

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Essais Triaxiaux à Chargement Contrôlé

Triaxial Tests with Controlled Loading

D. DEVEAUX Institut National des Sciences Appliquées, Rennes, France
 A. VUEZ
 D. AMOROS
 C. MIEUSSENS Laboratoire des Ponts et Chaussées, Toulouse, France
 P. DUCASSE

RÉSUMÉ Deux matériels d'essais triaxiaux à chargement contrôlé, conçus indépendamment par le L.P.C. de Toulouse et l'I.N.S.A. de Rennes, sont décrits. Ils correspondent à deux technologies différentes mais répondent aux mêmes objectifs. La sollicitation est à symétrie de révolution et le système assure l'acquisition de tous les paramètres. La commande de l'effort axial ou de la pression cellulaire permet d'asservir une ou deux grandeurs à une combinaison quelconque de l'ensemble des paramètres. Un équipement utilise une cellule spécifique asservie par un mini-ordinateur, l'autre associée à une presse triaxiale classique un automate à microprocesseur pilotable par un ordinateur.

Les premiers résultats obtenus montrent que ces appareillages offrent une grande maîtrise dans le choix des modes de chargement, ils rendent possible une meilleure simulation en laboratoire des sollicitations réelles en place et constituent ainsi un élément essentiel à la recherche sur les lois de comportement des sols.

INTRODUCTION

Lorsque l'on replace l'évolution des techniques d'essai de laboratoire dans le contexte plus général des progrès de la Mécanique des Sols, on remarque un décalage entre d'une part la recherche théorique sur le comportement des sols, la mise au point de méthodes de calcul très performantes et d'autre part les moyens d'investigation assez limités dont on dispose pour déterminer les paramètres caractéristiques des sols.

A quelques détails près, les modes opératoires ont peu évolué depuis plusieurs décennies. Ils avaient été conçus en fonction de procédures manuelles et adaptés au rythme de travail de l'expérimentateur : le cycle de chargement de l'essai oedométrique toutes les 24 heures est, à ce titre, tout à fait significatif. L'utilisation de capteurs électriques associés à des systèmes d'acquisition analogiques ou numériques, a permis d'améliorer la saisie des données et de faciliter la réalisation d'essais de longue durée. Les automatisations actuelles d'essais apportent à l'expérimentateur une plus grande souplesse de travail, sans toutefois remettre en cause fondamentalement les procédures.

La nécessité de concevoir de nouvelles techniques d'essais avait déjà été évoquée par Bishop et Henkel (1957). Plus récemment, dans un article présentant un nouveau triaxial hydraulique, Bishop et Wesley (1975) rappellent que de nombreuses tentatives ont été faites pour développer des matériels nouveaux afin de réaliser, par exemple, des essais en déformation plane ou bien d'appliquer une vraie sollicitation triaxiale. Pour ce qui concerne l'étude de la compressibilité, le matériel s'est aussi amélioré, et, dès 1969, de nouvelles procédures ont été proposées, telles que les essais à gradient contrôlé ou à déformation contrôlée (Lowe et al. - 1969 ; Sällfors - 1975).

Dans la pratique courante, l'essai triaxial correspond presque toujours à une sollicitation à symétrie cylindrique où la pression cellulaire σ_3 reste constante et où la contrainte axiale σ_1 , liée à une déformation à vitesse constante, n'est connue qu'a posteriori. Dans l'essai oedométrique l'évolution des contraintes n'est pas contrôlée et reste inconnue (σ_3 et u n'étant pas généralement mesurées).

L'expérience montre que le comportement du sol est fonction de l'état initial, mais aussi de l'histoire des contraintes et des déformations. Ce principe fondamental est d'ailleurs repris dans les modèles théoriques. Les méthodes de calcul actuelles, comme celle des éléments finis, nécessitent la mesure de paramètres caractéristiques du sol avant la rupture. Dans ces conditions, la séparation traditionnelle entre cisaillement et consolidation, n'est plus satisfaisante. Le comportement du sol doit être analysé et mesuré en fonction de paramètres tels que indice des vides, contrainte moyenne, déviateur et temps par exemple. Il apparaît dès lors nécessaire de concevoir des essais où l'expérimentateur pourra, en maîtrisant les chemins de contraintes et de déformations, recréer les conditions "in situ" et simuler l'évolution du massif de sol en fonction des hypothèses qu'il aura faites sur l'influence probable de l'ouvrage.

