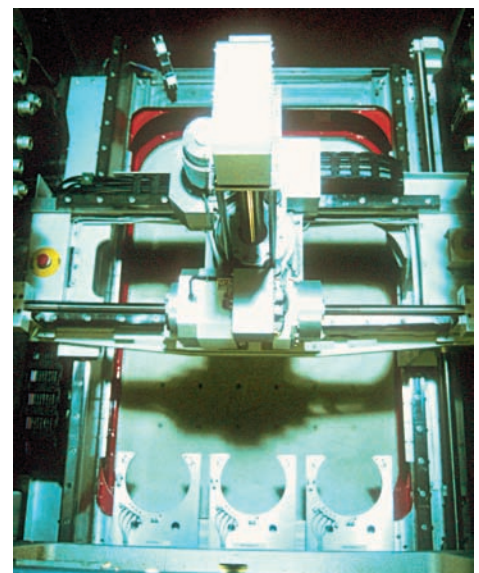
L'opérateur dispose d'une bibliothèque de fonctions codées et de commandes entrées-sorties *Tout Ou Rien*, laquelle est gérée par une commande numérique NUM 800 assurant les dialogues avec l'automate (liaison série RS485). Le système de contrôle-commande est dédoublé, l'un se trouvant au pivot de la centrifugeuse et l'autre dans une salle de préparation.

**figure 37**

*Téléopérateur assurant l'interface mécanique avec le conteneur*  
*a : téléopérateur posé sur sa réhausse ; bipoutre portant la colonne Z (1), magasin à trois outils (2), charriot de transport (3)*  
*b : téléopérateur en position de travail dans la nacelle.*



a | b

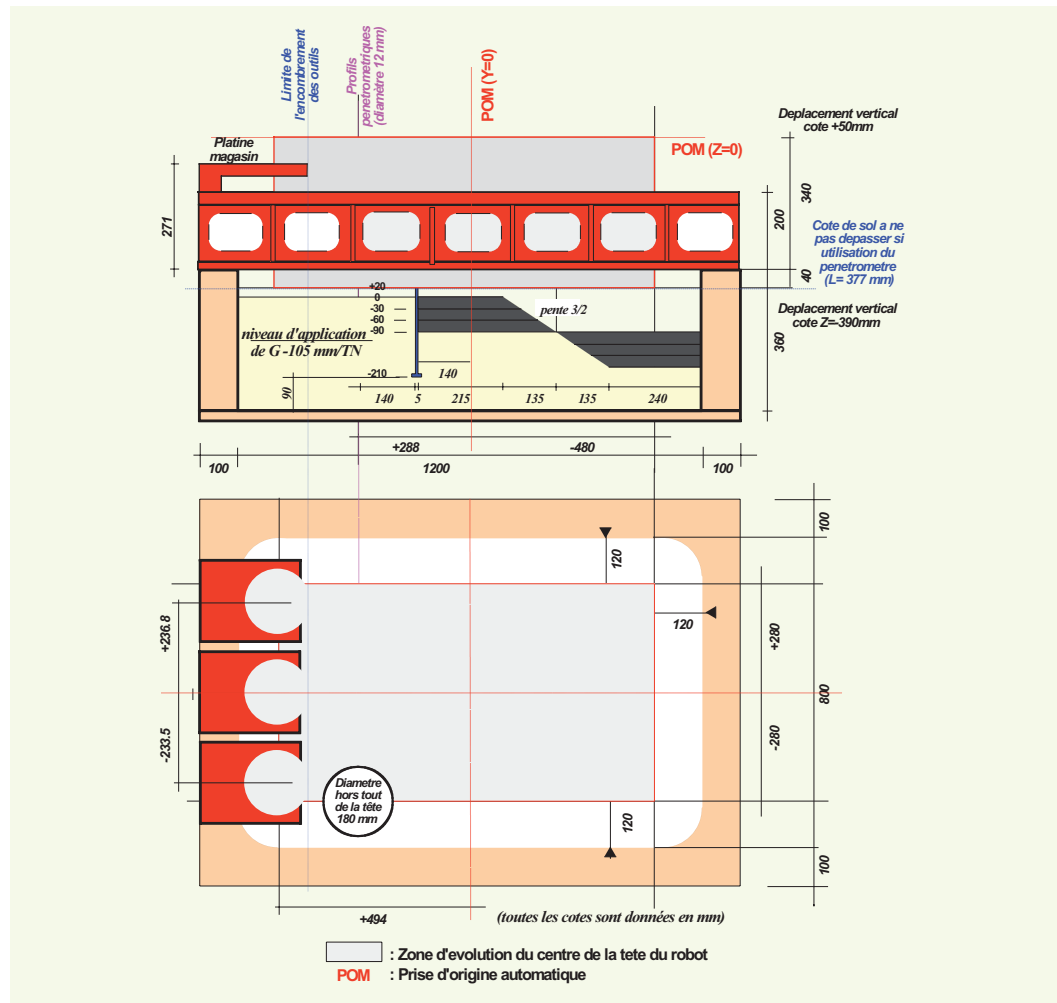


La **figure 38** présente un exemple d'utilisation du robot lors d'une campagne d'essais d'excavation devant une paroi instrumentée avec l'enchaînement de différentes prises d'outils :

- excavation de quelques millimètres sur une hauteur totale de 90 mm ;
- reconnaissance au pénétromètre après changement d'outils pour estimer la décompression du massif derrière la paroi ;
- chargement de fondation filante après le choix d'une étape de déblaiement.

