

La presse triaxiale pour éprouvettes cylindriques creuses du LCPC adaptée à l'étude des sols naturels

Philippe REIFFSTECK*
Jean-Louis TACITA

Philippe MESTAT

*Université Paris-Est, LCPC,
Paris, France*

Franck PILNIÈRE

*CECP, CETE de l'Ouest,
Angers, France*

RÉSUMÉ

L'appareillage triaxial pour éprouvettes cylindriques creuses, développé il y a une cinquantaine d'années, s'est imposé comme un outil remarquable pour étudier le comportement des sols situés autour des ouvrages géotechniques ou soumis à des sollicitations alternées. Cet appareillage a permis d'effectuer un saut technologique que n'auraient jamais autorisé les essais triaxiaux classiques sur cylindres pleins. L'analyse d'essais de torsion sur éprouvettes cylindriques creuses a rendu possible l'élaboration de modèles rhéologiques plus complets qui permettent de prendre en compte le phénomène de la rotation des contraintes. L'évolution des matériels est présentée depuis la conception originale de la presse du Laboratoire du bâtiment et des travaux publics (LBTP) jusqu'à la presse triaxiale pour éprouvettes cylindriques creuses du Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC). Les procédures et la méthodologie développées au LCPC pour réaliser ce type d'essai sont également détaillées. Les premiers résultats obtenus sur des sols naturels sont enfin présentés.

The LCPC triaxial press for hollow cylindrical specimens adapted to studying natural soils

ABSTRACT

The triaxial device for hollow cylindrical specimens, developed some fifty years ago, has come to be considered as an outstanding tool for studying the behavior of soils located around geotechnical structures or subjected to alternating loadings. This set-up enabled a technological leap that would never have been possible with the classical triaxial tests on solid cylinders. An analysis of torsion tests on hollow cylindrical specimens has led to devising more complete rheological models that serve to incorporate the stress rotation phenomenon. The evolution in equipment will be presented from the original design of the LBTP (Construction and Public Works Laboratory) press all the way to the LCPC triaxial press for hollow specimens. The procedures and methodology developed at LCPC to conduct this type of test will also be discussed in detail. The article concludes by offering the initial results obtained on natural soils.

*** AUTEUR À CONTACTER :**

Philippe REIFFSTECK
philippe.reiffsteck@lcpc.fr

INTRODUCTION

Les réorientations des directions principales des contraintes par rapport à leur état naturel, sous l'effet d'une sollicitation extérieure, caractérisent le phénomène tridimensionnel appelé rotation des contraintes. Ce phénomène se rencontre très fréquemment et est commun à tous les massifs de sol et de roche dont l'état naturel est perturbé. Les nouvelles orientations sont caractérisées notamment par l'angle entre la contrainte principale majeure et l'axe vertical du repère géostatique orthonormé. Quelques illustrations de ce phénomène sont présentées sur la **figure 1**.

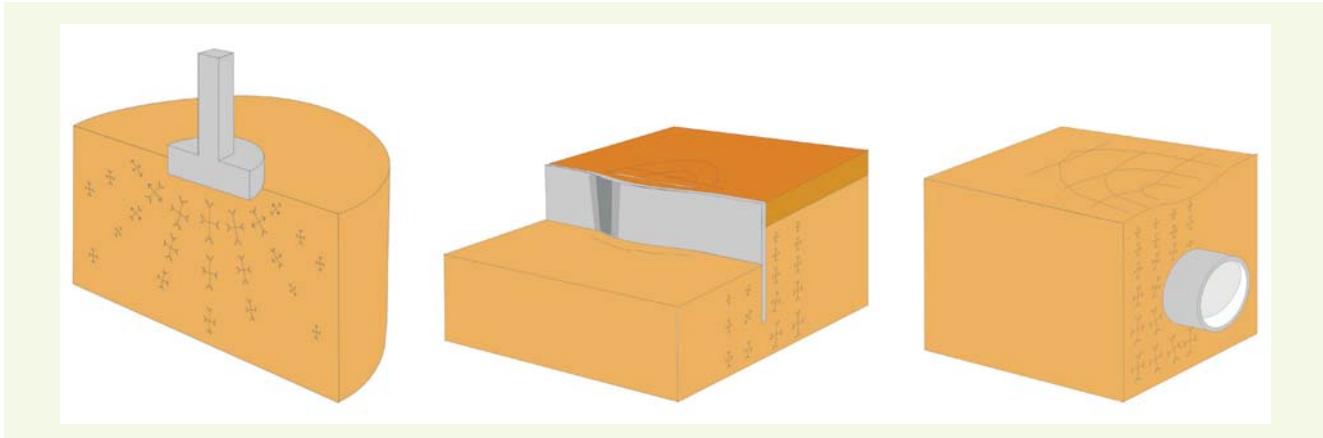


figure 1

Rotation des contraintes dans les massifs de sol :
a) fondation ;
b) soutènement ;
c) ouvrage souterrain.

a | b | c

De nombreuses recherches expérimentales ont été menées pour caractériser cette rotation des contraintes principales à l'intérieur des massifs. Les recherches ont porté notamment sur l'influence de l'orientation des contraintes sur l'évolution de la frontière du domaine élastique et la formulation de critères de plasticité et de rupture.

Différentes géométries d'éprouvettes peuvent être utilisées pour étudier cette influence : la tranche (éprouvette soumise à un état de déformation plane), le cube (presse triaxiale à six faces) et le cylindre creux. Théoriquement, l'appareil triaxial « vrai » (éprouvette cubique) est le seul à pouvoir imposer indépendamment les trois contraintes principales et donc à pouvoir explorer tout l'espace des contraintes principales. Toutefois, ces chemins en contraintes principales sont en cinématique irrotationnelle. D'autres essais dits rotationnels ont été aussi mis en œuvre : essai de cisaillement direct tel que la boîte de Casagrande, essais de cisaillement par torsion sur des éprouvettes cylindriques ou annulaires, essais de cisaillement simple, types NGI [1] et université de Cambridge [2], et essais de cisaillement directionnel imaginés par Arthur *et al.* [3]. Ces appareillages recèlent souvent beaucoup d'imperfections et de limitations comme :

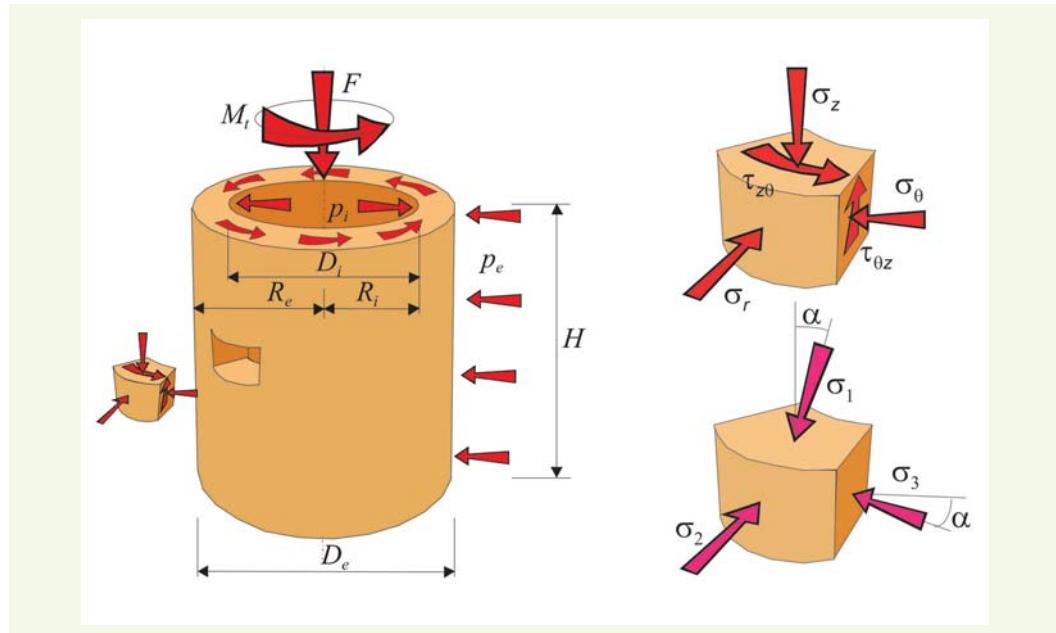
- une condition de déformations planes imposée, rendant l'état de contrainte mal défini ;
- une absence de maîtrise de la rotation des contraintes ;
- l'impossibilité d'atteindre de grandes déformations ;
- des problèmes d'uniformité des contraintes et des déformations dus à la géométrie de l'éprouvette [4] ;
- des effets néfastes des conditions aux limites, amplifiés par la taille souvent réduite de l'éprouvette.

Rares sont les travaux de recherche qui ont comparé les résultats de l'étude de la rotation des contraintes sur éprouvettes cubiques à ceux obtenus sur éprouvettes cylindriques creuses, et qui, de plus, se sont intéressés à la validation sur des essais de fondations [5]. Ces quelques études comparatives ont montré que l'essai de torsion sur éprouvettes cylindriques creuses était mieux adapté à l'étude de la rotation des contraintes, car même s'il ne résout pas complètement tous les problèmes de conditions aux limites, il permet d'en éviter la plupart et d'atténuer les effets des autres.

PRINCIPE DE L'ESSAI SUR CYLINDRE CREUX

Le principe de l'essai consiste à appliquer un couple M_t à une éprouvette cylindrique creuse mise en conditions triaxiales par l'application d'une force verticale F et les pressions interne p_i et externe p_e (**figure 2**). Les axes principaux tournent alors à partir de leur état initial et la position de la contrainte principale intermédiaire varie par rapport à celle des contraintes principales dites majeure

figure 2
Rotation des contraintes dans une éprouvette cylindrique creuse.



et mineure. L'application de certains chemins de contraintes ou de déformations spécifiques permet d'analyser l'influence de la rotation des axes principaux.

Par rapport à l'essai de cisaillement triaxial classique sur éprouvette cylindrique pleine, l'essai sur cylindre creux est caractérisé par le paramètre b , défini par Habib [6] :

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

où σ_1 , σ_2 et σ_3 sont respectivement, selon les conventions de la mécanique des sols, les contraintes principales majeure, intermédiaire et mineure.

Lors d'un essai sur éprouvette cylindrique creuse, la rotation est mesurée par l'intermédiaire de l'angle α , obtenu à partir de la construction du pôle du cercle de Mohr :

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \arctan \left(\frac{2\tau_{\theta z}}{\sigma_z - \sigma_0} \right) \text{ si } p_i = p_e \quad (2)$$

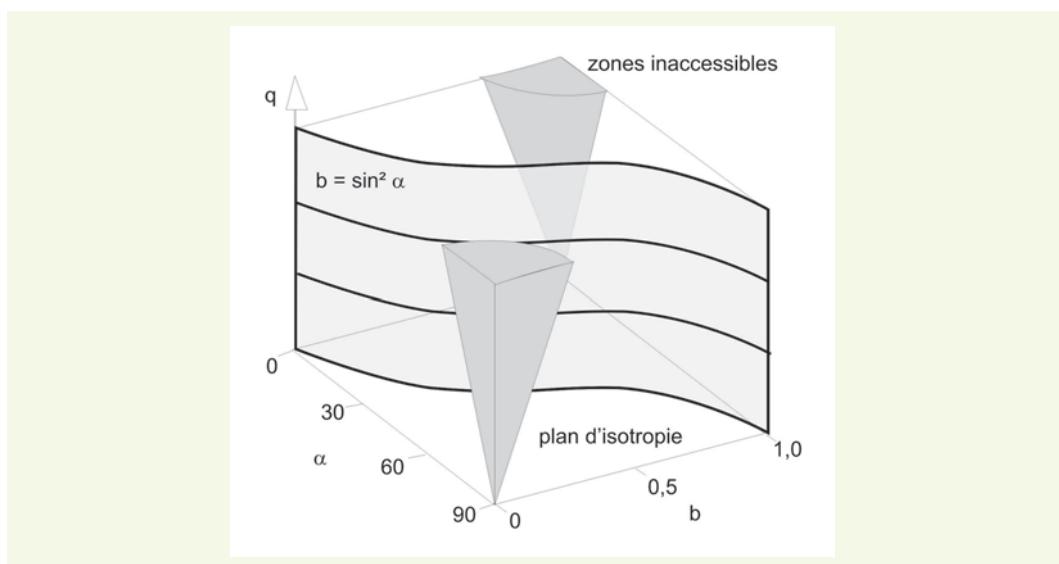
Cette mesure est impossible à faire dans un cylindre plein ou dans un cylindre creux non confiné. Différentes combinaisons de contraintes normales σ_r , σ_θ , σ_z et tangentielle $\tau_{\theta z}$ doivent être imposées à l'éprouvette pour obtenir des résultats à différentes valeurs de α . Pour découpler la rotation des contraintes de la contrainte principale intermédiaire, il est nécessaire d'appliquer une pression à l'intérieur du cylindre p_i différente de la pression appliquée à l'extérieur p_e .