Ce type d'essai n'est pas facile à conduire car il faut piloter l'évolution de paramètres élaborés "calculés" à partir de grandeurs "externes" à l'échantillon (forces, pressions, déformations). Les progrès technologiques dans le domaine de la mini et micro-informatique, permettent maintenant de disposer des outils d'acquisition et de contrôle en temps réel nécessaires à la mise en oeuvre de ces essais, au moyen d'automatismes relativement simples.

Les matériels présentés ici sont des outils de recherche très généraux qui doivent permettre la mise au point de nouveaux modes opératoires transposables ensuite sur des matériels plus simples. Ils ont été conçus et réalisés parallèlement et avec des objectifs très voisins, au Laboratoire des Ponts et Chaussées de Toulouse d'une part et au Laboratoire de Géomécanique Thermique et Matériaux de l'I.N.S.A. de Rennes d'autre part.

CONCEPTION GÉNÉRALE DES SYSTÈMES : OBJECTIFS

Des appareillages permettant la réalisation d'essais à chemins contrôlés de contraintes ou de déformations ont déjà été décrits (Bishop - 1975 ; Menzies - 1977). La mise au point de nouvelles procédures nécessite la conception de systèmes très généraux, pouvant s'adapter à la plus grande variété de déroulements d'essais.

Ces procédures supposent un asservissement de grandeurs élaborées "calculées" et non de paramètres directement mesurés ; il ne s'agit donc pas de mettre au point un appareillage, mais bien de concevoir un "système" complet incluant une machinerie de sollicitations mécaniques, la mesure des paramètres, le traitement et le contrôle en temps réel. Cette conception globale d'un système intégré va d'ailleurs dans le sens d'une amélioration des qualités métrologiques de l'essai. Les systèmes sont construits autour de cellules de type triaxial à symétrie de révolution et permettent d'aborder aussi bien les problèmes de cisaillement que de consolidation.

Tout d'abord, le système doit assurer l'acquisition des paramètres qui décrivent en fonction du temps t , les variations géométriques et l'évolution des contraintes subies par l'éprouvette :

- . effort axial F et pression cellulaire σ_3
- . pression interstitielle u
- . déformations axiale ϵ_1 , radiale ϵ_3 et volumique ϵ_V

Comme dans les essais classiques, l'acquisition permet d'exprimer les résultats de l'essai, de plus elle fournit les données nécessaires au contrôle du processus. Bien que les phénomènes soient lents, l'acquisition doit être rapide et fréquente, car elle conditionne la vitesse de réaction des commandes, donc la qualité de l'essai. Le contrôle du processus se fait par la commande de deux paramètres externes :

- . la pression cellulaire
- . l'effort ou le déplacement axial

Ces commandes peuvent être asservies à l'un quelconque des paramètres ou à leur combinaison, ou bien n'être qu'un intermédiaire pour contrôler soit d'autres paramètres, soit une grandeur élaborée, calculée à partir de ceux-ci.

Les systèmes s'appuient sur des outils informatiques, un automate à microprocesseur piloté par un calculateur dans un cas, un mini-ordinateur fonctionnant en temps réel dans l'autre. Ces supports apportent une grande rapidité d'exécution, la possibilité de gérer des asservissements sur des grandeurs calculées par des fonctions complexes, mais surtout, la possibilité de pouvoir modifier aisément les procédures,

même en cours d'essais. Les processus d'asservissement de base mis en place, ne s'appuient sur aucune hypothèse de Mécanique des Sols et ne supposent pas l'utilisation d'un mode de représentation plutôt qu'un autre. Ils ne visent qu'à exprimer le maximum de possibilités de la machine triaxiale à symétrie de révolution et doivent a priori permettre tous les types d'essais que l'on peut envisager avec ce type de cellule.

DESCRIPTION DES ÉQUIPEMENTS

Les Laboratoires de l'I.N.S.A. de Rennes et des Ponts et Chaussées de Toulouse ont conçu de façon indépendante leur matériel en fonction de leurs objectifs originaux, des contextes particuliers et de leurs expériences propres.