Par référence à la prise d'origine POM, les performances du robot sont récapitulées dans le **tableau 9**.

**figure 38**  
Vue schématique des expérimentations d'excavation avec le téléopérateur.

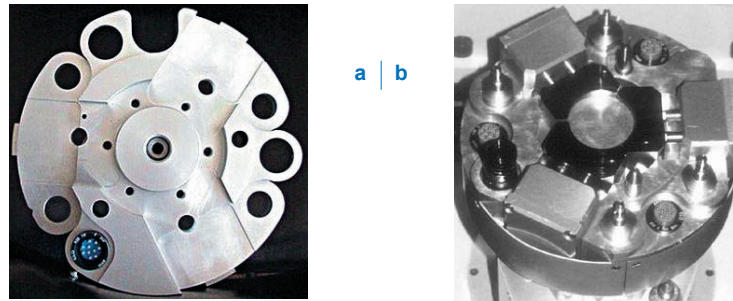


**tableau 9**  
Performances principales du robot.

Paramètre	Axe X	Axe Y	Axe Z	Axe $\theta z$
Déplacement (mm)	$\pm 280$	- 480 à + 498	- 390 à + 5	
Rotation (degré)				$\pm 176$
Vitesse maximale ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) et ( $\text{degré} \cdot \text{s}^{-1}$ )	80	50	50	20
Effort (N)	1 000	250	- 4 500 à + 5 000	
Couple (N · m)				0,5

Tous les outils possèdent une embase identique (**figure 39a**) pour assurer leur connexion automatique sous la tête du robot (**figure 39b**) et un repérage propre permettant une reconnaissance binaire de l'outil.

**figure 39**  
a : embase universelle  
b : tête rotative (vérins de prise d'outil, connexions électriques et fluidiques).

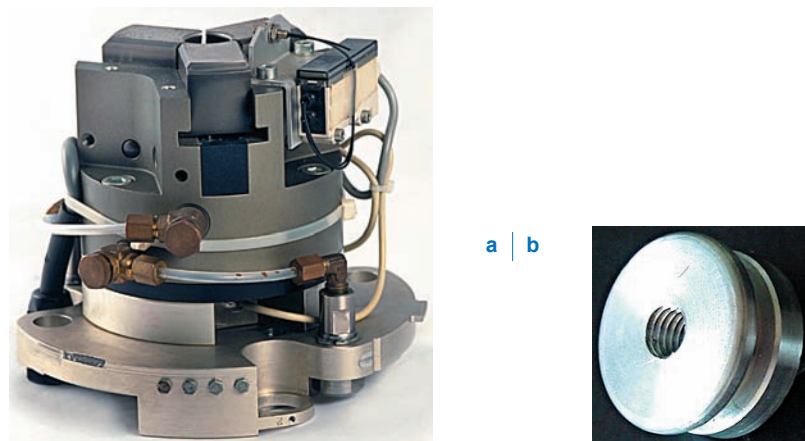


Quelques outils primaires ont été réalisés pour un usage général :

- deux pénétromètres de diamètres 12 mm et 8 mm
- un outil pince (**figure 40a**) pour la préhension d'un objet dans la zone d'évolution du robot si l'objet est équipé d'un adaptateur axisymétrique (**figure 40b**).

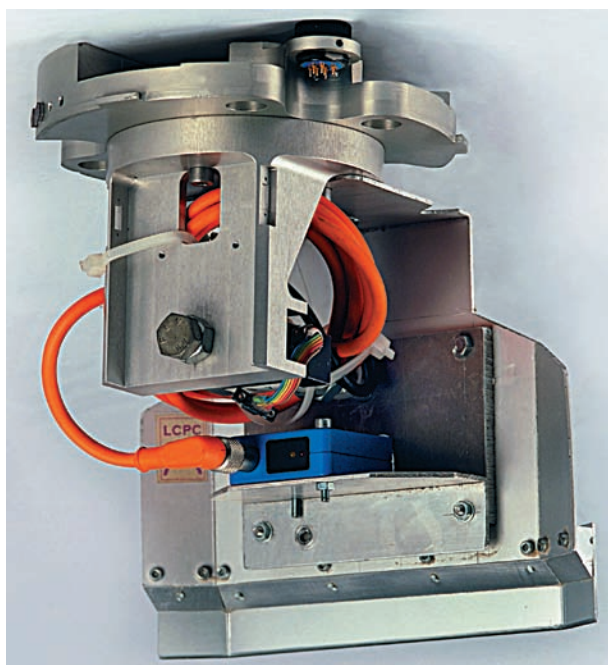
Pour cet outil, la technique de repérage de l'objet se fait par cartographie. Un laser permet de réaliser un repérage X et Y des contours de l'objet. La moyenne des relevés de cotes permet d'en déterminer le centre et le robot se positionne automatiquement à l'aplomb de l'objet de façon à déterminer son altitude (méthode du seuil de détection). La valeur de correction est alors récupérée et introduite dans le programme pour la saisie de l'objet

**figure 40**  
Outil pince pour prise d'objet  
a : pince pneumatique à trois mors avec contrôle de présence  
b : adaptateur pour prise d'objet.