Lorsque p_i est égale à p_e , le coefficient b est relié à l'angle de rotation des contraintes α par une fonction sinusoïdale. Le domaine d'investigation de l'appareil a alors la forme présentée sur la **figure 3**. Dans le cas contraire, tout l'espace peut être décrit, mais la déformation en tonneau provoquée par certains chargements crée un schéma de déformation non homogène. La contrainte radiale σ_r n'est en effet plus uniforme dans l'épaisseur de la paroi de l'éprouvette. Ceci correspond aux quarts de cônes représentés sur la **figure 3**.

Avec le développement des techniques de mesure et d'asservissement, il est devenu possible de piloter les essais en fonction des contraintes exprimées en coordonnées cylindriques par rapport à l'éprouvette, puis en contraintes principales [5, 7] ou dans l'espace des contraintes de Lambe avec les variables s , t et b [8] et enfin dans l'espace des contraintes de Cambridge (contraintes octaédriques) avec les variables p , q et α [9-11] (**tableau 1**).

figure 3

Potentiel des appareillages (avec q contrainte déviatoire définie dans le tableau 1).

**tableau 1**

Expression des contraintes (R_e et R_i définis sur la figure 2).

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$	$\sigma_z = \frac{F + \pi(R_e^2 p_e - R_i^2 p_i)}{\pi(R_e^2 - R_i^2)}, \quad \sigma_r = \frac{p_e R_e + p_i R_i}{R_e + R_i}, \quad \sigma_\theta = \frac{p_e R_e - p_i R_i}{R_e - R_i}, \quad \tau_{0z} = \frac{3.Mt}{2.\pi.(R_e^3 - R_i^3)}$
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{0z}^2}, \quad \sigma_2 = \sigma_r, \quad \sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_\theta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + \tau_{0z}^2}$
s, t, b ou μ	$s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad t = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad \mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$
p, q, α	$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad \alpha = \frac{1}{2} \cdot \arctan \left(\frac{2\tau_{0z}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \right)$

De manière plus anecdotique, les appareils d'essais triaxiaux sur éprouvettes cylindriques creuses ont servi à l'étude de l'expansion d'une cavité cylindrique pour valider la valeur de l'élancement de la sonde pressiométrique nécessaire pour être en accord avec la théorie de l'expansion de cavités de longueur infinie. Toutefois, les configurations des essais étaient différentes : les éprouvettes étaient des tubes épais et les sollicitations n'incluaient pas la torsion.

ÉTAT DES RECHERCHES AU PLAN INTERNATIONAL

D'après Saada et Townsend [12], c'est en 1936 que Cooling et Smith ont réalisé les premiers essais sur cylindre creux pour estimer la résistance au cisaillement pur de sols cohérents. Ces auteurs soumettaient pour cela leurs éprouvettes à une torsion sans confinement latéral. Habib [13] a été le premier à souligner l'importance de la rotation des contraintes et de la variation de la contrainte principale intermédiaire à l'aide d'essais de torsion sur cylindre creux. Ces essais ont été effectués au Laboratoire du bâtiment et des travaux publics (LBTP), suite à une question sur l'influence de la contrainte principale intermédiaire qui lui fut posée en séance du Comité français de mécanique des sols (CFMS) par Florentin le 24 avril 1951 [6]. Les essais furent effectués sur des éprouvettes de sable de rivière roulé à granulométrie étalée, moulées en forme de bobine (figure 4). La pression radiale était la pression atmosphérique et seules la force verticale et le couple étaient imposés en parallèle pour maîtriser le paramètre b (équation 1). Le mode opératoire fondé sur une application et un contrôle manuels des efforts pour réaliser des essais à b constant ne fut pas facile à mettre en œuvre.

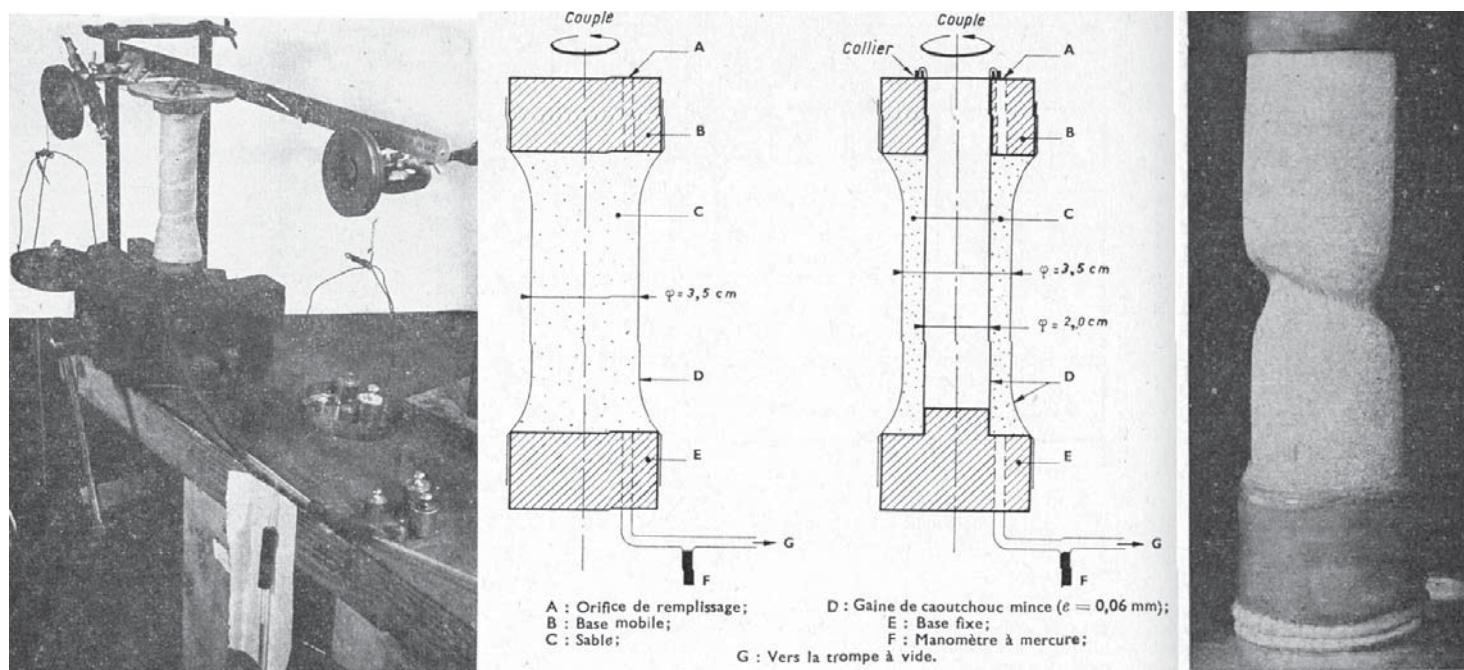


figure 4

Vue du dispositif en cours d'essai (a), géométrie de l'éprouvette (b) et vue de l'éprouvette après rupture (c) (d'après Habib [13]).

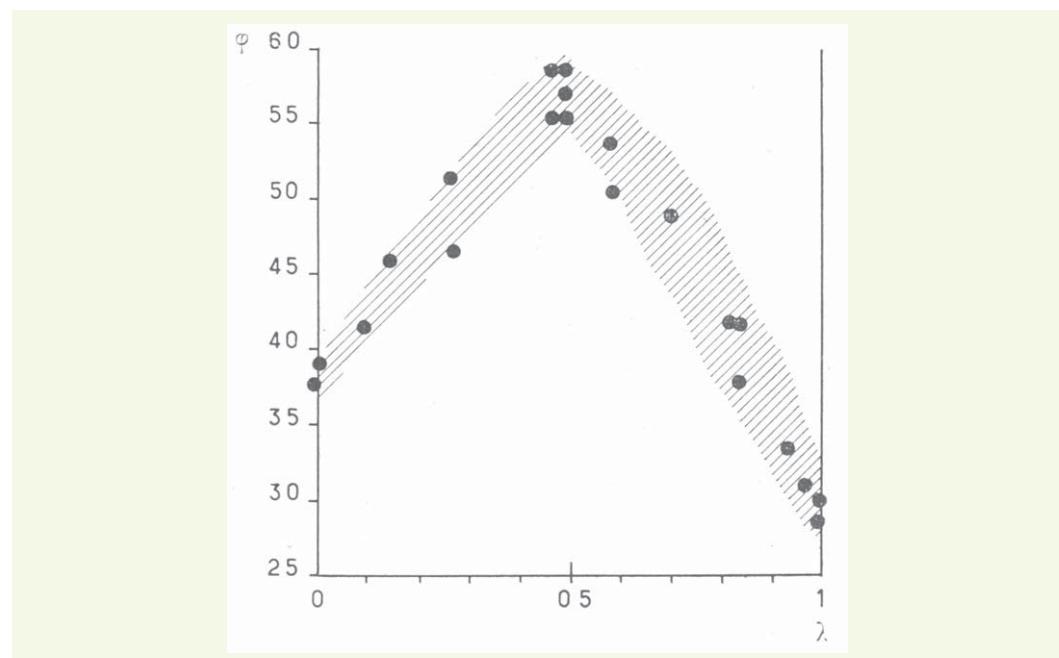
a | b | c

Habib a constaté que l'angle de frottement φ mesuré à la boîte de Casagrande et valant 36 degrés atteignait 43 degrés pour une contrainte principale intermédiaire médiane. Il écrit alors : « De toute façon, même si l'essai de torsion donne des résultats extrêmement étonnans, et peut être sujet à caution, l'existence d'un maximum de la résistance au cisaillement semble être un phénomène physiquement net. » (**figure 5**). Une deuxième série d'essais sur le sable de Fontainebleau fut publiée en 1953 dans les Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics (ITBTP) lors de la présentation de la thèse de P. Habib en séance du CFMS.

Cette recherche et les travaux menés par Kjellman [14] ont eu un écho considérable au plan international et furent à l'origine de nombreuses études sur le thème de la variation des invariants des contraintes lors de la rotation de celles-ci [15].

figure 5

Résultats d'essais dans le plan $b - \varphi$ (d'après Habib [13]).



Toutefois, ce n'est que vers les années soixante que Broms et Casbarian [7] et Saada et Baah [16] ont utilisé les premiers cylindres creux confinés, afin d'étudier les effets de la rotation des contraintes principales sur la résistance au cisaillement d'une argile remaniée.

Par la suite, de nombreuses études ont été réalisées pour :

- déterminer les dimensions optimales des éprouvettes afin d'avoir une distribution aussi uniforme que possible des contraintes et des déformations au cours du cisaillement [12, 17] ;
- évaluer l'impact du rapport des pressions sur l'homogénéité des déformations [18] ;
- examiner l'anisotropie des sols et son influence sur leur comportement en torsion [19-22] ;
- caractériser la résistance à la traction des argiles [23].

C'est en 1983 que l'on peut situer le démarrage d'une nouvelle vague de travaux sur la rotation des contraintes avec les recherches de Saada au Case Institute of Technology [24-27] et de Symes à l'Imperial College de Londres [28]. Le développement d'un cylindre creux pour éprouvettes de 25,4 cm de diamètre dans le cadre de la thèse de Symes a ainsi constitué une étape essentielle dans la mise au point des appareillages. Ensuite, Hight *et al.* [18] ont effectué des essais monotones en chargement primaire et en chargement cyclique avec rotation d'axes principaux sur le sable de Ham-River, ainsi que des essais pour étudier les problèmes de liquéfaction causés par les séismes.

Plus récemment, Hicher a étudié l'influence de la rotation des contraintes et de la contrainte intermédiaire sur la résistance au cisaillement, en conditions non drainées, d'éprouvettes d'argile EPK normalement consolidées soumises à des sollicitations anisotropes (de type K_0) et à des essais monotones et cycliques [29, 30].

Au Japon, Ishihara *et al.* [31, 32] et Towhata et Ishihara [33, 34] ont effectué des essais cycliques sur le sable de Toyoura en conditions drainées et non drainées suivant différents chemins de contraintes. L'objectif était d'étudier la liquéfaction des sables sous chargement de type séisme. Au Royaume Uni, les travaux de l'Imperial College réalisés dans le cadre de différentes thèses, ont abouti au développement d'un appareillage plus petit adapté aux sols naturels et à la mesure des petites déformations [8, 35, 36]. En France, Karchafi [37] a effectué des essais drainés de torsion sur cylindre creux de sable d'Hostun pour examiner le rôle de l'anisotropie initiale dans le comportement des sables. D'autres études, liées à la problématique de liquéfaction des sables sous sollicitations rotationnelles, ont été effectuées [38].