Matériel du L.P.C. de Toulouse

Depuis 1974 le Laboratoire dispose d'un mini-ordinateur qui a permis de réaliser l'automatisation des essais courants c'est à dire l'acquisition et le pilotage de 2 presses triaxiales, 6 oedomètres et 4 machines de cisaillement. Les procédures d'essais sont classiques et correspondent aux standards habituels des modes opératoires. Conçu en 1973, il s'agit d'un système centralisé dont la gestion est assurée en totalité par un mini-ordinateur T1600 de La Télémécanique ; depuis sa mise au point, ce système a été reconduit dans 4 autres Laboratoires.

Dans le cadre des études sur les lois de comportement des sols, en particulier des sols mous et plus récemment des sols raides, il était logique d'envisager l'utilisation des moyens informatiques en place pour réaliser des essais mécaniques mieux adaptés aux nouveaux besoins de la recherche, en particulier des essais à chemin contrôlé de contraintes ou de déformations. Il nous a paru intéressant de concevoir aussi une unité triaxiale spécialement adaptée au programme envisagé et basée sur la mise en oeuvre d'automatismes simples dont nous avons déjà une expérience satisfaisante.

Description de l'unité triaxiale :

La figure 1 donne une vue d'ensemble de l'unité triaxiale. L'ensemble cellule-embase peut se déplacer verticalement au moyen d'un écrou qui permet de régler la hauteur et de disposer des échantillons jusqu'à 200 mm de hauteur.

- Application et mesure de σ_1 : la force verticale est obtenue au moyen d'un vérin hydraulique à double effet de 100 mm de course dont la pression est régulée par commande d'un électro-distributeur. La mesure est faite avec un peson placé près de l'extrémité du piston, au dessus du joint d'étanchéité de façon à ne pas être affecté par les frottements.

- Application et mesure de σ_3 : la contrainte latérale σ_3 est générée par un vérin hydraulique comportant un piston commandé par un moteur électrique. La mesure de σ_3 est faite par un capteur placé sur le circuit d'alimentation de la cellule. De nombreux essais devant se faire dans des conditions K_0 , nous avons repris la solution proposée par R.G. Campanella et al. (1972) consistant à avoir un piston de même diamètre que l'échantillon, ce qui améliore le fonctionnement de la régulation destinée à empê-

cher les variations de diamètre. L'asservissement est toutefois nécessaire, soit pour compenser la compressibilité d'ensemble du système, soit pour faire des essais où l'on mesure l'évolution du diamètre.

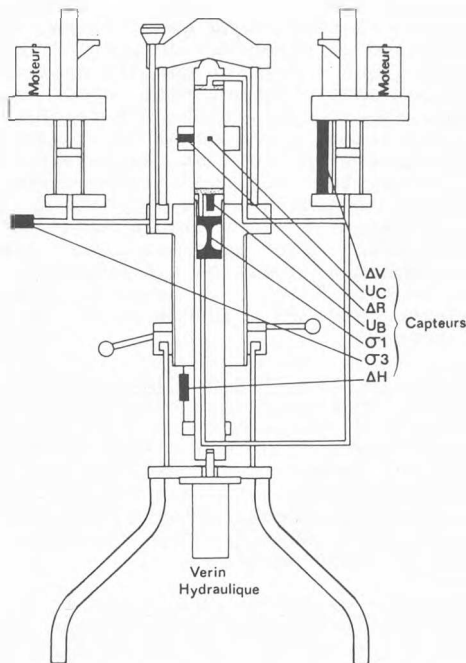


Fig. 1 - Schéma d'ensemble de l'unité triaxiale

- **Mesure du volume drainé - Contrôle de la contrepression** : Le système est constitué d'un vérin hydraulique dont on mesure le déplacement linéaire. Le fonctionnement du moteur actionnant le vérin est asservi à la pression mesurée au moyen d'un capteur placé sur le circuit de drainage, ce qui permet de réguler une contrepression et de mesurer le volume drainé ΔV à pression constante.