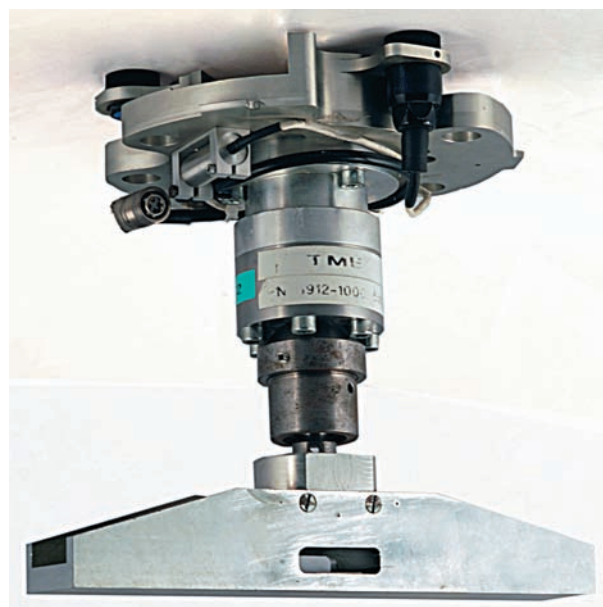
Plusieurs outils ont été mis au point pour des applications spécifiques [60].

- Un outil de nivellement (**figure 41**) permet d'évacuer du matériau de nature sableuse en raclant la surface du massif par passes successives ; cinq passes suffisent pour couvrir la largeur d'un conteneur (800 mm) avec une largeur d'outil de 220 mm à condition d'assurer un bon recouvrement entre deux passes successives. La pelle est équipée de retours latéraux visant à minimiser les pertes de matériau pendant le poussage. L'outil est équipé d'un capteur de force (capteur TME de 2 000 N en S) pour contrôler les efforts horizontaux par le poussage. Au fur et à mesure que l'excavation progresse, l'épaisseur de la passe diminue de manière à garder des valeurs de moments admissibles dans la colonne Z. Si par exemple une épaisseur de couche de 3 mm est acceptable en début d'excavation, on la réduira de moitié (1,5 mm) à une profondeur de 90 mm. Pour ce type d'opération, une vitesse d'exécution de 10 à 5 mm · s<sup>-1</sup> est généralement adoptée, avec une vitesse de transfert de 25 mm · s<sup>-1</sup>. Cet outil d'excavation est également muni d'une fenêtre par où un laser (Wenglor



**figure 41**

Outil de déblaiement par nivellement équipé d'un laser de positionnement et d'un capteur de force [60].



**figure 42**

Embase équipée d'un capteur de force et d'une fondation filante rotulée [60].

type YP06MGVL 80 ; distance focale 50 mm, étendue  $\pm 10$  mm) vient détecter la présence de la structure et contrôler son approche au plus près sans risque de la toucher.

- Un outil de chargement de fondation, constitué d'une semelle rotulée équipée de son propre capteur de force (figure 42), est récupéré par le robot après exécution des séquences de déblaiement pour opérer le chargement de la fondation en utilisant la fonction de pilotage en déplacement directement sur le PC *via* le contrôle-commande.

Les différentes fonctionnalités du robot offrent de nombreuses possibilités de développer des outils spécifiques, autant pour l'exécution de tâches particulières que pour améliorer la reconnaissance des massifs de sol en vol (outil de cartographie par laser).

## CONCLUSIONS

La maîtrise des mesures sur des modèles réduits centrifugés passe par la prise en compte de la spécificité du champ de macrogravité qui règne dans ce milieu, ainsi que de l'espace réduit disponible et de la nécessaire miniaturisation à réaliser sur les modèles embarqués dans la centrifugeuse. Les données contrôlées, obtenues en utilisant des capteurs du commerce ou des techniques de mesure développées spécifiquement, en particulier avec l'appui du Service Métrologie et Instrumentation du LCPC, ont pu être utilisées afin d'accroître la connaissance du comportement des ouvrages géotechniques. Si certaines techniques en sont au stade de l'étude de faisabilité, d'autres constituent déjà des piliers de l'instrumentation en centrifugeuse.

Le développement d'appareillages spécifiques permet de réaliser des caractérisations géotechniques en vol inspirées des essais *in situ* (pénétromètre, scissomètre, pressiomètre, T-Bar), ainsi que d'agir à distance sur les modèles avec des vérins, un robot 4 axes ou un simulateur de séismes embarqué.

Les évolutions constantes des techniques de mesure nécessitent d'assurer une veille technologique, en particulier dans le cadre des échanges réguliers entretenus avec les centres de recherche équipés d'une centrifugeuse, localisés principalement en Europe, en Amérique et en Asie, dans le but d'intégrer de nouveaux moyens pour le développement des outils et la conduite des expérimentations.