LA PRESSE POUR ÉPROUVETTES CYLINDRIQUES CREUSES DU LCPC

Dans les années quatre-vingt, le LCPC s'est également intéressé à ce type d'essai prometteur. Sur la base d'une étude de faisabilité, la construction de la cellule triaxiale pour éprouvettes cylindriques creuses par le Centre d'Étude et de Construction de Prototypes (CECP) a démarré en 1984. Elle a été utilisée à partir de 1987 avec une presse Wyckham Farrance de 10 tonnes. La thèse de Khemissa [39] a permis de faire le point sur les techniques existant dans les autres centres de recherche et de valider l'appareillage par un programme d'essais sur l'argile de Guiche. Du fait de problèmes de pilotage de la presse utilisée, la construction d'une presse adaptée aux spécifications du cahier des charges a été entreprise. Les logiciels d'acquisition et de pilotage des essais (asservissement par micro-ordinateur) ont été élaborés conjointement à la fabrication des bancs d'étalonnage pour les capteurs spécifiques de l'appareil (capteur de déplacements radiaux, capteur de couple). La presse triaxiale pour éprouvettes cylindriques creuses (PTCC) avec sa cellule ont été livrées au LCPC en 1997. Depuis fin 1999, la presse est opérationnelle et, seules des difficultés liées aux logiciels sont apparues lors des essais effectués en 2000. En 2001, la possibilité d'appliquer une pression intérieure et extérieure a été ajoutée aux dispositifs existants.

■ Description de l'appareil

L'appareillage se compose, comme les cellules triaxiales classiques, d'une enceinte transparente en plexiglas contenant un fluide, dont le couvercle métallique est équipé d'un piston vertical de chargement. Le fluide mis sous pression par le générateur de pression permet d'appliquer la contrainte radiale $\sigma_r = p_e = p_i$. Le piston, par l'intermédiaire de la presse, engendre, d'une part la contrainte axiale $\sigma_a = F/S$, et, d'autre part, mis en rotation par un motoréducteur coiffant la cellule, la contrainte de cisaillement $\tau = f(M_t)$.

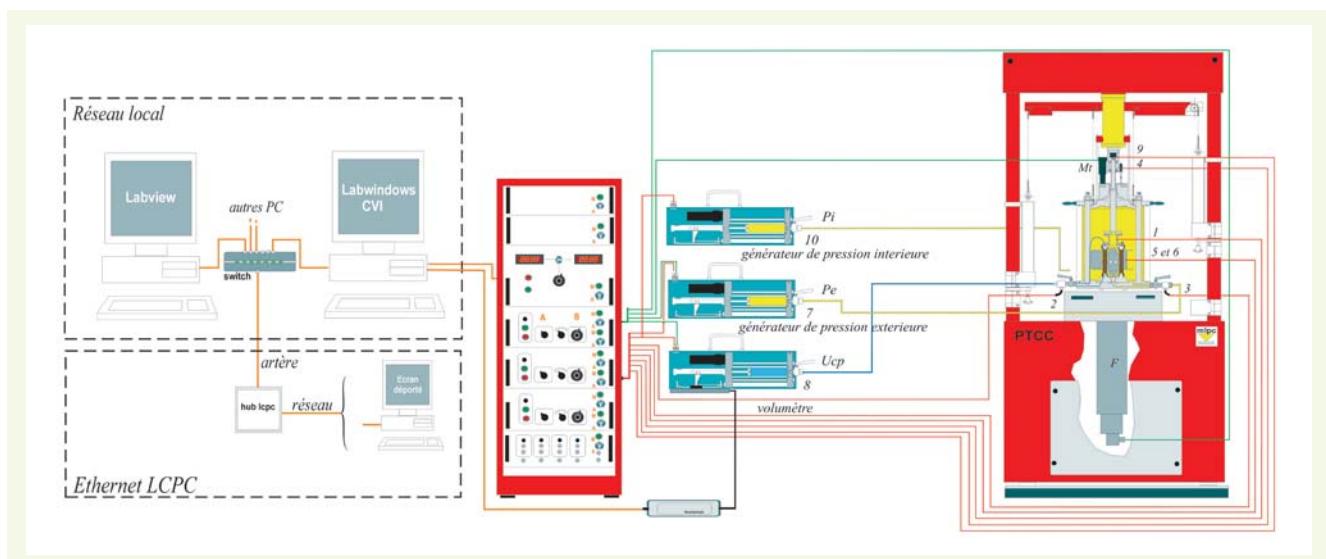
figure 6

Schéma fonctionnel de la presse triaxiale pour éprouvettes cylindriques creuses (PTCC) du LCPC.

- (1) capteur de force et de couple ; (2) capteur de pression interstitielle ;
- (3) capteur de pression cellulaire ; (4) capteur de déformation axiale ;
- (5) trois capteurs de déplacement radiaux externes ; (6) trois capteurs de déplacement radiaux internes ;
- (7) capteurs de déplacement du générateur de pression ; (8) capteurs de déplacement du volumètre ; (9) capteur de distorsion.

L'instrumentation se compose de deux capteurs de pression, neuf capteurs de déplacement, un capteur angulaire, un capteur de force et de couple. Une armoire limitant les perturbations d'origine électromagnétique contient les différents racks de conditionnement des quatorze capteurs et les racks de commande des générateurs de pression et de volume ainsi que de la presse. Le chargement vertical est obtenu par une presse dérivée de la presse MAER. L'asservissement des quatre axes (F , M_t et p_e , p_i) du dispositif est réalisé grâce au logiciel d'acquisition et de pilotage Labview, de National Instruments (asservissement digital).

Afin que ces opérations se déroulent en toute sécurité en cas de déficience du réseau global, un réseau local a été créé pour fonctionner indépendamment, voire être déconnecté du réseau global (**figure 6**). La plage d'utilisation de cet appareillage est : 0-1,5 MPa pour la pression intérieure, 0-100 kN pour l'effort vertical et 0- 36 m.daN pour le couple de torsion.



■ La cellule d'essai

La cellule a été dimensionnée en fonction de la géométrie retenue pour l'éprouvette. L'épaisseur de l'éprouvette (1,5 cm), relativement faible par rapport à la hauteur, a été choisie pour avoir une répartition uniforme de la contrainte radiale. Les dimensions de l'éprouvette résultent également d'un compromis entre des exigences contradictoires :

- avoir des valeurs assez élevées pour le rapport des diamètres interne et externe D_i/D_e et pour la hauteur H afin d'obtenir un champ de contraintes relativement uniforme et diminuer l'influence du frettement ;
- choisir des dimensions permettant le découpage dans un bloc d'argile intact sans difficulté majeure ;
- permettre le prélèvement sur site (selon les dimensions du carottier de l'université Laval ; cf. plus loin).

La **figure 7** montre le schéma de principe ainsi qu'une vue de la cellule d'essai. Les numéros dans le texte renvoient à cette figure. La cellule est constituée par une enceinte transparente en polya-

crylique comportant une embase inférieure (1), un cylindre (3) et un couvercle (4). L'éprouvette de sol est placée entre l'embase inférieure et une embase supérieure (2). Le couvercle de la cellule est équipé du système d'application de l'effort de torsion (19, 20).

Le capteur (13) de mesure de la force axiale et du couple est positionné à l'intérieur de la cellule à l'extrême du piston. La liaison du piston avec l'embase supérieure est telle que les contraintes de cisaillement et les déformations axiales restent uniformes sur une section droite de l'éprouvette.

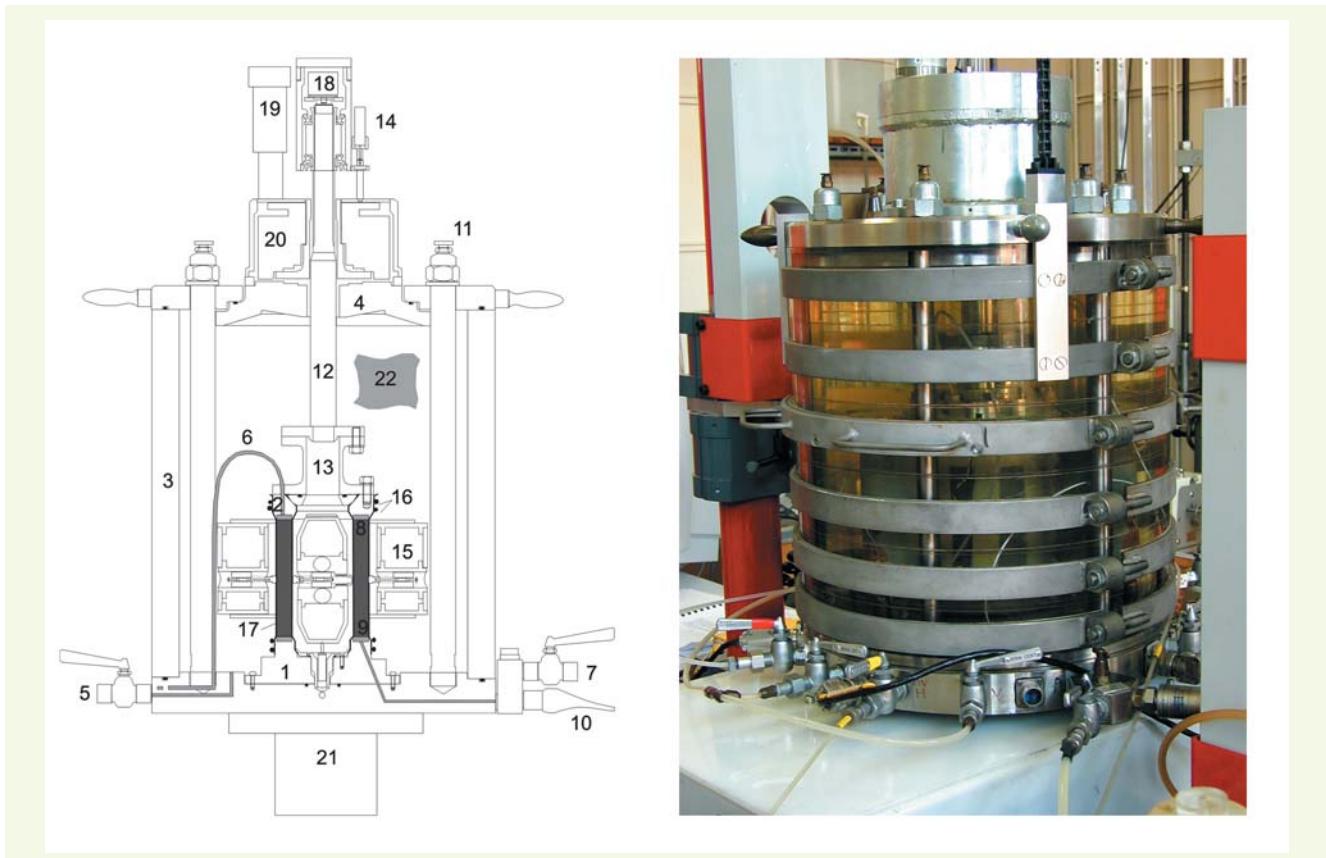


figure 7

Schéma de la cellule d'essai du LCPC.
 (1) embase inférieure ;
 (2) embase supérieure ;
 (3) enceinte cylindrique ;
 (4) chapeau ; (5) circuit de pression de fluide cellulaire ; (6) et (7) mesure du volume drainé et/ou de la contre-pression ; (8) anneau poreux supérieur ; (9) anneau poreux inférieur ; (10) capteur de pression interstitielle ; (11) purge ; (12) piston ; (13) capteur d'effort vertical et de couple ; (14) capteur de déplacement vertical ; (15) capteur de déplacement radial ; (16) joints toriques ; (17) membrane ; (18) capteur angulaire ; (19) moteur ; (20) moteur-réducteur ; (21) plateau de la presse ; (22) liquide cellulaire.

L'enceinte (3) est dimensionnée pour une pression maximale de 1,5 MPa. Elle est renforcée par des cerclages métalliques pour en diminuer la déformabilité (**figure 7b**). Le diamètre de l'enceinte a été défini pour un montage aisément de l'éprouvette et des systèmes annexes comme les dispositifs de mesure du diamètre.

■ Le bâti de chargement

Globalement, on peut classer les architectures adoptées pour les cylindres creux en quatre types (**figure 8**). Si on examine le **tableau 2**, on s'aperçoit qu'il n'y a pas d'architecture prépondérante. Le type 1, plus classique et dérivé de l'architecture triaxiale traditionnelle, a été utilisé par Saada [16], Lade [17] et le LCPC. Il est constitué, comme les presses triaxiales classiques, d'une presse à colonnes et d'une cellule, ou enceinte, transparente contenant un fluide et munie d'un piston traversant le couvercle supérieur. La rotation ou le couple est transmis par ce même piston en partie supérieure (**figure 8**, cas 1). Le type 2 existe uniquement en France et a été développé à l'ENTPE [38, 40]. Le type 3, développé en Angleterre par Hight [18], a été importé au Japon par un ancien étudiant de l'Imperial College.