- **Pressions interstitielles** : deux capteurs permettent cette mesure, d'une part au moyen d'un capteur à membrane affleurante U_B , logé dans le piston à la base de l'échantillon et d'autre part avec un microcapteur U_C de 8 mm de diamètre pouvant être placé à l'autre extrémité de l'échantillon par rapport à U_B ou éventuellement au milieu de l'éprouvette.

- **Tassement ΔH** : il est mesuré au moyen d'un capteur potentiométrique.

- **Déformation radiale ΔR** : le système définitif comprendra 3 capteurs de déplacements montés à 120° sur un cylindre creux dont la dimension est telle que la poussée d'Archimède équilibre le poids de l'ensemble qui reste solidaire du plan médian de l'échantillon, pratiquement sans efforts parasites. Les essais présentés ont été réalisés avec un seul capteur diamétralement opposé à une butée.

Programmation du système :

La mise au point du logiciel de gestion de cette unité triaxiale a été conduite de manière à pouvoir assurer en permanence les essais classiques autour desquels l'automatisation avait été conçue, il s'est agi en fait d'inclure au logiciel existant une application supplémentaire.

Le système s'articule autour d'un moniteur d'exploitation dont le rôle est d'enchaîner les tâches suivantes :

- . déclenchement des mesures en temps voulu
- . auscultation périodique d'un pupitre de fonctions
- . gestion des dialogues et des éditions de résultats
- . activation de toutes les fonctions de régulation par commande tout ou rien
- . sauvegarde sur disque de toute modification de l'état du système

Le programme est écrit en PL.16 (langage évolué qui conserve néanmoins toutes les possibilités de l'assembleur).

Mise en oeuvre des essais :

Les données relatives à l'exécution de l'essai sont de 3 ordres :

- . caractéristiques historiques et géométriques de l'échantillon : n° dossier, profondeur de prélèvement, diamètre, hauteur, etc ...
- . références des capteurs : ce qui permet au système de retrouver les courbes d'étalonnage et la valeur des gains d'amplification qui peuvent différer d'un capteur à l'autre
- . conditions de déroulement de l'essai : chacun des trois moteurs peut être asservi à une condition de la forme $P_1 = AP_2 + B$, P_1 et P_2 étant 2 paramètres choisis parmi les 8 mesurés ($\sigma_1 - \sigma_3 - U_C - U_B - \Delta H - \Delta R - \Delta V - t$), A et B des coefficients caractérisant la loi que l'on veut suivre. (Par exemple, pour respecter la condition $(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 = 100$ kPa on déclarera $P_1 = \sigma_1$, $P_2 = \sigma_3$, A = - 2, B = 300).

Ces données sont introduites soit par dialogue opérateur-télétype, soit par lecture d'un fichier (carte ou ruban perforé) préalablement élaboré. Ce dernier procédé permet à tout moment et de façon très rapide d'infléchir le déroulement de l'essai, ou d'enchaîner différentes phases. Un état des 8 grandeurs physiques mesurées est affiché cycliquement sur l'imprimante.

Commande des moteurs - régulation :

Les commandes sont du type "tout ou rien", cependant on peut ajuster manuellement les vitesses d'application de chacun des trois paramètres σ_1 , σ_3 et contrepression soit grâce à un variateur électronique de vitesse (cas de σ_3 et ΔV), soit par réglage d'une vanne aiguille (cas de σ_1). La régulation s'effectue par comparaison entre la valeur théorique donnée par la relation ($AP_2 + B$) et la valeur réelle du paramètre P_1 . La durée moyenne d'un cycle de régulation est de 1/10^e de seconde environ.

Matériel de l'I.N.S.A. de Rennes

Au Laboratoire de Géomécanique de l'I.N.S.A. de Rennes, les essais suivant les procédures classiques (triaxial, oedomètres, cisaillement direct et alterné) sont gérés par un système centralisé qui utilise une chaîne de mesure pilotée par un ordinateur DEC PDP 11/05 ; le logiciel est un interpréteur Basic "temps réel".

Afin d'alléger le système d'exploitation et de laisser à l'expérimentateur une plus grande maîtrise de l'essai et une plus grande facilité d'emploi, les fonctions d'asservissement et de contrôle ont été décentralisées vers un automate à microprocesseur, la gestion générale de l'essai se faisant toujours, en langage évolué, sur le calculateur central.