Depuis ses débuts, l'équipe travaillant autour de la centrifugeuse du LCPC a ainsi participé ou participe encore aujourd'hui :

- à cinq programmes européens, à savoir Stimulation (1986-1988), Science (1992-1995), NECER (1996-2001), Quaker (2002-2006) ; MUSE (2004-2008) ;
- à sept projets nationaux ou projets ANR, à savoir FOREVER, CLOUTERRE, ASIRI (2005-2009), MACROGRAVITE, GRECO-Géomatériaux, ARVISE (2007-2010), SOLCYP (2008-2011) ;
- au projet régional R2GC (2007-2010).

L'équipe a également accueilli trente-six doctorats, pour un tiers entièrement liés à la centrifugeuse.

L'équipe a également bénéficié de douze contrats de recherche dans le domaine des fondations off-shore, dont une étude sur les fondations du pont Rion-Antirion, et de nombreuses recherches sur les ancrages de plate-forme off-shore et sept conventions de recherche bilatérales (dont trois en cours).

La modernisation récente des systèmes d'acquisition de données a permis d'accéder à une plus grande fréquence d'échantillonnage et une meilleure convivialité des logiciels, accroissant la qualité métrologique.

L'évolution de la Mesure en macrogravité sur modèles réduits d'ouvrages géotechniques illustre le chemin parcouru au LCPC depuis le rapport de Pilot [99] en 1975, qui indiquait déjà que la centrifugeuse *apporte une voie originale qui complète la panoplie des voies usuelles d'étude et de recherche.*

#### REMERCIEMENTS

*Les auteurs tiennent à remercier J.-L. Chazelas pour la relecture de cet article, J.-F. Ringot et H. Delahousse pour une grande partie de l'iconographie, ainsi que la Division Métrologie et Instrumentation pour son soutien régulier dans le développement de l'instrumentation et des appareillages utilisés en centrifugeuse, en particulier F. Derkx et ses collaborateurs.*

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **PERDIJON J.**, La mesure. Histoire, science et philosophie, **2004**, Dunod, 137 p.
- 2 **PHILIPS E.**, De l'équilibre des solides élastiques semblables, *comptes rendus hebdomadaires des séances de L'Académie des Sciences*, vol. 68, série 2, **1869**, 75-79.
- 3 **CORTÉ J.-F.**, Essais sur modèles réduits en géotechnique. Rapport général. Session 11. Essais sur modèles. *XII ICSMFE*, Rio, août **1989**, Vol. 4, pp. 2553-2571.
- 4 [www.tc2.civil.uwa.edu.au](http://www.tc2.civil.uwa.edu.au), site du comité technique TC2 *physical modelling in geotechnics* de la société internationale de mécanique des sols et de la géotechnique.
- 5 **CORTÉ J.-F.** (ed.), International Conference Centrifuge 88. Paris, avril **1988**, Balkema, 610 p.
- 6 **KO H.Y., MC LEAN F.G.** (eds), International Conference Centrifuge 91, Boulder, Balkema, **1991**, 633 p.
- 7 **LEUNG C.F., LEE F.H., TAN E.T.S.** (eds), International Conference Centrifuge 94. Singapore, Balkema. **31 aug-2 sep 1994**, 836 p.
- 8 **KIMURA T., KUSAKABE O., TAKEMURA J.** (eds), Int. Conference Centrifuge 98. Tokyo, Balkema, **1998**, 919 p.
- 9 **PHILLIPS R., GUO P.J., POPESCU R.**, Physical modelling in Geotechnics. *ICPMG'02*. ISBN 9058093891. Balkema, **2002**. 1025 p.
- 10 **NG, ZHANG, WANG** (ed.), Physical Modelling in Geotechnics. *6<sup>th</sup> ICPMG'06*, **4-6 august 2006**, Hong Kong, Taylor et Francis, 2 vol., 1608 p.
- 11 **GARNIER J.**, Modèles Physiques en Géotechnique : Etat des connaissances et développements récents. *1<sup>re</sup> Conférence Coulomb*, Paris CNIT La Défense, **2001**. 67 p.
- 12 **THOREL L. et GARNIER J.**, Des "G" aux techniques de modèles. *Vidéo LCPC de 20 mn, réal. J-F Ringot*. **2002**.
- 13 **BACHELARD G.**, La formation de l'esprit scientifique. *Vrin*, Paris, **1986**.
- 14 **DERKX F., THOREL L., GARNIER J., RAULT G., GAUDICHEAU P.**, Développements récents et perspectives des essais et des matériels de la modélisation physique en centrifugeuse. *Journées Sciences de l'Ingénieur LCPC*. ISSN 1628-4704, VVF Dourdan **9-11 déc. 2003**. pp. 433-438.
- 15 **POKROVSKI G.I., FEDOROV I.S.**, An investigation by means of models of stress distribution in the ground and the setting of foundations. *Technical physics of USSR*, **1935**, vol. 2, pp. 299-311.
- 16 **CRAIG W. H.**, Model studies of the stability of clay slopes. Ph.D. Univ. Manchester **1974**, 245 p.
- 17 **POKROVSKI G.I., FEDOROV I.S.**, Studies of soil pressures and soil deformations by means of a centrifuge *1st ICSMFE* Cambridge/Massachusetts, USA Vol 1, **1936**, p 70.