Une conception plus moderne fondée sur le concept des cellules de Bishop et Wesley est privilégiée à l'heure actuelle et a été mise en œuvre par la société GDS et l'University College de Dublin (type 4 sur la **figure 8**) [42]. Cette disposition est plus souple à utiliser et facile à mettre en œuvre.

Malgré sa structure plus légère, cet appareillage n'est pas plus flexible (au sens mécanique). En effet, toute la rigidité réside dans la cellule, qui reprend le couple par l'enceinte et la force verticale par une mise en traction des colonnes.

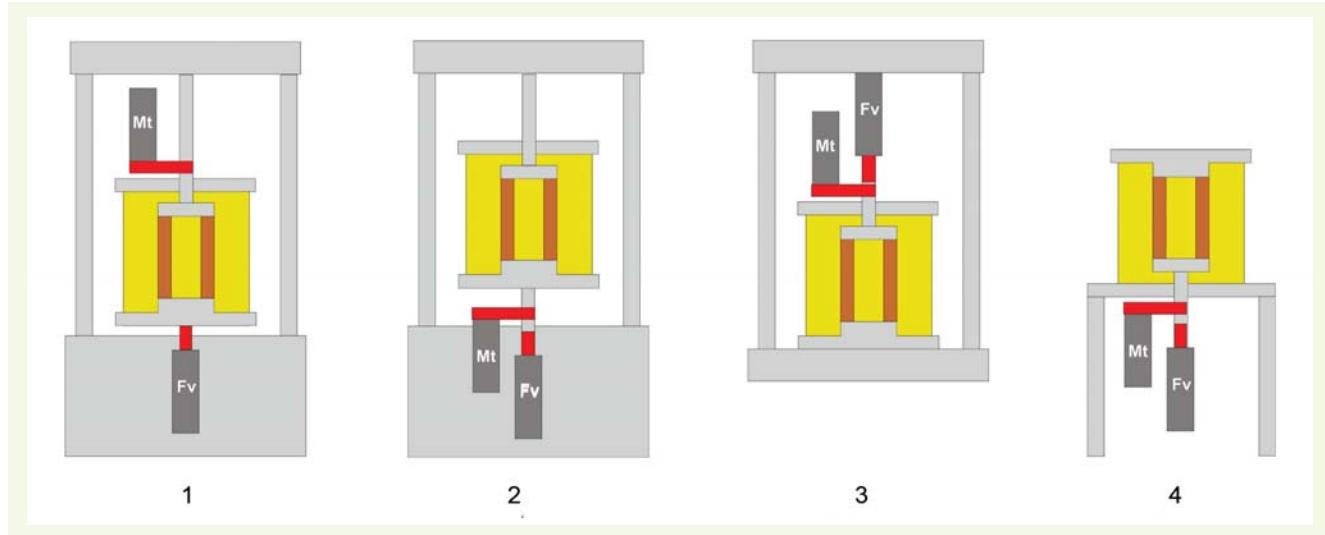


figure 8

Types de presses triaxiales pour éprouvettes cylindriques creuses.

tableau 2
Tableau synoptique
des différents types
d'appareillage.

Organisme	Type	Auteur	Année	Taille éprouvette (mm)		
				H	D _e	D _i
CEBTP, Paris	1	Habib [13]	1952	87	35	-
Royal College of Science and Technology, Glasgow	Aucun M _t	Kirpatrick [15]	1957	152,4	101,6	63,5
Cornell University, Ithaca	1, inversé	Broms et Casabrian [7]	1965	254	127	76,2
Université de Ljubljana	Aucun M _t	Sulkje et Drnovsek [23]	1965	80	64	40
Université de Cleveland	1	Saada et Baah [16]	1967	127 ; 177	71	51
GNI, Moscou	3	Lomize [5]	1969	180	310	250
Université de Los Angeles	4	Lade [17]	1981	100 ; 400	220	180
Impérial Collège, Londres	3	Symes [28]	1983	254	254	203
Impérial Collège, Londres	3	Nishimura <i>et al.</i> [43]	2005	195	100	71
EUDIL, Lille	2	Chehade <i>et al.</i> [39]	1985	180	180	150
ENTPE, Lyon	2	Robinet <i>et al.</i> [40]	1983	180	180	150
ENTPE, Lyon	2	Duttine [41]	1996	120	200	160
Université de Tokyo	3	Towhata, Ishihara [33-34]	1985	104	100	60
GDS, R.U.	4	GDS	1994		100	60
LCPC, Paris	1	Khemissa [38]	1992	150	100	70
University College de Dublin	4	Kelly et Naughton [42]	2002	200	100	70

Asservissement des essais

L'asservissement des trois axes (F , M_t et p_e , p_i) de l'appareil permet d'imposer des chemins de sollicitation originaux, en contraintes ou en déformations, ayant pour but l'analyse de l'influence de la rotation des axes principaux (cf. [figure 3](#)). La possibilité d'appliquer une pression intérieure différente de la pression extérieure a permis de dissocier l'angle de rotation des contraintes du coefficient de contrainte principale b .

■ Acquisition des données

L'effort axial F et le couple M , sont mesurés au moyen d'un capteur à jauge de contrainte de marque FGP ayant une forme de bobine creuse (13), placé comme indiqué sur la [figure 7](#). Le peson est placé à l'intérieur de la cellule, juste au-dessus de l'éprouvette, afin que les frottements n'affectent pas la mesure de la force.

La pression de cellule p_c et la pression interstitielle u sont mesurées par des capteurs à membrane classiques. Le déplacement axial Δh est mesuré grâce à un codeur incrémental lié au moteur de la presse. Un capteur de position angulaire $\Delta\theta$ (18) est placé en bout de l'arbre cannelé. Il s'agit d'un codeur incrémental. Les déformations radiales des faces extérieure et intérieure de l'éprouvette ΔR_{ei} et ΔR_{ii} sont mesurées par six capteurs (15) LVDT immergés de 5 mm de course. Deux dispositifs de mesure, chacun comptant trois capteurs disposés à 120 degrés, flottent entre deux eaux et suivent les déplacements verticaux et radiaux des points de mesures ([figure 9](#)). La flottabilité des systèmes est obtenue par l'utilisation de flotteurs en PVC, développant la poussée d'Archimète nécessaire, dans lesquels sont collés les capteurs. Des ressorts de rappel assurent un contact permanent des touches avec la surface de l'éprouvette. La mesure des déplacements radiaux des faces extérieure et intérieure de l'éprouvette, en complément de la déformation axiale de celle-ci et de la rotation de ses génératrices, permet de déterminer les valeurs moyennes des composantes du tenseur des déformations.

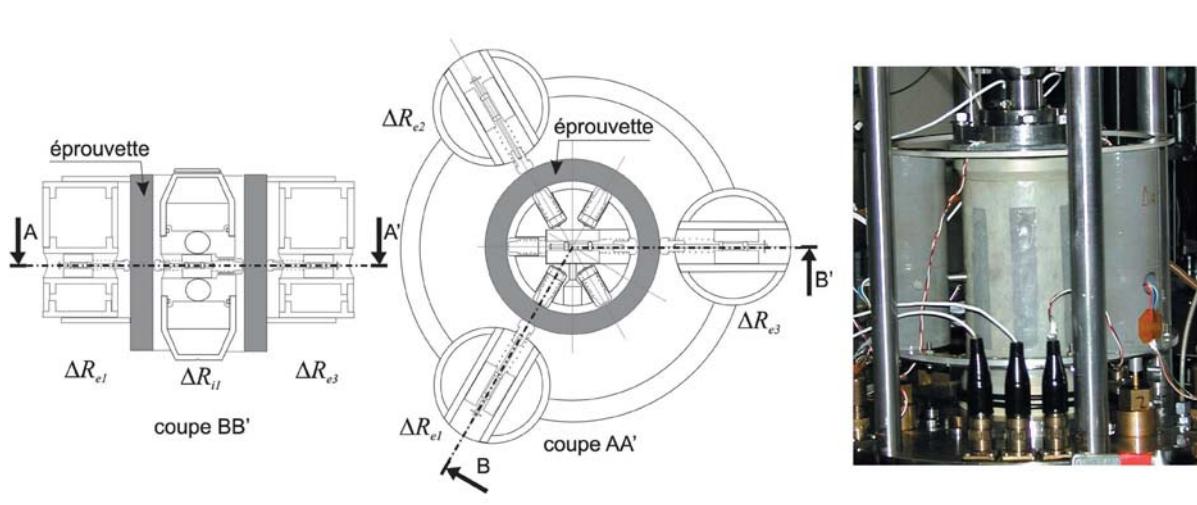
À titre de comparaison, depuis le développement des premiers cylindres creux modernes dans les années quatre-vingt, les capteurs de déplacement utilisés sont de deux types : des capteurs de proximité sans contact et des capteurs électrolytiques utilisés par exemple à l'Imperial College et à l'University College de Dublin. Les premiers donnent le déplacement radial de l'éprouvette, tandis que les seconds fournissent les déplacements verticaux et de cisaillement.

Un étalonnage est nécessaire avant l'utilisation de l'appareillage. Celui-ci est réalisé par une mise en série avec un capteur étalon. Un banc d'étalonnage pour capteurs de couple a été spécifiquement développé, utilisable également pour le scissomètre de chaussée sous le nom de SCISOL.

L'ensemble des capteurs extérieurs sont collés dans trois flotteurs cylindriques en PVC disposés sur un anneau. Du fait que ceux-ci ne doivent pas être démontés, l'étalonnage est réalisé par deux alèsomètres (85-100 et 100-120 mm) adaptés au diamètre extérieur de l'éprouvette. La vérification périodique est effectuée à l'aide de cales cylindriques de différents diamètres (90, 100 et 110 mm).

figure 9

Disposition des capteurs intérieurs et extérieurs (PTCC du LCPC).



PROCÉDURES D'ESSAI

■ Confection des éprouvettes

Des échantillons sont prélevés sur site au moyen d'un carottier de 200 mm de diamètre et 600 mm de hauteur développé à l'université Laval au Québec [44]. Le carottier est constitué de deux tubes : un tube intérieur terminé à sa partie inférieure par une trousse coupante effilée sans dégagement interne, qui constitue l'outil de prélèvement, et un tube extérieur équipé à sa partie inférieure d'une couronne dentée, qui peut être rendue solidaire du tube intérieur lors de la descente du carottier au niveau du prélèvement et lors de la remontée de l'échantillon vers la surface. Les règles de prélèvement sont appliquées afin d'obtenir des échantillons de classe 1 selon la norme NF P 94-202. Les dimensions du carottier respectent les règles définies dans ce document consacré aux prélèvements, en particulier pour l'indice de surface, l'indice de jeu intérieur, l'indice de jeu extérieur et l'angle du biseau de la trousse coupante.

Les échantillons sont amenés au laboratoire sous la forme de grosses galettes de sol, dans lesquelles seront taillées des éprouvettes. La taille doit se faire sans modification de la teneur en eau du sol, donc dans une atmosphère humide (humidité relative supérieure à 50 %) et à une température constante. Une éprouvette, ayant une longueur de 1 à 2 cm de plus que la hauteur choisie, est taillée dans l'échantillon extrait de son conteneur. Les faces planes du cylindre, à ce stade, ne sont qu'approximativement parallèles.

La technique conseillée pour tailler l'éprouvette à sa géométrie définitive, avec des perturbations minimales, consiste à utiliser un touret à axe vertical ([figures 10a](#) et [10b](#)). L'ébauche de l'éprouvette est placée entre deux plateaux tournants et parallèles. Deux tiges guides excentrées par rapport à l'axe du touret servent d'appui pour une taille régulière, effectuée en faisant tourner peu à peu l'éprouvette et enlevant des copeaux d'autant plus petits que l'on se rapproche du diamètre final (l'excentricité des guides est telle qu'il y a un côté ébauche et un côté finition).

Pour les sols mous, la taille est effectuée avec un fil tendu, comme le montrent les [figures 10a](#) et [10b](#). Pour les sols raides, on utilisera un couteau de grande dimension et peu flexible ou un tour vertical motorisé avec un outil adapté à déplacement contrôlé.

