



**HAL**  
open science

# Influence de la vitesse d'essai et de la consolidation anisotrope de l'éprouvette dans les essais triaxiaux cycliques

Jean François Serratrice

► **To cite this version:**

Jean François Serratrice. Influence de la vitesse d'essai et de la consolidation anisotrope de l'éprouvette dans les essais triaxiaux cycliques. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2013, 279, pp 95-102. hal-00851036

**HAL Id: hal-00851036**

**<https://hal.science/hal-00851036>**

Submitted on 12 Aug 2013

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

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

# Influence de la vitesse d'essai et de la consolidation anisotrope de l'éprouvette dans les essais triaxiaux cycliques

Jean-François SERRATRICE  
CETE Méditerranée, LR Aix-en-Provence

## ■ Résumé

Deux aspects pratiques de la réalisation des essais triaxiaux cycliques non drainés sont examinés. Le premier concerne les vitesses de chargement, qui s'avèrent largement supérieures aux vitesses appliquées pendant les essais à chargement monotones sur les sols limoneux ou argileux. Le second aspect concerne le niveau des contraintes statiques pendant les cycles, pour expliquer que les critères en résistance cyclique sont atteints préférentiellement en extension pendant les essais strictement alternés. Les procédures d'essai sont évoquées sommairement. Des exemples de courbes d'essais sont présentés et commentés ensuite.

## Influence of test loading rate and anisotropic specimen consolidation during cyclic triaxial testing

### ■ Abstract

*Two practical aspects of undrained cyclic triaxial test procedures are examined. The first one concerns the rate of loading, which is always significantly greater than that applied during monotonic loading tests on silty and clayey soils. The second procedure concerns the level of static stresses applied during cyclic loading, in order to explain that the yield strength criteria are more readily reached in tension during a strictly alternating test protocol. A summary of testing procedures is presented, along with examples of test results, before offering a few concluding remarks.*

## INTRODUCTION

Deux aspects pratiques de la réalisation des essais triaxiaux cycliques non drainés sont commentés ici à l'appui de données expérimentales. Pour cela, trois séries d'essais cycliques non drainés ont été réalisées en laboratoire. La première porte sur un limon argileux testé dans son état naturel, avec pour objectif d'observer l'effet de la vitesse de chargement. Les deux autres concernent un sable reconstitué au laboratoire et pour lequel des niveaux différents de contraintes statiques ont été appliqués pendant les cycles.

La question de la vitesse de chargement cyclique est importante, puisqu'elle conditionne la durée des essais, d'une part, mais aussi la qualité des résultats, d'autre part, en matière de mesure des pressions interstitielles notamment. Cette question ne se pose pas avec les sables propres, pour lesquels les fréquences cycliques de 0,1 à 0,5 Hz sont appliquées le plus souvent. Mais, de telles fréquences se traduisent par des vitesses de chargement qui sont largement à très largement supérieures aux vitesses préconisées dans les procédures triaxiales pour les essais à chargement monotone sur les sols limoneux ou argileux. Dans ces procédures, les vitesses de chargement sont limitées afin de maintenir les champs de pressions interstitielles à peu près homogènes dans les éprouvettes triaxiales non drainées. La question de la vitesse de chargement cyclique porte donc aussi sur la qualité des essais triaxiaux.

L'autre problème concerne l'effet de l'état initial des contraintes sur la résistance cyclique des sols. Cette question a fait l'objet de nombreuses études expérimentales à l'appareil triaxial ou avec d'autres dispositifs (cisaillement simple, cylindre creux). Dans la pratique, les procédures d'essais cycliques préconisent de réaliser des chargements cycliques non drainés sur des éprouvettes préalablement consolidées sous des contraintes isotropes. Les chargements triaxiaux cycliques sont purement alternés dans ce cas. L'expérience montre alors que les ruptures se produisent en extension le plus souvent. Or, dans les sites de dépôts récents normalement consolidés, les états initiaux de contraintes ne sont pas isotropes, mais situés du côté des compressions. Les incursions en extension pendant les cycles alternés au laboratoire sont donc pénalisantes pour les sols et la résistance cyclique ainsi mesurée est estimée par défaut.