- 18 **MIKASA M., TAKADA N., YAMADA K.**, Centrifugal model test of a rockfill dam. *Proc. 7<sup>th</sup> ICSMFE*, vol. 2, **1969**, pp. 325-333.
- 19 **BUCKY P.B., SOLAKIAN A.G., BALDIN L.S.**, Centrifugal method of testing models. Photo elastic apparatus combined with a centrifuge to secure direct measurement of stresses. *Civil Engineering*, may, vol. 5 n° 5, **1935**, pp. 2872-2890.
- 20 **PANEK L.A.**, Centrifugal testing apparatus for mine structure stress analysis. United States department of the interior/ Bureau of mines, Washington, United States Vol 4883, **1952**, pp. 1-40.
- 21 **GARNIER J., COTTINEAU L.-M.**, La centrifugeuse du LCPC : moyens de préparation des modèles et instrumentation. *Congrès International «Centrifuge'88»*, Paris, **avril 1988**, pp. 83-92.
- 22 **CORTÉ J.-F., GARNIER J.**, Une centrifugeuse pour la recherche en géotechnique. *Bull. liaison laboratoires des Ponts et Chaussées*. 146, *LCPC*, **nov-déc. 1986** pp. 5-28.
- 23 **NÉEL A.**, Banc de mesure pour la centrifugeuse LCPC. Application Spider Banc. *Manuel Utilisateur Document LCPC n° RMS/MS-2006-8-20-1/1-a*. **2006**, 53 p.
- 24 **DERKX F., THOREL L., CHAZELAS J.-L., S., RAULT G., BUTTIGIEG S., COTTINEAU L.-M., GARNIER J.**, Simulation de tremblement de terre sur modèles réduits centrifugés. *J. Nat. Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur*. JNGG, Lyon **27-29 juin 2006a**. Vol. I. 121-128.
- 25 **DERKX F., THOREL L., CHAZELAS J.-L., ESCOFFIER S., RAULT G., BUTTIGIEG S., COTTINEAU L.-M., GARNIER J.**, Dynamic tests and simulation of earthquakes in the LCPC's centrifuge. *6<sup>th</sup> ICPMG Int. conf. on physical modelling in geotechnics*, **august 4-6 2006b**, Hong Kong, ISBN 0415415861, Ng, Zhang et Wang (eds), pp. 181-186.
- 26 **DERKX F., THOREL L., CHAZELAS J.-L., ESCOFFIER S., RAULT G., BUTTIGIEG S., COTTINEAU L.-M., GARNIER J.**, Simulation de séismes sous Macro gravité en centrifugeuse : des équipements embarqués, conçus pour des conditions de service éprouvantes. *Essais Industriels*, ISSN : 1290-0206. n° 39, **2006c**, pp. 12-21.
- 27 **CHAZELAS J.-L., DERKX F., THOREL L., ESCOFFIER S., RAULT G., BUTTIGIEG S., COTTINEAU L.-M., GARNIER J.**, Physical modelling of earthquakes in the the LCPC's centrifuge. *1<sup>st</sup> Europ. Conf. Earthquake Engng et Seismology (1<sup>st</sup> ECEES)*, Genève, **3-8 sept. 2006**, paper 1064. 8 p.
- 28 **RANAIVOSON D.**, Dosage des granulats : étude des phénomènes d'écoulement et de voûte. Application à la conception des trémies doseuses. *Etudes et Recherches LPC, série Géotech.*, GT 46, **octobre 1991**, 280 p.
- 29 **GARNIER J., CHAMBON P., RANAIVOSON D., CHARRIER J., MATHURIN R.**, Computer image processing for displacements measurement : application to centrifuge modeling. *Int. Conf. Centrifuge'91*, Boulder, Colorado, **Juin 1991**, pp. 543-550.
- 30 [www.lcpc.fr/fr/produits](http://www.lcpc.fr/fr/produits).
- 31 **CHAMBON P., CORTE J.-F.**, Etude sur modèles réduits centrifugés. Application aux tunnels à faible profondeur en terrain meuble pulvérulent. *Etudes et recherches des LPC série géotechnique*, GT 48, **Décembre 1991**, 163 p.
- 32 **THOREL L., NOBLET S., GARNIER J., BISSON A.**, Capillary rise and drainage flow through a centrifuged porous medium. *Int. Symp. Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics*, La Baule, **15-17 may 2000**. pp. 251-258.