Pour les argiles contenant des graviers ou des concrétiions indurées, on évite, en fin de taille, d'arracher ces éléments et on accepte une surface externe du cylindre avec des irrégularités. On veille toutefois à ce que ces irrégularités ne risquent pas d'endommager la membrane. Si l'arrachage accidentel d'un élément produit un trou, celui-ci est rebouché délicatement avec du matériau fin issu de la taille. Lorsque la taille latérale est terminée, on mesure le diamètre moyen D_e de l'éprouvette ([figure 10c](#)).

figure 10

Découpe extérieure d'une éprouvette provenant d'un prélèvement intact.

a | b | c



L'éprouvette est ensuite placée dans un moule en dural composé de deux demi-coquilles qui est lui-même placé sur un bâti de maintien (**figures 11 et 12**). L'intérieur de chacune des demi-coquilles est tapissé d'une feuille d'aluminium afin d'éviter tout collage. Plusieurs perçages successifs sont réalisés manuellement à l'aide de forets de diamètre intérieur de côte 70 mm (**figures 12a, b, c**). Au cours de cette opération, les plaques d'extrémité servant de guide pour les forets sont des trous de diamètre successifs 20, 40, 60 et 70 mm. Lorsque la taille est terminée, on mesure le diamètre intérieur moyen D_i de l'éprouvette (**figure 13**).

L'éprouvette est ensuite placée soit dans un calibre constitué d'un tube mince fendu selon une génératrice, soit dans un berceau en V dont la partie inférieure correspond à un tiers de cercle de rayon égal à celui de l'éprouvette. La hauteur du tube fendu et la longueur du berceau sont égales à la hauteur théorique de l'éprouvette. Les faces supérieure et inférieure sont arasées en prenant appui sur le calibre. La hauteur moyenne H_o de l'éprouvette est mesurée.

Finalement, l'éprouvette obtenue est un cylindre de sol creux de hauteur $H = 15$ cm, de diamètre intérieur $D_i = 7$ cm et extérieur $D_e = 10$ cm. La mesure des diamètres intérieur et extérieur est faite suivant 6 axes (2 axes perpendiculaires dans chacun des 3 plans horizontaux situés au 1/4, à la moitié, et aux 3/4 de la hauteur de l'éprouvette). La hauteur des éprouvettes est mesurée au pied à coulisse selon deux directions perpendiculaires. Le nombre de mesure est augmenté en cas d'irrégularités. Les génératrices doivent être perpendiculaires aux faces planes. Le diamètre de l'éprouvette

figure 11
Outils de découpe.



figure 12
Principe du creusement :
a) mise en œuvre ;
b) perçage manuel ;
c) zoom de la photo
précédente.

a | b | c



doit correspondre au diamètre de l'embase inférieure à $\pm 0,2$ mm. De petites irrégularités locales sur le diamètre sont sans inconvénient.

L'éprouvette est immédiatement pesée avec une balance donnant le décigramme. Trois éprouvettes, au minimum, sont ainsi préparées. Si le montage n'est pas immédiat, elles sont protégées par du papier aluminium (ou un film alimentaire étirable) et placées dans une enceinte à 90 % d'humidité.

figure 13
Éprouvette de sol naturel
après creusement.



■ Conditionnement initial des éprouvettes

Les embases inférieure et supérieure reçoivent les pierres poreuses et un ensemble de douze couteaux d'une hauteur de 4 mm qui viennent prendre place radialement sur le périmètre. Les sols sur-consolidés, les sols gonflants et les sols non saturés sont placés sur des disques poreux secs. Les sols normalement consolidés sont montés entre des disques poreux saturés en eau désaérée, les circuits de drainage étant eux-mêmes saturés. Un papier filtre est, au préalable, interposé entre l'éprouvette et les disques poreux.

Pour faciliter l'homogénéisation des pressions interstitielles dans l'éprouvette pendant l'essai, un drain latéral en papier filtre, préalablement saturé avec de l'eau désaérée, est placé autour de l'éprouvette (**figure 14**). Afin que ce drain n'introduise pas d'efforts parasites, il est constitué d'une bande de même superficie que le cylindre, ajourée chaque demi-centimètre dans le sens des génératrices.

Le montage de l'éprouvette se déroule ensuite selon la procédure suivante (**figure 15**) :

- ① fixation de la membrane intérieure à l'embase inférieure ;
- ② mise en place de l'éprouvette toujours contenue dans son moule en Dural ;
- ③ remplissage de la membrane intérieure à mi-hauteur avec de l'huile de silicone de façon à amener cette membrane au contact de la surface intérieure de l'éprouvette et mise en place des capteurs de déplacement radiaux intérieurs ;

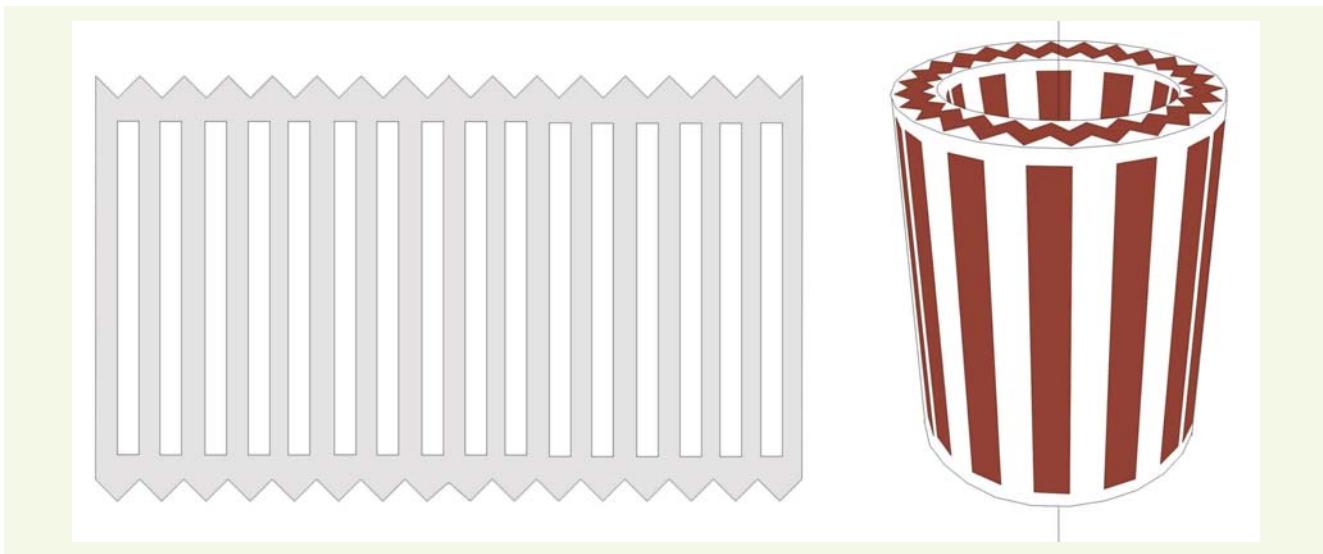


figure 14

Mise en place du drain latéral ajouré sur l'éprouvette.

- ④ mise en place du chapeau avec la pierre poreuse et les couteaux ;
- ⑤ fixation de la membrane intérieure ;
- ⑥ démoulage de l'éprouvette et enlèvement de la feuille d'aluminium ;
- ⑦ montage de la membrane extérieure.

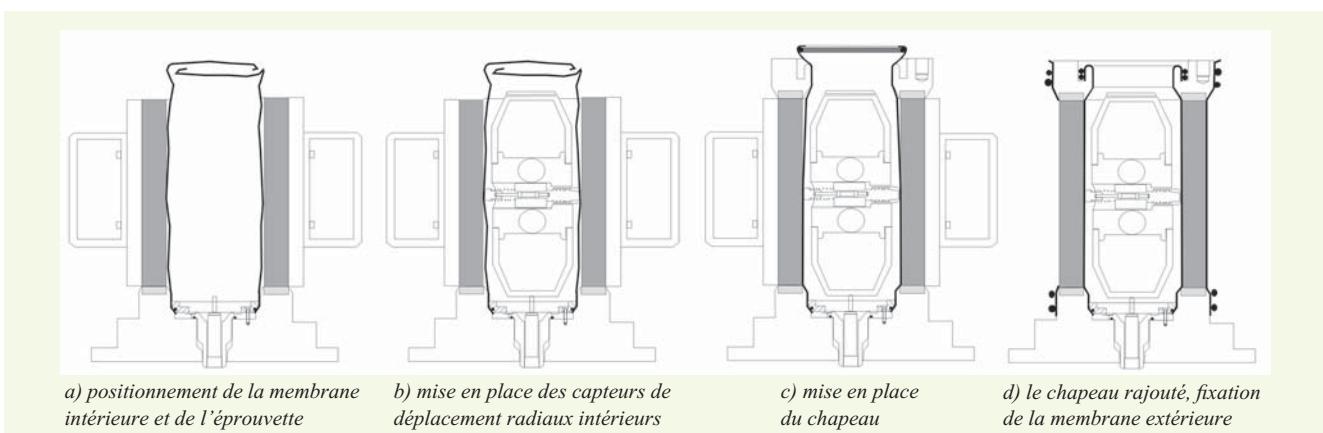
Une fois la cellule fermée, il reste encore un certain nombre d'opérations à effectuer avant de passer à la phase pilotée. Il s'agit du remplissage de la cellule par pompage et de la rétraction des vérins supportant les ensembles de capteurs de déplacements radiaux intérieurs et extérieurs. En cas de présence de bulles d'air, on procède à une purge. Les douze capteurs sont connectés à l'armoire de contrôle comme illustré sur la **figure 6**.

On passe ensuite sur l'ordinateur de pilotage en écran « mise en place » et le logiciel, développé au LCPC, pilote la phase « mesure du gonflement ».

figure 15

Procédure pour le montage de l'éprouvette.

a | b | c | d



a) positionnement de la membrane intérieure et de l'éprouvette

b) mise en place des capteurs de déplacement radiaux intérieurs

c) mise en place du chapeau

d) le chapeau rajouté, fixation de la membrane extérieure

■ Mesure du gonflement

Le montage de l'éprouvette se fait avec des disques poreux secs. En maintenant les circuits de drainage secs et ouverts, on applique une pression de cellule égale aux deux tiers de la contrainte verticale effective en place σ'_{vo} , afin d'éviter les risques de gonflement pendant la saturation.

Les disques poreux du haut et du bas sont rapidement saturés par la circulation d'eau dans les doubles circuits de drainage, où un vide préalable a été réalisé, par exemple par une trompe à eau. Ces circuits sont ensuite reliés entre eux et branchés sur le système de mesure du volume drainé ; le contrôleur de pression volume du CECP permet de détecter et de quantifier les mouvements de l'eau.

Si la tendance est à l'absorption d'eau, la pression cellulaire est augmentée jusqu'à stabilisation ; si la tendance est à l'expulsion d'eau, la pression est réduite. Après stabilisation, l'éprouvette de sol est à son volume initial et à la contrainte hydrostatique de gonflement ui. Ensuite, une contre-pression est appliquée.

■ Application d'une contre-pression

La saturation est effectuée par application d'une contre-pression. La contre-pression est augmentée progressivement par paliers : 50, 100, 200, 400 et 800 kPa (éventuellement). Le passage au palier suivant est effectué dès lors que la vitesse d'absorption de l'eau est inférieure à 0,1 cm³/h. La pression de cellule est ajustée au fur et à mesure, de façon à maintenir la même contrainte de consolidation. Les quantités d'eau absorbées ou expulsées sont enregistrées. La dernière pression est maintenue jusqu'à stabilisation des variations de volumes drainés.

■ Vérification de la saturation et mesure du coefficient B

Après avoir fermé le drainage, on applique une variation de pression cellulaire Δp_{cell} de 50 kPa et on mesure la variation de pression interstitielle Δu en fonction du temps. On en déduit le coefficient : $B = \Delta u / \Delta p_{cell}$. Si le temps de réponse pour obtenir une valeur stable est supérieur à 10 minutes pour les sols mous et les sables et à 1 heure pour les sols raides, et si la valeur stabilisée traduit un degré de saturation inférieur à $S_r = 0,99$, on augmente la contre-pression par paliers de 50 kPa jusqu'à l'obtention d'une valeur satisfaisante du coefficient B.

■ Consolidation

La consolidation consiste à appliquer une pression de cellule constante et éventuellement une charge axiale ou un couple donné, également constant. Pendant cette phase de consolidation, la contre-pression définie précédemment est maintenue à la même valeur. Le changement de volume en fonction du temps est déterminé à partir des mesures du volume d'eau expulsée de l'éprouvette.

Le graphique de la variation de volume pendant la phase de consolidation en fonction de la racine carrée du temps est tracé à l'écran. La consolidation est terminée lorsque la variation de volume devient inférieure au critère fixé par l'opérateur, ou se traduit par une série de points s'alignant selon une direction asymptotique peu inclinée. Le programme en déduit le temps nécessaire pour atteindre la fin de la consolidation et calcule la vitesse théorique à retenir pour l'essai.