L'automate devra pouvoir s'adapter facilement à des transformations peut-être importantes des outils d'essai ou d'exploitation. A cette fin, il a été conçu de façon très modulaire, en veillant à normaliser les liaisons entre les différentes unités.

L'automate est associé à un appareil triaxial standard équipé d'une presse à contrôle électronique de la vitesse. Les lois d'étalonnage des différents capteurs sont introduites au début de chaque essai. Ces dispositions permettent l'emploi de toutes les cellules standards.

L'emploi de cellules utilisant des systèmes de mesure particuliers sera également possible, en effet, sur les 8 voies de mesure, seules trois sont affectées à des grandeurs particulières.

Description du matériel réalisé :

L'organisation générale du matériel est présentée sur la figure 2. On peut distinguer trois blocs, correspondant chacun à une fonction particulière :

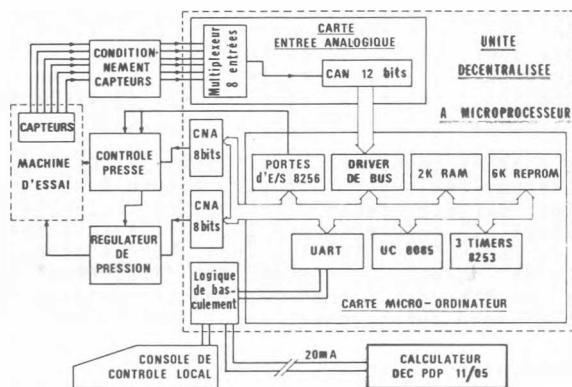


Fig. 2 - Schéma d'ensemble du système de contrôle de l'appareil triaxial

- Les périphériques d'interfaçage sur l'essai physique (presse et cellule) sont eux-mêmes au nombre de trois :

- un boîtier d'adaptation de capteurs : à chaque capteur est associée une carte de conditionnement qui assure l'alimentation stabilisée, l'amplification du signal de sortie et la détection de dépassement de gamme (en cas de

faillance du système informatique de contrôle),

- l'unité de contrôle de presse : le régulateur P.I.D. (Proportionnel, Intégral et Dérivé) intégré dans la presse a été adapté pour permettre le pilotage automatique de la vitesse et du sens de déplacement.

- le régulateur de pression qui contrôle σ_3 a été conçu et réalisé au Laboratoire. Il est constitué d'un détendeur de précision entraîné par un moteur à courant continu asservi. Deux modes de fonctionnement sont possibles : soit en régulateur P.I.D. en boucle fermée, l'appareil fonctionne alors comme un convertisseur tension-pression, soit en régulateur tout ou rien, un système logique externe donnant les commandes de montée et de descente ; dans ce mode, la vitesse est réglable manuellement de 3 à 100 kPa/s. Dans tous les cas, l'erreur sur l'ajustement de pression est inférieure à 2 kPa ; en mode P.I.D., le temps de réponse pour la pleine gamme (0 à 1000 kPa) est de l'ordre de 2 secondes.

- L'unité d'acquisition de gestion est construite autour d'un microprocesseur Intel 8085. L'acquisition de donnée est faite à l'aide d'un CAN 12 bits (Convertisseur Analogique Numérique). Le contrôle des périphériques utilise deux CNA de 8 bits (Convertisseur Numérique Analogique) et 10 sorties logiques. Deux horloges temps réel permettent de gérer deux rythmes de scrutation simultanés et indépendants.

- Le contrôle extérieur de l'automate est effectué par l'intermédiaire d'une liaison série soit à l'aide d'une console locale, soit par le calculateur. Le choix entre ces deux modes est géré par programme, il est donc possible de les utiliser simultanément dans le même essai.

Programmation et utilisation du système :

La programmation de l'automate est effectuée en assembleur. Le programme est conçu comme un langage de commande hiérarchisé et non figé : un tel langage définit les commandes de différents niveaux, les commandes de niveau supérieur faisant appel, comme sous-programmes, à celles de niveau inférieur.