- 33 **THOREL L., NOBLET S., GARNIER J., BISSON A.**, Ascension capillaire et drainage dans un milieu poreux centrifugé. *Studia Geotechnica et Mechanica*, **2003** vol XXV, n° 1-2 pp. 47-57.
- 34 **WHITE D.J., TAKE W.A.**, Geo PIV : Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing. *Rapport univ. Cambridge CUED/D-SOILS/TR322*, **octobre 2002**, 14 p.
- 35 **WHITE D.J., TAKE W.A., BOLTON M.D.**, Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Géotechnique* 53, **2003**, n° 7, pp. 619-631.
- 36 **ASH G.**, Les capteurs en instrumentation industrielle. Dunod, Paris, **1999**, 834 p.
- 37 **TAYLOR J.**, Incertitudes et analyse des erreurs dans les mesures physiques. Dunod, Paris, **2000**, (édition originale : An introduction to error analysis, 1982, University science books) 315 p.
- 38 **SU\_7\_2 - LCPC. Métrologie - Gestion des moyens de mesure et d'essais 2006**, 6 p.
- 39 **DIEULESAINT E., ROYER D.**, Ondes élastiques dans les solides. Masson, **1974**.
- 40 **GOYAT Y., MUZET V., GUILLARD Y., THOREL L., GAUDICHEAU P., VINCESLAS G.**, La lumière structurée appliquée au génie civil : mesure des déplacements sans contact. *Journées Sciences de l'Ingénieur LCPC, VVF Dourdan 9-11 déc. 2003*. pp. 347-352.
- 41 **GOYAT Y., THOREL L., GAUDICHEAU P., RAULT G.**, Méthode optique de projection de franges. Application aux mesures sans contact en centrifugeuse géotechnique *Rapport LRPC Strasbourg / LCPC-RMS/MS n° 2002-1-04-1/1-a*, 24 p.
- 42 **BOULEBNANE A., LAREAL P., GARNIER J., COTTINEAU L.M.**, Mesure de la pression des sols dans les modèles réduits de sable centrifugés, *7<sup>ème</sup> congrès de l'association internationale de géologie de l'ingénieur*, Lisbonne, **septembre 1994**, 7 p.
- 43 **ASKEGAARD V.**, Design and application of stress and strain cells with small measuring errors, *NDT international*, **1981**.
- 44 **ASKEGAARD V.**, Normal and shear stress on a silo wall and stress and strain in a silo medium. *In Silos : Fundamentals of theory behaviour and design*, Brown et Nilsen (Eds), E et FN Spon, **1998**, pp. 686-698.
- 45 **TERNET O.**, Constitution et caractérisation des massifs de sable : application aux essais en centrifugeuse et en chambre de calibration. *Thèse de doctorat de l'Université de Caen*. **1999** 184 p.
- 46 **DUCCAS V.**, Etude expérimentale des composantes normales des contraintes totales en laboratoire et in situ. *Thèse de doctorat de l'ENPC*. **2001**, 424 p.
- 47 **GARNIER J., TERNET O., COTTINEAU L.-M., BROWN C.J.**, Placement of embedded pressure cells. Technical Note. *Géotechnique* 49, **1999**, n° 3, pp. 405-414.
- 48 **EVESQUE P., NOBLET S., RAULT G.**, Stress in conic piles determined by a centrifuge experiment : breakdown of scaling hypothesis. *Physical review E*, vol 59 n° 6. **1999**. *Rapid communication*. R6259-6262.
- 49 **OVESSEN N.K.** The scaling law relationships. Design parameters in geotechnical engineering. *7<sup>th</sup> E.C.S.M.F.E.*, Brighton, Vol. 4, pp. 319-323.
- 50 **LAUE J.** Centrifuge technology. *Workshop on constitutive and centrifuge modelling : two extremes*. Monte verita. Springman ed. Balkema, **2002** pp. 93-95.