La consolidation « K_0 » est un type spécifique de consolidation dans lequel la pression de cellule est asservie à l'augmentation de la contrainte verticale en fonction de la variation de la section calculée à partir des informations des trois capteurs de diamètre intérieurs et des trois capteurs de diamètre extérieurs. Lorsque la contrainte axiale a atteint la contrainte en place estimée, le calcul du rapport de la contrainte horizontale effective sur la contrainte verticale effective permet d'estimer le coefficient de poussée des terres K_0 en place du sol naturel.

La [figure 16](#) présente la phase de consolidation « K_0 » réalisée pour l'argile de Guiche.

L'analyse de la variation du rapport K_0 pour tous les essais triaxiaux sur éprouvettes cylindriques creuses de sols naturels non remaniés montre que la procédure de taille et la forme géométrique de l'éprouvette tendent à faire disparaître l'état initial de contraintes et que ce phénomène est indépendant des dimensions des particules ou du pourcentage d'argile.

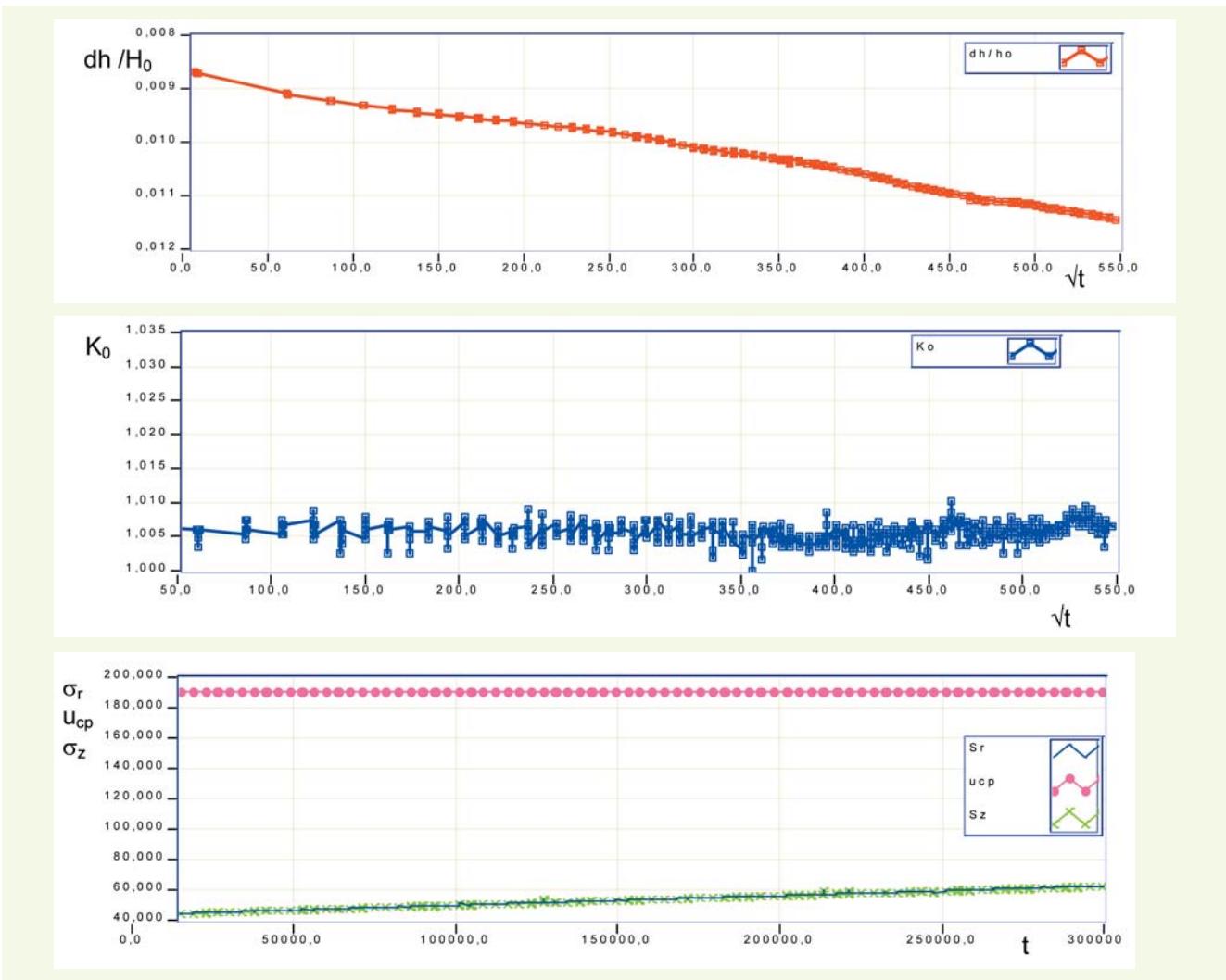


figure 16

Consolidation « K_0 » de l'argile de Guiche (PTCC du LCPC).
 a) Déformation verticale Dh/h_0 en fonction de la racine du temps.
 b) Coefficient K_0 en fonction de la racine du temps.
 c) Contraintes en fonction du temps.

a
b
c

■ Application d'un chemin de contraintes

Sur la [figure 17](#), tirée de Saada et Townsend [12], sont représentées les relations entre les paramètres b et α qui existent dans les différents appareils décrits précédemment. Dans le cas où p_i et p_e sont égales, les paramètres b et α sont liés par la relation simple :

$$b = \sin^2 \alpha \quad (3)$$

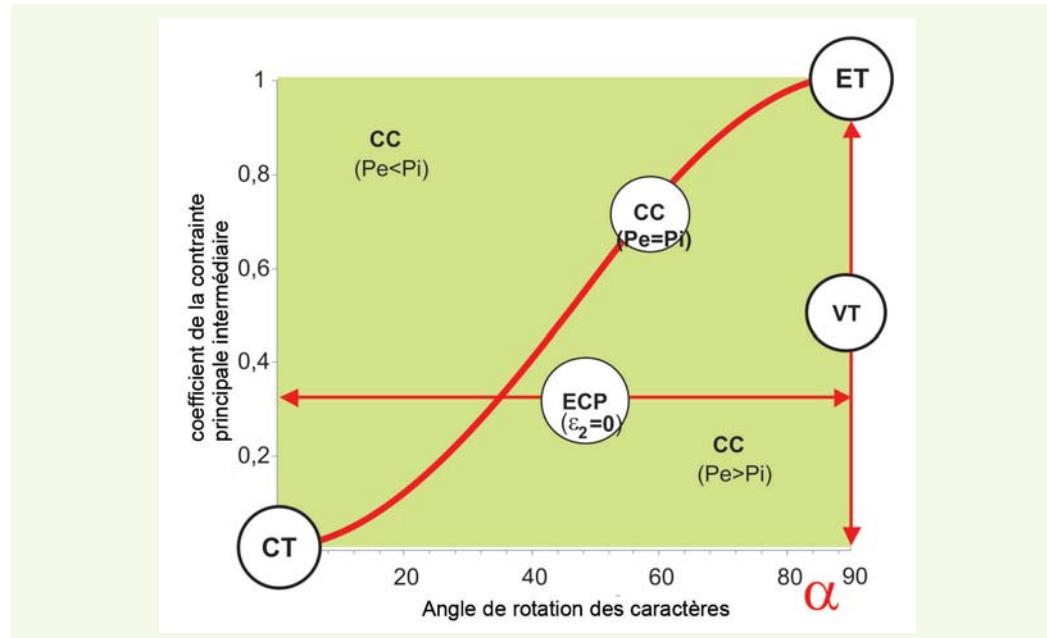
Cette relation limite la zone qui peut être explorée par ces appareils. Celle-ci est figurée par la courbe sinusoïdale entre l'essai de compression triaxiale CT et d'extension triaxiale ET ([figure 17](#)).

L'amélioration des techniques a permis d'imposer des chemins de contraintes de plus en plus complexes. Les premières machines imposaient un déplacement vertical et une pression de cellule constante. De véritables chemins de contraintes, comportant ou non des petits cycles, ont pu être appliqués grâce à un pilotage réalisé à partir des informations provenant de mesures locales des déplacements.

La [figure 18](#) résume les chemins types imposés dans l'espace constitué par le plan de Cambridge complété par l'axe de la rotation des contraintes. Le premier graphique correspond à un chemin où le déviateur est augmenté à partir d'une valeur de la pression moyenne par une vitesse de déformation fixe. Pour les premiers essais, la torsion était appliquée jusqu'à la rupture ; il a été ensuite possible, avant d'atteindre la rupture en torsion, de continuer à accroître le déviateur pour une torsion maintenue.

figure 17

Relations entre les paramètres b et a pour différents appareillages
 (ECP = essai de cisaillement plan, CC = cylindre creux, CT = compression triaxiale, ET = extension triaxiale, TV = triaxial vrai).



Les études menées à l'Imperial College ont concerné des chemins plus proches de la réalité dans lesquels l'augmentation du déviateur est liée à l'augmentation de la pression moyenne par le coefficient de poussée des terres au repos (K_0) [45]. Ce type d'essai a pour objectif de s'approcher du phénomène de consolidation que l'on constate *in situ* (figure 18b).

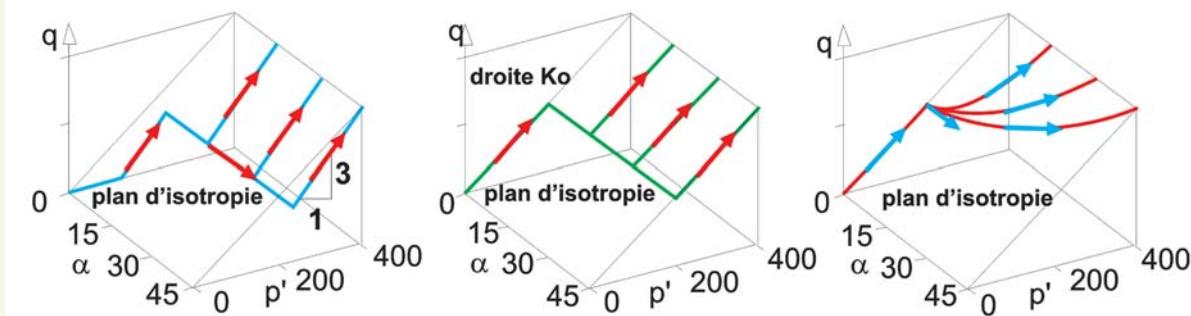
Dans la nature, par exemple lors de l'érosion d'une pente ou lors de la construction d'un ouvrage, la rotation des contraintes est concomitante avec l'augmentation du déviateur. C'est pourquoi le troisième type de chemin semble davantage justifié (figure 18c). Cependant, le manque de données *in situ* sur cette simultanéité ne permet pas de définir exactement ce chemin type.

Les chemins de type cyclique tentant de simuler les séismes ou l'effet de la houle consistent à effectuer des allers-retours sur ce dernier chemin.

figure 18

Chemins de contraintes typiques.

a | b | c



Le LCPC a développé un programme qui dialogue, via le réseau Ethernet, avec le programme d'asservissement local du CECP d'Angers (figure 19). Il impose le suivi du chemin de contraintes en calculant l'écart au chemin à partir des mesures obtenues des capteurs, des états des commandes ainsi que des états des fins de course, puis en envoyant les consignes nécessaires au ratrappage.

Le programme conçu par le CECP d'Angers comporte six modes : écran d'accueil, mode manuel, mise en place de l'éprouvette, consolidation, essai, fin d'essai. Pour sa part, le programme du LCPC est constitué de deux sous-ensembles (figure 20). Le premier sous-ensemble demande à l'utilisateur de lui fournir

les paramètres géométriques, certains paramètres physiques du sol constituant l'éprouvette ainsi que le chemin de contraintes. Le second sous-ensemble constitue le module central et gère les grandes fonctions du programme. Les phases d'essais sont organisées de manière séquentielle. Il s'agit de la mesure du gonflement, de la mise en contre-pression, de la consolidation, du cisaillement.

figure 19
Architecture de
l'asservissement
(PTCC du LCPC).