La conception générale du programme est la suivante : une boucle attend en permanence l'arrivée d'une commande qui peut provenir indifféremment de la console ou du calculateur ; à chaque cycle, s'ils sont validés, deux sous-programmes d'asservissement peuvent être appelés. L'un contrôle le déplacement de la presse de façon proportionnelle, l'autre pilote la pression σ_3 en tout ou rien (second mode du régulateur) ; ils fonctionnent de façon identique en asservissant la grandeur à l'un quelconque des paramètres mesurés, par comparaison avec une consigne. Cette boucle peut être interrompue par deux séquences de scrutations produites par les horloges internes : une première, dite de mesure, fournira les résultats bruts de l'essai exprimés en grandeurs physiques ; la seconde, beaucoup plus rapide, est dite d'asservissement : elle pourra soit injecter les données mesurées dans un sous-programme (correspondant à une commande de niveau supérieur) réagissant sur les consignes d'asservissement ou d'autres paramètres, soit les transmettre au calculateur qui se charge alors des calculs d'asservissement et renvoie à l'au-

tomate les commandes de contrôle de paramètres (ainsi, pour un essai à $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ constant le calculateur détermine la valeur que doit prendre σ_3 et appelle la commande de réglage de pression-régulateur en mode P.I.D.).

Les commandes de premier niveau sont programmées : elles assurent le contrôle de la machine d'essai (presse, régulateur de pression) et de l'automate (choix des rythmes de scrutation, commandes des asservissements, etc), et permettent de piloter toutes les fonctions de base dont l'appareillage est capable, sans faire d'hypothèses sur les grandeurs mesurées, ni aucun choix de représentation de l'essai en fonction de théories mécaniques. Ces choix sont effectués au niveau de calcul d'asservissement sur l'ordinateur central : là, les programmes étant écrits en langage évolué, il est aisé de les modifier pour essayer différentes procédures.

Dans sa configuration actuelle, l'automate permet l'exécution en mode local, c'est à dire sans recours au calculateur central, d'essais relativement simples, tels que les essais normalisés, les consolidations anisotropes par palier, les essais K_0 ; ceci par introduction manuelle des commandes et avec cependant une acquisition automatique des données. La liaison au calculateur permet l'exécution de tous les asservissements imaginables, même ceux qui nécessitent des calculs complexes, et la poursuite automatique de chemins de contraintes ou de déformations définis à l'avance utilisant, pour ce faire, des programmes très simples qui font les calculs d'asservissement et gèrent des entrées/sorties sur une ligne série.

Bien entendu, lorsqu'une procédure d'asservissement ou d'essai est devenue routinière, elle peut être transférée sur l'automate, devenant ainsi une commande de niveau supérieur. Donc, au fur et à mesure que les choix s'affineront en matière d'essais de sol, le calculateur central se trouvera déchargé des fonctions d'asservissement. Il est même tout à fait raisonnable d'envisager la gestion complète d'essais normalisés par l'automate seul.

Ce système permet, avec une grande souplesse et une grande simplicité d'emploi, de tester toute procédure d'essai triaxial asservi. Un accent particulier a été mis sur les possibilités d'adaptation et d'évolution de l'ensemble, que ce soit pour le choix des dimensions des échantillons (cellules normalisées), le logiciel (langage de commande hiérarchisé), les adaptations matérielles (conception modulaire). Surtout, l'expérimentateur qui, a priori n'est pas informaticien, manipule, par l'intermédiaire des commandes, des concepts mécaniques et physiques et n'a pas à se préoccuper des problèmes informatiques et électroniques parfois complexes que posent les asservissements.

EXEMPLES D'APPLICATIONS

Les matériels décrits ont été conçus depuis relativement peu de temps et les essais ont été effectués dans la perspective de la mise au point des équipements. Ils ne constituent qu'une description de quelques essais réalisables parmi l'éventail des différentes possibilités.