- 51 **SPRINGMAN S.M., NATER P., CHIKATAMARIA R., LAUE J.**, Use of flexible tactile pressure sensors in geotechnical centrifuges. *Int. Conf. Physical Modelling in Geotechnics*, Phillips et al. ed., Balkema, **2002**, pp. 113-118.
- 52 **TSUHA C.H.C., AOKI N., RAULT G., THOREL L., GARNIER J.**, Physical modelling of helical pile anchors. *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics*, **2008**.
- 53 **ROSQUOËT F., THOREL L., GARNIER J., CANEPA Y.**, Horizontal cyclic loading of piles installed in sand. *Soils and Foundations* **2007**, vol. 47, n° 5, pp. 821-832.
- 54 **BOUAFIA A.**, Modélisation des pieux chargés latéralement en centrifugeuse, *Thèse ENSM*, Nantes, **1990**, 267 p.
- 55 **MEZAZIGH S.**, Etude expérimentale de pieux chargés latéralement : proximité d'un talus et effet de Groupe, *Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil, ECN*, **1995, 28 nov.**, 217 p. + Annexes 55 p.
- 56 **REMAUD D.**, Pieux sous charges latérales : étude expérimentale de l'effet de groupe. *Thèse de doctorat de l'Université de Nantes*, **1999**.
- 57 **RAULT G., THOREL L., GARNIER J.**, Modélisation physique de fondations et d'ouvrages maritimes. *Mécanique et Industries*. ISSN 1296-2139. vol. 7, **2006**, pp. 223-230.
- 58 **BAUDOIN G., THOREL L., RAULT G., GARNIER J.** Renforcement de sols compressibles par inclusions rigides : dispositif pour la modélisation en centrifugeuse d'une maille élémentaire. *XXVèmes rencontres universitaire de Génie Civil, Conception et vie des ouvrages*, Bordeaux **23-25 mai 2007**, 8 p.
- 59 **THOREL L., BAUDOIN G., RAULT G., DERKX F., BUTTIGIEG S., GARNIER J.**, Modélisation en centrifugeuse du renforcement de sols compressibles par inclusions rigides : dispositifs pour l'étude du transfert de charge par cisaillement. *18e congrès français de mécanique*, Grenoble, **27-31 août 2007 XIVème Colloque franco-polonais : Mécanique des Sols et des Roches appliquée. CD-ROM, article CFM2007-1319**, 6 p.
- 60 **GAUDIN C.**, Modélisation physique et numérique d'un écran de soutènement autostable. Application à l'étude de l'interaction écran-fondation. *Thèse de L'Université de Nantes ; ED MTGC*, **2002**, 410 p.
- 61 **AKOU Y., MAGNAN J.-P., RAULT G.** Etude sur modèles de l'élargissement des remblais sur sols compressibles. *Etudes et recherches des LPC série géotechnique, GT 64*, **Octobre 1998**, 213 p.
- 62 **ROSQUOËT F.**, Pieux sous charge latérale cyclique. *Thèse présentée devant l'école doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil de l'Université de Nantes et de l'Ecole Centrale de Nantes*, **22 oct. 2004**. 305 p.
- 63 **GARNIER J., THOREL L., HAZA E.** (Eds), International Symposium on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics, La Baule, **15-17 may 2000**. LCPC, 392 p.
- 64 **ISO/TS 17892-1** : Reconnaissance et essais géotechniques -- Essais de laboratoire sur les sols - Partie 1 : Détermination de la teneur en eau. **2004**. 7 p.
- 65 **GÜNZEL F.K., CRAIG W.H., CRANÇON P., COTTINEAU L.-M., KECHAVARZI C., LYNCH R., MERRIFIELD C. M., OUNG O., SCHENKEVELD F.M., SOGA K., THOREL L., WESTSTRATE F.A.**, Evaluation of Probes and Techniques for Water Content Monitoring in Geotechnical Centrifuge Models. *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics*, vol. 3.1, **2003**, pp. 31-43.
- 66 **DUPAS A., COTTINEAU L.M., THOREL L., GARNIER J.**, Capacitive sensor for water content measurements in centrifuged porous media. *Proc. Int. Symp. Phys. Model. et Testing in Env. Geot.*, **15-17 May 2000**. pp. 11-18.
- 67 **DUPAS A., COTTINEAU L.M., THOREL L., GARNIER J.**, Capteur capacitif pour la mesure de teneur en eau dans les milieux poreux. *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol XXV, **2003**, n° 1-2 pp. 27-36.
- 68 **CHIU C.F., CUI Y.J., DELAGE P., DE LAURE E., HAZA E.**, Lessons learnt from suction monitoring during centrifuge modeling. *In Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Tatantino et al. (ed.), Taylor et Francis Group, London. **2005** pp. 3-8.
- 69 **CASINI F., MUNOZ J.J., LOURENÇO S., VAUNAT J., PEREIRA J.M.**, Results of the first campaign at LCPC facilities, Nantes. Rapport interne CERMES. **2006**, 54 p.
- 70 **LOURENÇO S.D.N., GALLIOLI D., TOLL D.G., EVANS F.D.**, Development of a commercial tensiometer for triaxial testing of unsaturated soils. *UNSAT 2006*. 12 p.
- 71 **MUNOZ J.J., CASINI F., LOURENÇO S., VAUNAT J., PEREIRA J.-M., THOREL L., GARNIER J., DELAGE P., ALONSO E., GALLIOLI D.**, Centrifuge modelling of the bearing capacity of a shallow foundation on an unsaturated soil layer. *1<sup>st</sup> Eur. Conf. Unsaturated Soils*. Durham, **July 2008**. (abstract accepted)
- 72 **GARNIER J., DERKX F., COTTINEAU L.-M., RAULT G.**, Etudes géotechniques sur modèles centrifugés. Evolution des matériels et des techniques expérimentales. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 223, LCPC, **sept-déc 1999** pp. 27-50.
- 73 **THOREL L., RAULT G., GAUDIN C., GARNIER J., FAVRAUD C.**, Un pressiomètre miniature pour la caractérisation des massifs de sol en centrifugeuse. *Int. Symp 50 years of pressuremeters ISP5*, **22-24 août 2005**, Gambin et al. (ed.), pp. 127-142.
- 74 **THOREL L., GAUDIN C., RAULT G., GARNIER J., FAVRAUD C.**, A cone pressuremeter for soil characterization in centrifuge. *Technical Note. Int. J. Physical Modelling in Geotechnics*, **2007**, vol. 7, n° 1, pp 25-32.
- 75 **LUNNE T., ROBERTSON P.K., POWELL J.J.M.**, Cone penetration testing in geotechnical practice SPON, **2002**, 312 p.
- 76 **CORTE JF, GARNIER J, COTTINEAU L.M., RAULT G.**, Determination of soil properties in the centrifuge, *Int. Conf. Centrifuge '91*, Boulder/Colorado, Balkema, **13-14 June 1991**, pp. 607-614.
- 77 **RENZI R., CORTÉ J.-F., RAULT G., BAGGE G., GUI M., LAUE J.**, Cone penetration tests in the centrifuge : Experience of five laboratories, *Centrifuge '94*, Singapore, Balkema. **31 aug-2 sep 1994**, pp. 77-82.
- 78 **STEWART D.P., RANDOLPH M.F.**, A new site investigation tool for the centrifuge. *Centrifuge 91*, Ko (ed.) **1991** Balkema, pp. 531-538.
- 79 **GARNIER J.**, Modèles physiques en géotechnique. I- Evolution des techniques expérimentales et des domaines d'application. *Revue Française de géotechnique*, **2001**, 97, pp. 3-29.
- 80 **NAKAMURA A., FUKASAWA T., TANAKA H.**, Applicability of T-Bar and ball penetration tests to soft clay in ground in Japan. *ISOPE 2007, Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, 8 p.
- 81 **SIEFFERT J.-G., LEVACHER D.**, Etude de l'effet d'échelle de pieux battus en cours de centrifugation. *Revue Française de Géotechnique*, **1995**, 70, pp. 55-68.