## PROCÉDURE D'ESSAI

### ■ Mode de chargement

Dans leur principe, les essais cycliques présentés ici sont réalisés avec des vitesses de chargement très lentes. Pour cela, des matériels triaxiaux standards sont mis en œuvre. Les chargements non drainés (CU) sont effectués en mode EV avec contrôle de l'effort axial (E), qui varie entre deux bornes fixes, et une vitesse de déplacement (V) constante et imposée par la presse triaxiale.

Les éprouvettes sont saturées sous contre-pression. Cette contre-pression est appliquée par paliers successifs. Puis les éprouvettes sont consolidées sous une pression effective isotrope  $p_c = 100$  kPa. Les séquences de cycles contrôlées en effort sont effectuées ensuite avec différentes vitesses de chargement  $v$ , pour différentes amplitudes  $\Delta q_y$  du déviateur  $q$  et des valeurs moyennes  $q_{moy}$  différentes. Ainsi, les cycles sont définis par un effort axial  $F$  qui oscille entre deux bornes, auxquelles correspondent approximativement les deux déviateurs  $q_{min}$  et  $q_{max}$  (cette approximation est fonction de la correction de section de l'éprouvette au cours des cycles). L'amplitude cyclique est  $\Delta q_y = (q_{max} - q_{min})/2$  et le déviateur moyen est  $q_{moy} = (q_{max} + q_{min})/2$ .

Dans ce type de chargement où la vitesse  $v$  est constante, le déviateur est alterné au cours du temps ( $q$  alternativement positif et négatif, l'amplitude  $\Delta q_y$  reste inférieure au déviateur moyen  $q_{moy}$ ,  $\Delta q_y < |q_{moy}|$ ) ou ondulé ( $q$  reste positif, l'amplitude est supérieure au déviateur moyen,  $|q_{moy}| < \Delta q_y$ ). La durée des séquences de cycles CU dépend de la vitesse  $v$  choisie et va de quelques heures à une centaine d'heures pour effectuer de 10 à 20 cycles.

Les séquences de cycles sont exprimées par les variables suivantes :  $\varepsilon_a = \Delta h/h_s$  la déformation axiale ( $h_s$  hauteur de l'éprouvette après consolidation),  $p = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3$  la pression effective moyenne,  $q = \sigma'_a - \sigma'_r$  le déviateur,  $u$  la pression interstitielle mesurée au pied de l'éprouvette, avec  $\sigma'_a$  et  $\sigma'_r$  les contraintes effectives axiale et radiale.

À l'issue des séquences de cycles, la résistance cyclique non drainée du sol est définie par un critère qui consiste à déterminer le numéro du cycle pendant lequel apparaît une déformation axiale d'un niveau donné. Ici, ce niveau est défini par la déformation axiale simple amplitude  $\varepsilon_{ay,SA}$  égale à 2,5 % en valeur absolue, en compression ou en extension.

Des essais triaxiaux à chargement monotone accompagnent les essais cycliques.

### ■ Choix des vitesses d'essais monotones

Dans la pratique courante, les normes définissent les règles pour le choix des vitesses de chargement à l'appareil triaxial (par exemple AFNOR, 1994). Ces règles découlent d'une approche théorique développée dans les années 1950 (Bishop et Henkel, 1964).

Pendant les essais triaxiaux non drainés, la non-homogénéité du champ des pressions interstitielles au sein de l'éprouvette est attribuée à l'hétérogénéité des contraintes et des déformations, qui résulte

entre autre de l'effet de frettage des têtes triaxiales (Bishop et Henkel, 1964). Cette hétérogénéité peut être accentuée par l'effet de la vitesse de chargement. Le retour à l'homogénéité dépend de la perméabilité du sol, de son degré d'induration ou surconsolidation, des dimensions de l'éprouvette et de la vitesse de chargement.