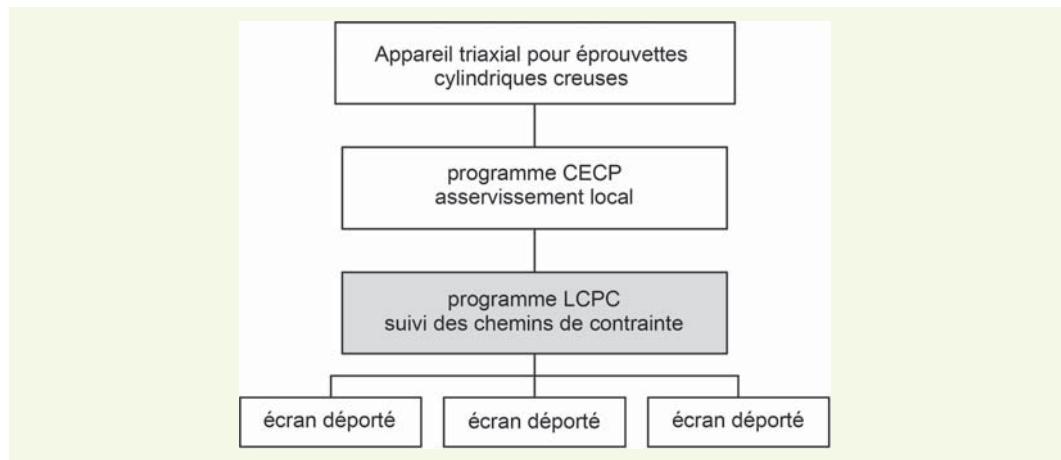
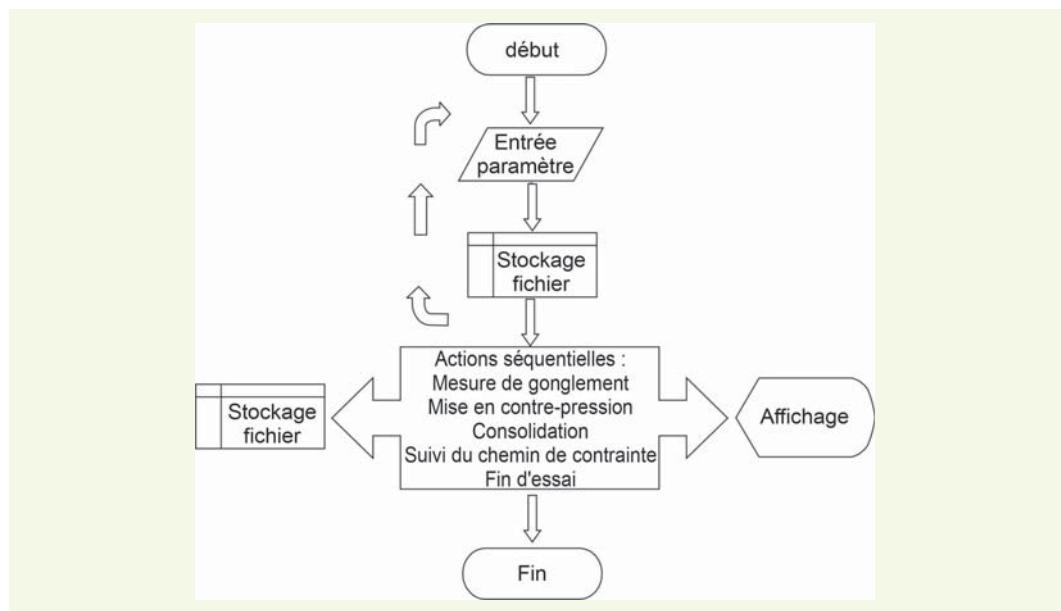


figure 20
Organigramme général du
logiciel du LCPC (PTCC).



La **figure 21** présente un exemple d'essai de torsion sur un cylindre creux d'argile de Guiche. On observe sur ces figures que la phase de cisaillement de l'essai se déroule de manière satisfaisante (plastification progressive du sol lors de l'augmentation du déviateur, **figures 21a** et **21b** ; plastification lors de la torsion, **figure 21c**). Il y a cependant quelques variations du couple de torsion qui provoquent l'éloignement du chemin réel suivi, en rouge, par rapport au chemin imposé, en vert (**figure 22**).

Achèvement de l'essai

Les procédures et observations à faire en fin d'essai sont les mêmes pour tous les types d'essais :

- ① arrêter la presse ou les vérins de chargement sans opérer de déchargement axial ;
- ② fermer les circuits de drainage pour limiter l'absorption d'eau lors du démontage ;
- ③ vider la cellule et retirer rapidement l'éprouvette des embases. Piser l'éprouvette au décigramme près ;
- ④ noter le type de rupture (homogène, plan de cisaillement, inclinaison du ou des plans de cisaillement par rapport à la verticale, autres observations) (**figure 23**).



figure 21

Cisaillement de l'argile de Guiche (PTCC du LCPC).

a | b | c

figure 22

Cisaillement de l'argile de Guiche dans l'espace p , q , a (PTCC du LCPC).

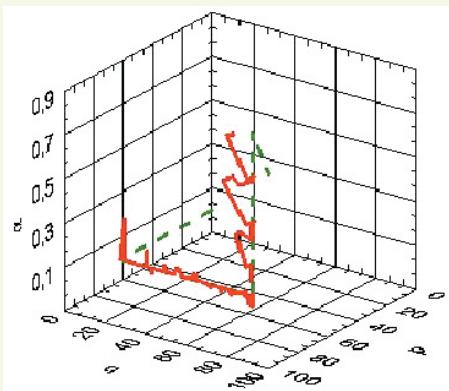


figure 23

Exemples de modes de rupture obtenus pour l'argile de Guiche :
a) extension ;
b) extension et cisaillement ;
c) cisaillement ;
d) cisaillement et compression ;
e) compression
(PTCC du LCPC).



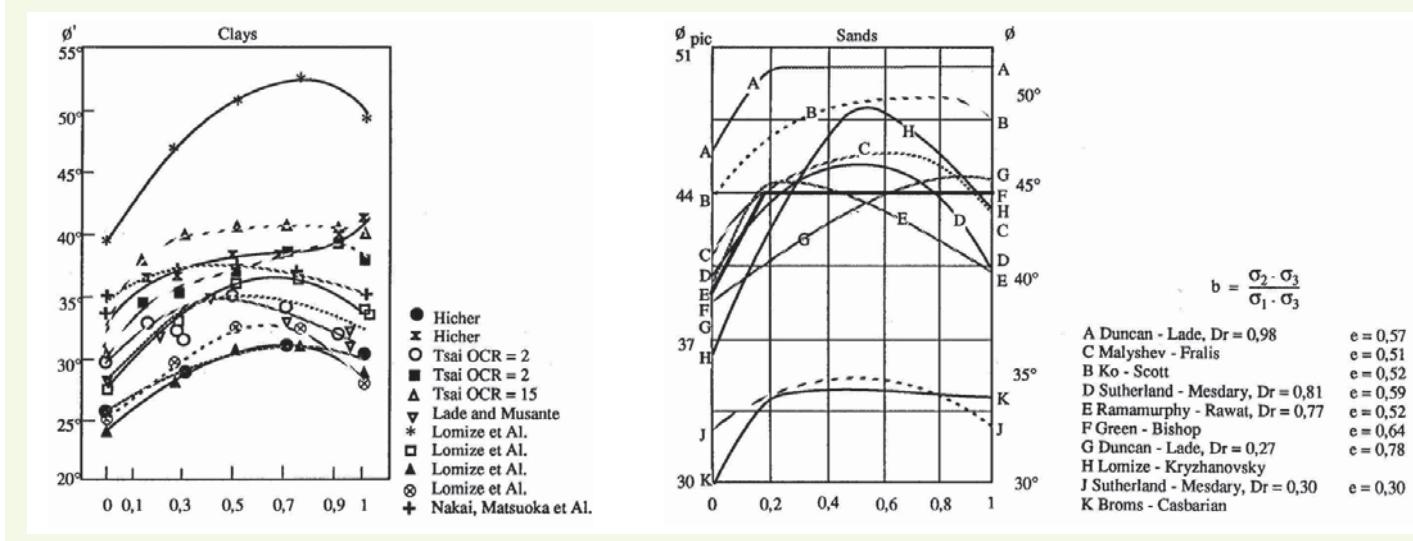
a | b | c | d | e

EXEMPLES DE RÉSULTATS

Un essai de type triaxial pour cylindre creux permet d'obtenir une valeur de l'angle de frottement pour toute combinaison de contraintes principales. Pour les différents types de sols, les résultats sont présentées sur la **figure 24a** pour les argiles et **24b** pour les sables. Les essais ont été effectués avec des chemins de chargement différents, détaillés dans les références [7, 21, 46]. Il est toutefois vraisemblable que ces résultats dépendent des conditions aux limites des essais.

Pour sa part, l'appareillage du LCPC a actuellement permis d'étudier les sols naturels et non remaniés de trois sites :

- le site de la trémie Pasteur de Rouen dans des argiles sableuses ;
- le site expérimental de Geodelft à proximité d'Almere aux Pays-Bas dans des vases ;
- le site expérimental du LCPC à Guiche avec une argile organique.



a | b

Ces sols ont fait l'objet d'un programme expérimental comprenant des essais œdométriques, des essais triaxiaux classiques et des essais sur éprouvettes cylindriques creuses. Les essais sur des cylindres creux d'argile de Guiche ont servi, prioritairement, à valider les procédures d'essai et les programmes de pilotage ainsi que la capacité de l'appareillage à suivre des chemins de contraintes diversifiés. Les essais ont été effectués en conditions drainées et à des pressions intérieure et extérieure à l'éprouvette égales, ce qui limite l'éventail des chemins explorés. On ne peut donc pas en tirer de conclusions certaines sur l'effet de la rotation des contraintes sur l'angle de frottement interne de l'argile de Guiche.

Pour l'argile sableuse de Rouen, l'angle de frottement interne diminue avec la rotation des contraintes jusqu'à un angle de rotation de 70 degrés, à partir duquel l'angle de frottement augmente légèrement. Les valeurs obtenues ne sont pas tout à fait en concordance avec les courbes recensées dans la littérature internationale. Cette différence provient du fait que les essais triaxiaux sur éprouvettes cylindriques creuses ont été effectués sur du sol prélevé à une profondeur différente de celle considérée dans les essais triaxiaux.

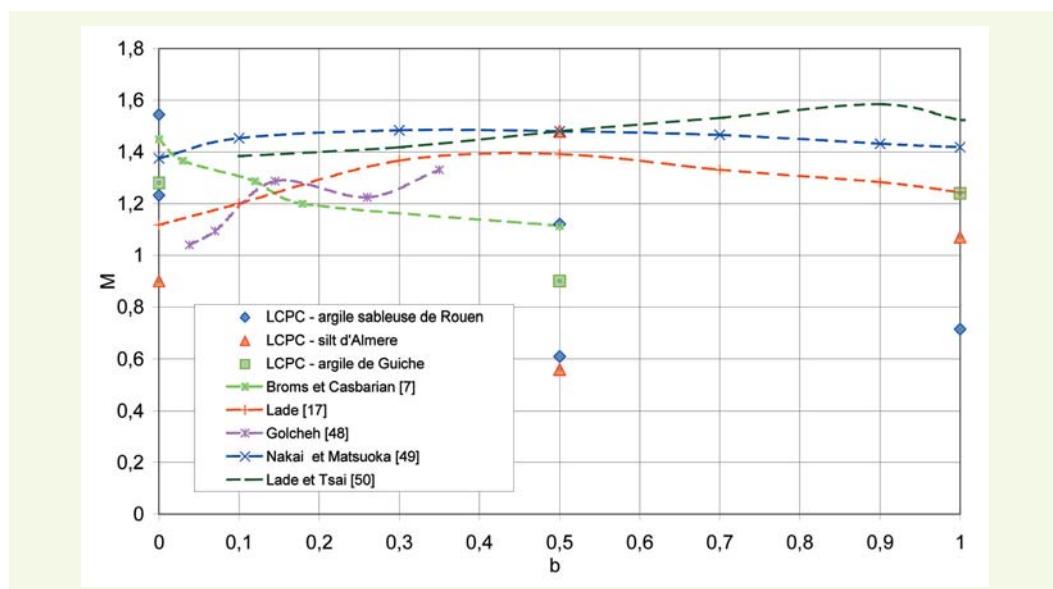
Pour le sol d'Almere, la variation de l'angle de frottement interne en fonction de l'angle de rotation des contraintes est similaire à celle observée dans la littérature pour les sols argileux. Cependant, la relation entre le paramètre b et l'angle de frottement a une allure opposée à celle constatée dans la littérature. En effet, au LCPC, les essais triaxiaux drainés et non drainés ont été réalisés à une pression de confinement plus grande que la pression de préconsolidation. Les déformations des éprouvettes dans la phase de cisaillement, qui suit la phase de consolidation, n'étaient probablement pas suffisantes pour atteindre la courbe d'état critique. Les angles de frottement interne ont pu de ce fait être sous-estimés.