- 82 **HAJIALILUE BONAB M., CHAZELAS J.-L., FAVRAUD C., LEVACHER D.**, Simulation of soil-pile interaction under lateral impact loads. *Int. Conf. on Physical Modelling in Geotechnics. ICPMG'02* St. John's, Newfoundland, Canada. **July 10-12, Balkema, 2002**, pp. 415-419.
- 83 **HAJIALILUE BONAB M.** Modélisation physique et numérique d'un pieu isolé dans du sable soumis à un impact latéral en tête. *Thèse de doctorat, Université de Caen, 2003*, 227 p.
- 84 **HAJIALILUE BONAB M., CHAZELAS J.L., FAVRAUD C., COTTINEAU L.M.** An electromagnetic horizontal impact device for centrifuge testing. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2007*, vol. 1, 1-11.
- 85 **HAJIALILUE BONAB M., CHAZELAS J.L., LEVACHER D.** Procedures used for dynamically laterally loaded pile tests in a centrifuge. *Geotechnical Testing Journal, 2007*, vol. 30, n° 1, 60-68.
- 86 **DAVIES M.C.R.** (coordinator), *Fault-Rupture and Strong Shaking Effects on the Safety of Composite Foundations and Pipeline Systems : Quantification and Reduction of Seismic Risk Through the Application of Advanced Geotechnical Engineering Techniques*. European programme QUAKER Final report. Contract number EVG1-CT-2002-00064. **2007**, 140 p.
- 87 **MURILLO C., CAICEDO B., THOREL L., GARNIER J.**, Characterization of centrifuge model using SASW techniques *6th ICPMG Int. conf. on physical modelling in geotechnics, august 4-6 2006*, Hong Kong, Ng, Zhang et Wang (eds), Taylor et Francis, pp. 223-228.
- 88 **MURILLO C.**, Caracterizacion geotecnica de estructuras multicapas en centrifuga empleando ondas de superficie. *Tesis doctoral, Universidad de Los Andes, Bogota, 2006*, 198 p.
- 89 [www.cedrat.com](http://www.cedrat.com).
- 90 **MURILLO C.**, Vibration isolation using geofoam barriers in Centrifuge. **2007**, *rapport LCPC*. 54 p.
- 91 **CHAZELAS J.-L.**, Quinze ans de simulation sismique en centrifugeuse dans le monde., *5<sup>ème</sup> Colloque National de Génie Parasismique AFPS'99, ENS Cachan, 1999*, pp. 163-170.
- 92 **GARNIER J.**, Modélisation par centrifugation. Parois souples, lisses et rugueuses. *Compte-rendu d'essais, LCPC, rapport FAER 1.06.51.3. 1983*, 46 p.
- 93 **DERKX F., MERLIOT E., GARNIER J., COTTINEAU L.M.**, On-board remote-controlled robot. *Int. Conf. Centrifuge 98. Tokyo 23-25 sept. 1998*, Balkema, pp. 97-102.
- 94 **BODIN D., GAUDIN C., GARNIER J.** Etude sur modèles réduits du comportement d'une paroi de soutènement. *Journées Génie civil - Génie Côtier, Caen, Mai 2000*, 8 p.
- 95 **GAUDIN C., GARNIER J., RAULT G., GAUDICHEAU P.**, Use of a robot for in-flight excavation in front of an embedded wall - *International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. ICPMG'02 ISBN 90 58093891, July 10-12, 2002* St. John's, Newfoundland, Canada, pp. 77-82.
- 96 **GAUDIN C., GARNIER J., DELATTRE L.**, Modélisation physique d'un écran de soutènement autostable : contribution à la validation des méthodes de dimensionnement, *Revue Française de Géotechnique 2004*, n° 109, pp. 39-53.
- 97 **GAUDIN C., GARNIER J., THOREL L.**, Physical modelling of a cantilever wall. *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics, 2004*, vol. 2, pp 13-26.
- 98 **LEVACHER D., SIEFFERT J.G., COTTINEAU L.M.**, Le battage des pieux sur modèles centrifugés : Etude des conditions de similitude du battage - conception d'un batteur de pieu embarqué. *Programme macrogravité 92/93-MESR-METT* pp. 24-31.
- 99 **PILOT G.**, Centrifugation de modèles réduits d'ouvrages en terre et de fondations. *Rapport de recherche LCPC*, 48, **Octobre, 1975**, 41 p.