Essais réalisés au L.P.C. de Toulouse

Les essais ont été effectués sur des échantillons intacts d'argiles molles prélevés pour le sol n° 1 au carottier courant à piston stationnaire (\emptyset 80 mm), dans les marais des Barthes de l'Adour et pour le sol n° 2 avec un carottier (\emptyset 200 mm) spécialement adapté pour les sols mous, sur le site de Cubzac près de Bordeaux. Les principales caractéristiques géotechniques de ces sols sont les suivantes :

Sol n° 1 : $I_p = 28\%$ - $w_L = 50\%$ - $w = 56\%$
 $c_u = 22$ kPa (scissomètre de chantier)
 $\phi' = 30^\circ$ - $c' = 0$
 $e_0 = 1,5$ - $\gamma_d = 10$ kN/m³ - $C_c = 1$

Sol n° 2 : $I_p = 55\%$ - $w_L = 100\%$ - $w = 83\%$
 $c_u = 20$ kPa (scissomètre de chantier)
 $\phi' = 33^\circ$ - $c' = 0$
 $e_0 = 2,5$ - $\gamma_d = 7,5$ kN/m³ - $C_c = 1/2$

La figure 3 donne les résultats des essais à chemin imposé de contraintes dans le diagramme (p', q) pour les sols étudiés.

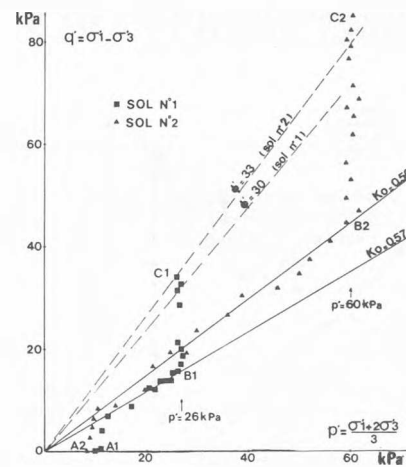


Fig. 3 - Essais sur des argiles molles

- Chemin OA : création d'un état initial arbitraire correspondant à une consolidation légèrement anisotrope ($\sigma_1 = \sigma_3 + 5$ kPa).
- Chemin AB : consolidation dans un état K_0 , à gradient contrôlé : σ_3 est asservie à la condition $\epsilon_3 = 0$ (satisfaite à ± 1 μ m pour un échantillon de 60 mm) et σ_1 à la condition $U_B - U_C = 5$ kPa. L'essai est drainé en sorte que $U_C = 50$ kPa (valeur constante de la contre pression satisfaite à $\pm 0,1$ kPa ; par contre les fluctuations de U_B sont plus importantes $\pm 0,5$ à 1 kPa).
- Chemin BC : cisaillement à $p' =$ constante. Pour cette phase σ_1 est asservie à la condition $\Delta H/\Delta t = 3 \cdot 10^{-5}$ mm/s et σ_3 à la condition $\sigma'_1/3 + 2 \sigma'_3/3 =$ constante. La mesure de U_B permet de vérifier que l'essai est drainé.

Les cisaillements ont été effectués à partir de valeurs de p' et q proches des conditions en place pour le sol n° 1 et plus élevées pour le sol n° 2. Les valeurs de K_0 sont respectivement de 0,57 et de 0,50. La rupture se produit légèrement au dessus des droites ϕ' , dont la valeur

avait été déterminée au moyen d'essais CU standards. On notera la rapidité de la phase cisaillement par rapport à l'essai drainé classique (4 à 5 heures pour les sols étudiés).

Essais réalisés à l'I.N.S.A. de Rennes

Les essais ont été effectués sur des échantillons de sable de Leucate saturé, chargés à drainage ouvert à la vitesse de 0,02 mm/mn. Parmi les différents chargements, on distingue :

- . essai 12-7 : consolidation anisotrope par paliers ($\sigma'_1/\sigma'_3 = 2,8$) puis cisaillement à σ'_3 constant (150 kPa)
- . essai 6-1 : cisaillement à $p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ constant (310 kPa)
- . essai 7-1 : consolidation anisotrope ($\sigma'_1/\sigma'_3 = 1,4$) puis cisaillement à p' constant (355 kPa)
- . essai 4-3 : consolidation à $\epsilon_3 = (\epsilon_v - \epsilon_1)/2$ nulle et cisaillement à p' constant (247 kPa)

Les points expérimentaux sont reportés sur un diagramme ($p', q/2$) (Fig. 4) et sur un plan repéré par les axes σ'_1/σ'_3 et $1 - \epsilon_v/\epsilon_1$ (Fig. 5).