Un taux d'uniformisation des pressions interstitielles a été défini par l'expression  $1 - \Delta u / \Delta u_0$ , où  $\Delta u_0$  est la différence de pression interstitielle entre le centre de l'éprouvette et ses extrémités pour une déformation axiale  $\varepsilon_{af}$  donnée et un chargement lent, et  $\Delta u$  cette différence au temps  $t_f$  pour le même niveau de déformation pendant le chargement réel à vitesse constante. Le temps  $t_f$  doit être choisi afin que le taux d'uniformisation atteigne 100 %.

Une relation théorique a été établie par Gibson et Henkel (1954), pour relier le taux d'uniformisation à un degré de consolidation  $U_f$  et un facteur temps  $T_f$ . Ce dernier est indiqué dans le **tableau 1**.

**tableau 1**  
Valeurs du facteur temps  $T_f$  pour obtenir un taux d'uniformisation donné, en fonction des conditions de drainage.

Taux d'uniformisation	Drainage latéral	Drainage axial seul
95 %	0,071	1,67
99 %	0,36	8,50

Le passage de 95 % à 99 % du taux d'uniformisation fait croître le facteur temps dans un rapport de cinq environ. En pratique, le calcul des durées  $t_f$  des essais triaxiaux CU à chargement monotone fait intervenir le niveau de déformation  $\varepsilon_{af}$  et le facteur temps  $T_f$ . Le temps  $t_f$  est donné par la relation suivante, en écrivant  $h^2 / c_v = t_{100} / \rho$  :

$$t_f = T_f h^2 / c_v = T_f t_{100} / \rho$$

où  $\rho$  est le coefficient qui dépend des conditions de drainage aux limites de l'éprouvette ( $\rho = \pi, \pi/4, \pi/64, \dots$ ),  $t_{100}$  le temps de fin de consolidation primaire,  $h$  la demi-hauteur de l'éprouvette triaxiale et  $c_v$  le coefficient de consolidation du sol. D'où la vitesse maximale de déplacement  $v_{max}$  à donner en consigne à la machine triaxiale :

$$v_{max} = \Delta h_f / t_f = h_0 \varepsilon_{af} / [T_f t_{100} / \rho] = h_0 \varepsilon_{af} / a t_{100}$$

où  $h_0$  la hauteur de l'éprouvette et  $a = T_f / \rho$ . Ce coefficient  $a = T_f / \rho$  passe de 2,1 à 10,8 quand le taux passe de 95 % à 99 % dans une éprouvette drainée à ses deux extrémités. Le plus souvent, le taux préconisé est de 95 %. Aussi, le choix d'un taux de 99 % majore largement la durée des essais, dans un rapport de cinq.

## ■ Vitesses des essais cycliques

Pendant un essai triaxial cyclique où le chargement est sinusoïdal,  $f$  est la fréquence,  $T$  la période et  $\Delta q_y$  l'amplitude, la vitesse maximale de chargement est :

$$(d\varepsilon_a/dt)_{max} = 2\pi \Delta q_y / T E_u$$

où  $E_u$  est le module d'Young non drainé du sol.

Dans l'exemple d'un sol argileux mou de module  $E_u = 50$  MPa et d'un essai cyclique de faible amplitude  $\Delta q_y = 10$  kPa, les vitesses de chargement monotone équivalentes sont indiquées dans le **tableau 2** en fonction des fréquences  $f$  et des périodes  $T$ , pour des éprouvettes de 100 mm de hauteur. Il apparaît que les vitesses cycliques dans la gamme des fréquences de 0,1 à 1 Hz sont largement plus grandes que celles des essais monotones CU, qui sont souvent de l'ordre de 0,010 mm/min (10  $\mu$ m/min) pour des sols fins limoneux ou argileux.