La **figure 25** présente les résultats obtenus au LCPC et quelques résultats de la bibliographie en termes d'évolution de l'angle de frottement, représenté ici sous la forme de la pente M de la droite d'état critique dans le plan (p', q) avec le rapport des contraintes principales b [44]. L'étude bibliographique montre que la valeur de l'angle de frottement à la rupture dépend du type d'appareillage utilisé, de la forme de l'éprouvette, de la procédure d'essai, du chemin de contraintes imposé et évidemment de la qualité et la nature du sol testé.

La majorité des expériences réalisées par le passé ont considéré une pression intérieure et extérieure identique. Les résultats de la thèse de K. Nasreddine [47], effectuée au LCPC avec des essais à b constant, ont mis en évidence que la réalisation d'essais avec dissociation de b et de α entraînait des ruptures plus précoces des éprouvettes. Celles-ci sont dues à l'application d'une pression intérieure supérieure à celle extérieure.

figure 25

Comparaison des résultats obtenus avec les données de la littérature.



rieure au cylindre creux nécessaire au maintien de b à une valeur égale à 0,5. Certains auteurs de la littérature avaient observé cette tendance [7]. La diminution de la résistance maximale du sol, avec la rotation des contraintes principales, atteste de l'influence de cette rotation sur la relation contrainte-déformation.

L'analyse des premiers résultats obtenus par le LCPC en laboratoire et *in situ* a permis de proposer un modèle théorique simple pour tenir compte de la rotation des contraintes pour la modélisation des massifs de sol en interaction avec des ouvrages [47, 51].

CONCLUSIONS

L'intérêt de l'essai sur cylindre creux de sol naturel pour accroître les connaissances sur le comportement mécanique des sols autour des ouvrages est aujourd'hui pleinement partagé par toute la communauté des mécaniciens des sols. Pourtant, peu de laboratoires se sont dotés des appareillages nécessaires. Pour sa part, le LCPC dispose aujourd'hui d'un dispositif performant, validé et bien adapté à l'étude des sols naturels (presse PTCC). Ce dispositif, unique en France, a déjà donné des résultats intéressants et permis notamment d'entreprendre l'amélioration des modèles théoriques introduits dans les logiciels de calcul par éléments finis (comme CESAR-LCPC). Cette recherche se poursuit dans plusieurs directions : notamment dans le domaine des petites déformations et de la caractérisation des modules d'élasticité, de l'influence de l'anisotropie sur les lois d'écoulement plastique, de l'effet des sollicitations cycliques combinées et du fluage des sols argileux. Des progrès importants sont attendus de cet appareillage, en même temps que des développements réalisés au LCPC pour perfectionner la reconnaissance des sols *in situ*.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Henri Josseaume, Jean-Paul Stempfelet, Marcel Daurade et Khaldoun Nasreddine, du LCPC, pour leur aide précieuse lors de la réalisation des expérimentations.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **BJERRUM L., LANDVA A.**, Direct simple shear tests on a norwegian quick clay, *Geotechnique*, **1966**, Vol. **16**, pp. 2-20.
- 2 **ROSCOE K.H., BASETT R.H., COLE E.R.L.**, Principal axes observed during simple shear of sand ; *Proceedings of the Geotechnical Conf.*, **1967**, Vol. **1**, pp. 231-237.
- 3 **ARTHUR J.R.F., CHUA K.S., DUNSTAN T.**, Induced anisotropy in a sand, *Geotechnique*, **1977**, Vol. **27** (1), pp. 13-30.
- 4 **WIJEWICKREME D., VAID Y.P.**, Stress non-uniformities in hollow cylinder torsional specimens, *Geotechnical Testing, Journal ASTM*, **1991**, Vol. **14** (4), pp. 349-362.
- 5 **LOMIZE G.M., KRYZHANOVSKY A.L., VORONTSOV E.I., GOLDIN A.L.**, Study of deformation and strength of soils under three dimensionnal state of stress, *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, **1969**, pp. 257-265.
- 6 **HABIB P.**, Nouvelles recherches en mécanique des sols, *Annales de l'ITBTP*, **224**, Supplément Sols et Fondations, **1951**, Vol. **5**, 28 pages.
- 7 **BROMS B.B., CASBARIAN A.O.**, Effect of rotation of the principal stress axes and of the intermediate principal stress on the shear strength, *6th ICSMFE*, Montréal, **1965**, **1**, pp. 179-183.
- 8 **ZDRAVKOVIC L.**, *The stress-strain-strength anisotropy of a granular medium under general stress conditions*, PhD Thesis, Imperial College of Science, University of London, **1996**.
- 9 **ISHIHARA K., YOSHIMINE M., VARGAS W.**, Effect of principal stress direction and intermediate principal stress on undrained shear behavior of sand, *Soils and Foundations*, **1998**, **38** (3), pp. 177-186.
- 10 **KARCHAFI M.**, *Contribution à l'étude du comportement des matériaux granulaires sous sollicitations rotationnelles*, thèse de Doctorat ECP, **1988**.
- 11 **REIFFSTECK Ph., NASREDDINE K.**, Cylindre creux et détermination de paramètres de lois de comportement des sols, *PARAM2002, Paris, 2002*, pp. 303-312.
- 12 **SAADA A.S., TOWSEND F.C.**, State of the art : laboratory strength testing of soils, *ASTM STP, 1981*, Vol. **740**, pp. 7-77.
- 13 **HABIB P.**, Influence de la variation de la contrainte principale moyenne sur la résistance au cisaillement des sols, *Proc. Of the 3^d International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **1953**, **1**, pp. 131-136.
- 14 **KJELLMAN W.**, Report on an apparatus for consummate investigation of the mechanical properties of soils, *1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Harvard, États Unis, **1936**, **2**, pp. 16-20.
- 15 **KIRKPATRICK W.M.**, The condition of failure for sand, *4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, **1957**, **1**, pp. 172-178.
- 16 **SAADA A.S., BAAH A.K.**, Deformation and failure of a cross anisotropic clay under combined stresses, *3rd Pan American CSMFE*, Caracas, Venezuela, **1967**, **1**, pp. 67-88.
- 17 **LADE P.V.**, Torsion shear a aratus for soil testing Laboratory shear strength of soil, *ASTM STP, 1981*, **740**, pp. 145-163.
- 18 **HIGHT D.W., GENS A., SYMES M.J.**, The development of a new hollow cylinder a appratus for investigating the effects of principal stress rotation in soils, *Geotechnique*, **1983**, **33** (4), pp. 355-383.
- 19 **DUNCAN J.M., SEED B.**, Anisotropy and stress reorientation in clay, *Journal Geotech. Eng. Div. ASCE*, **1966**, **92**, pp. 21-50.
- 20 **SAADA AS, OU CD**, Strain-stress relations and failure of anisotropic clays, *Journal Geotech. Eng. Div. ASCE*, **1973**, **99** (SM12), pp. 1091-1111.
- 21 **SAADA A.S., BIANCHINI G.F.**, Strength of one dimensionnally consolidated clays, *Journal Geotech. Eng. Div. ASCE*, **1975**, **101** (GT11), pp. 1151-1164.
- 22 **SYMES M.J., GENS A., HIGHT D.W.**, Undrained anisotropy and principal stress rotation in saturated sand, *Geotechnique*, **1984**, **34**, pp. 11-27.
- 23 **SUKLJE L., DRNOVSEK J.**, Investigation of the tensile deformability of soils using hollow cylinders, *6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, **1965**, **1**, pp. 368-372.
- 24 **LIANG L., SAADA A.S., FIGUEROA J.-L., COPE C.T.**, Use of digital image processing in monitoring shear band development, *Geotechnical Testing Journal ASTM*, **1997**, **20** (3), pp. 324-339.
- 25 **SAADA A.S.**, Hollow cylinder torsional devices : their advantages and limitations, *ASTM STP, 1986*, **977**, pp. 766-795.
- 26 **SAADA A.S.**, Brief discussion on the stress distribution in the simple shear device, *International Conference on advances in Geotechnical Earthquake Engineering*, ROLLA, **1987**, **3**, pp. 911-915.
- 27 **SAADA A.S., LIANG L., FIGUEROA J.L., COPE C.T.**, Bifurcation and shear band propagation in sands, *Geotechnique*, **1999**, **49** (3), pp. 367-385.
- 28 **SYMES M.J.**, *Rotation of principal stress in sand*, PhD Thesis Imperial College of Science University of London, **1983**.
- 29 **HICHER P.-Y.**, *Comportement mécanique des argiles saturées sur divers chemins de sollicitations monotones et cycliques. Application à une modélisation élastoplastique et viscoplastique*, thèse de doctorat d'état, université de Paris VI, **1985**, 364 pages.
- 30 **HICHER P.-Y., LADE P.V.**, Rotation of principal directions in K_0 consolidated clay, *Journal Geotech. Eng. Div. ASCE*, **1987**, **113**, pp. 774-789.
- 31 **ISHIHARA K., YASUDA S.**, Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation, *Soils and Foundations*, **1975**, **15** (1), pp. 45-59.
- 32 **ISHIHARA K., YAMAZAKI F.**, Cyclic simple shear tests on saturated sand in muti-directionnel loading, *Soils and Foundations*, **1980**, **29** (1), pp. 45-59.
- 33 **TOWHATA I., ISHIHARA K.**, Undrained strength of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes, *Soils and Foundations*, **1985**, **25** (2), pp. 135-147.
- 34 **TOWHATA I., ISHIHARA K.**, Shear work and pore water pressure in undrained shear, *Soils and Foundations*, **1985**, **25** (3), pp. 73-84.
- 35 **MENKITI C.O.**, *Behaviour of clay and clayey-sand, with particular reference to principal stress rotation*, PhD Thesis, Imperial College of Science, University of London, **1995**.
- 36 **JARDINE R.J., ZDRAVKOVIC L., POROVIC E.**, Anisotropic consolidation including principal stress rotation experiments, results and practical implications, *14th International Conference on*

- Soil Mechanics and Foundation Engineering*,
Hamburg, Balkema, **1997**.
- 37** KARCHAFI M., *Contribution à l'étude du comportement des matériaux granulaires sous sollicitations rotationnelles*, thèse de Doctorat ECP, **1988**.
- 38** CHEHADE R., ROBINET J.-C., SHAHROUR I., Dilatance et potentiel de liquéfaction dans les essais triaxiaux et de torsion, *12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, **1989**, pp. 29-30.
- 39** KHEMISSA M., *Recherche expérimentale sur les propriétés mécaniques d'une argile molle naturelle (argile de Guiche, vallée de l'Adour)*, thèse de Doctorat ENPC, **1992**.
- 40** ROBINET J.-C., GOLCHEH Y., DEFFAYET M., FAU D., *Appareil de cisaillement des sols par torsion d'un cylindre creux*, Groupe français de rhéologie, Paris, **1983**.
- 41** DUTTINE, *Comportement des sables et des mélanges sable argile sous sollicitations statiques et dynamiques avec ou sans rotation d'axes*, thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, **2005**, 317 pages.
- 42** O'KELLY B.C., NAUGHTON P.J., Development of a new hollow cylinder apparatus for stress path measurements over a wide strain range, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, **2005**, *28* (4), pp. 345-354.
- 43** NISHIMURA S., MINH N.A., JARDINE R.J., Shear strength anisotropy of natural London Clay, *Geotechnique*, **2007**, Vol. *57*, pp. 49 - 62.
- 44** LA ROCHELLE P., SARRAILH J., TAVENAS F., ROY M., LEROUEIL S., Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils, *Canadian Geotechnical Journal*, **1981**, *18*, pp. 52-66.
- 45** ZDRAVKOVIC L., JARDINE R.J., Undrained anisotropy of Ko consolidated silt, *Canadian Geotechnical Journal*, **2000**, *37*, pp. 178-200.
- 46** BIAREZ J., HICHER P.-Y., *Elementary mechanics of soil behaviour, saturated remoulded soils*, Balkema Rotterdam, **1994**, 207 pages.
- 47** NASREDDINE K., *Effet de la rotation des contraintes sur le comportement des sols argileux*, thèse de doctorat de l'ENPC, **2004**, 331 pages.
- 48** GOLCHECH Y., *Étude de sollicitations rotationnelles sur une kaolinite. Réalisation d'un appareillage de torsion*, thèse de Doctorat ECP, **1986**.
- 49** NAKAI T., MATSUOKA H., Shear behaviors of sand and clay under three-dimensional stress condition, *Soils and Foundations*, **1983**, *23* (2), pp. 26-42.
- 50** LADE P.V., TSAI J., Effects of localization in triaxial tests on clay, *11th International conference on soil mechanics and foundation engineering*, San Francisco, **1985**, *2*, pp. 549-552.
- 51** REIFFSTECK Ph., NASREDDINE K., *Rotation des contraintes et comportement des sols autour des fondations superficielles*, Fondations superficielles, Magnan et Droniuc (ed.) Presses de l'ENPC/LCPC, Paris, **2003**, pp. 441-454.