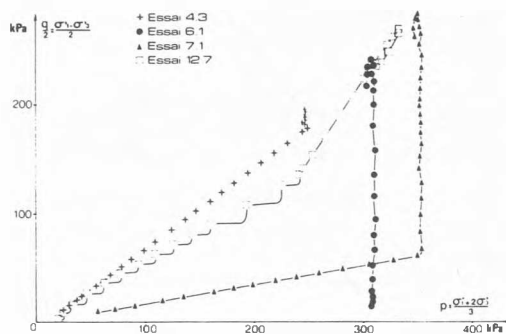


Fig. 4 - Diagramme $p', q/2$

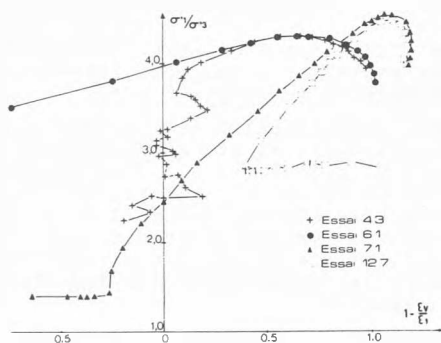


Fig. 5 - Diagramme ($\sigma'_1/\sigma'_3 ; 1 - \epsilon_v/\epsilon_1$)

Trois procédures de chargement ont pu être testées sur l'ensemble de ces quatre essais dont les résultats font apparaître :

- . par comparaison sur la figure 5 des paliers de consolidation des essais 12-7 et 7-1, un meilleur suivi du rapport des contraintes σ'_1/σ'_3 pour un chargement en continu

- . un écart de $\pm 2,5$ kPa sur la valeur de p' affichée (voir figure 4). L'écart de 8 kPa observé après le maximum de résistance au cisaillement (essais 6-1 et 7-1) est dû à la procédure de contrôle de σ_3 choisie et modifiée pour l'essai 4-3

- . une consolidation à ϵ_3 nulle réalisée avec des écarts maxima de 0,002 autour de la valeur 0.

CONCLUSIONS

Les premières expérimentations à chemins contrôlés de contraintes et de déformations montrent que ces essais sont désormais possibles technologiquement. Une conception très générale du système permet d'imaginer théoriquement n'importe quelle procédure et non pas une sollicitation figée, souvent éloignée des conditions réelles en place. Cependant leur emploi fait apparaître des difficultés qui étaient jusqu'alors négligées dans les essais courants :

- . définition des conditions initiales de l'essai
- . définition du processus d'application des sollicitations qu'il n'est pas aisé de prévoir a priori

Sans apporter actuellement des réponses qui nécessitent la réalisation d'un grand nombre d'essais, les matériels décrits, par leur souplesse d'emploi et de programmation, donnent les moyens d'une approche expérimentale de ces problèmes. Par contre ils obligent à ne concevoir que des essais d'abord physiquement possibles, puis effectivement en rapport avec le phénomène à étudier.

L'utilisation d'automatisme se traduit paradoxalement par la nécessité de mieux suivre et par conséquent de mieux comprendre les déroulements des essais. Par le biais de la mise au point de matériels expérimentaux, on aboutit à l'objectif principal qui est la compréhension des phénomènes physiques.

RÉFÉRENCES

- Bishop AW & Henkel DJ (1957). The measurement of soil properties in the triaxial test. London : Edward Arnold.
- Bishop AW & Wesley LD (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. Géotechnique (25) n° 4, 667-670.
- Campanella RG & Vaid YP (1972). A simple K_0 triaxial cell. Revue Canadienne de Géotechnique (9) n° 3, 249-260.
- Lowe J, Jonas F & Obrician V (1969). Controlled gradient test. ASCE (95) n° SM1, 77-97.
- Menzies BK (1977). APTT stress paths taped (Automatic Programmable Triaxial Test). Seminar Monday 4 July 1977, Developments in Laboratory testing of soils, University of Surrey.
- Sällfors G (1975). New oedometer routines - Advantages in engineering practice. Istanbul conference on soil mechanics and foundation engineering, Vol 1 - Session 1, 129-136.