**tableau 2**  
Exemples de vitesses de chargement maximales pendant les cycles sinusoidaux.

f (Hz)	10	1	0,1	0,01	0,001
T (s)	0,1	1	10	100	1000
v (mm/min)	75,4	7,54	0,754	0,075	0,007

## EFFET DE LA VITESSE DE CHARGEMENT

### ■ Essais

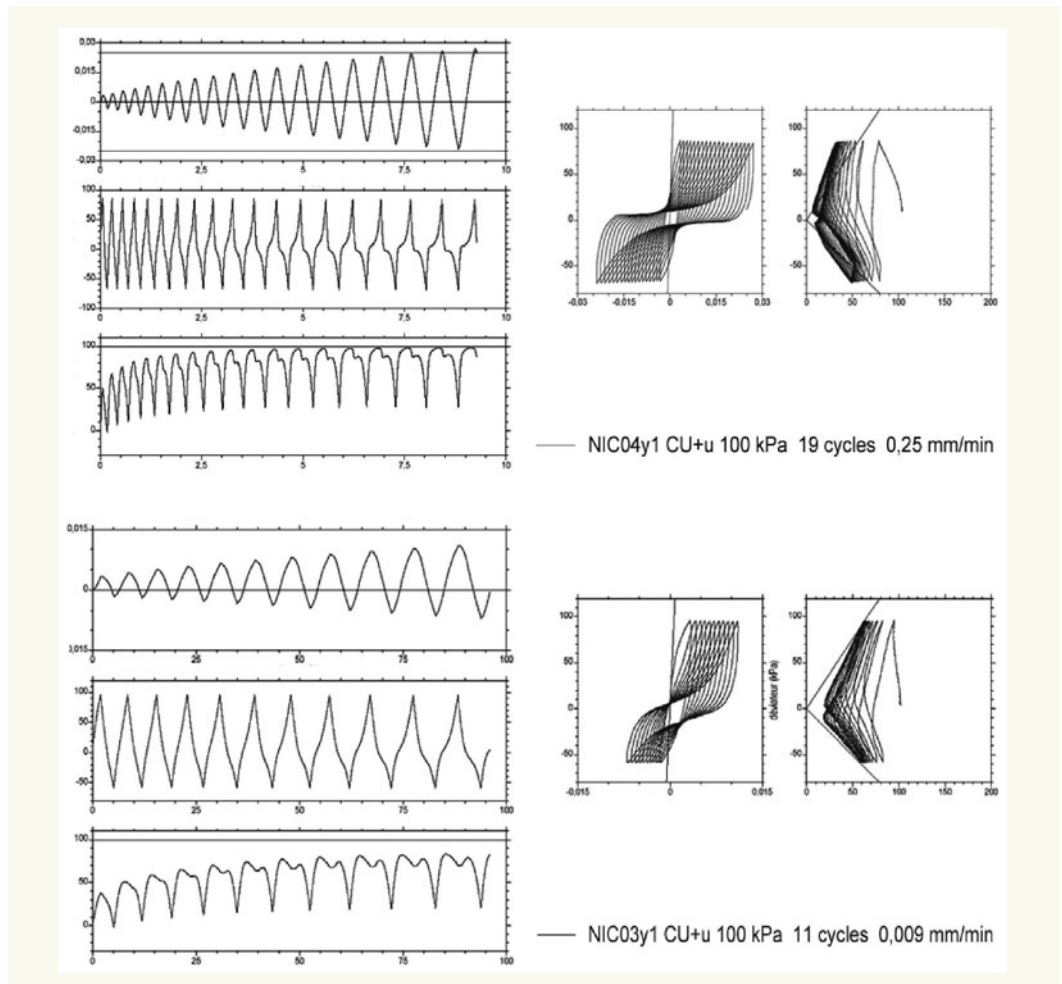
Le sol testé a été prélevé dans le sondage carotté vers 24 m de profondeur. Il s'agit d'un limon brun noirâtre argileux. Les éprouvettes triaxiales sont découpées manuellement au touret à partir d'un tronçon extrait d'un échantillon carotté (diamètre des éprouvettes 50 mm, élancement deux).

Les éprouvettes sont consolidées sous une pression isotrope effective  $p_c$  égale à 100 kPa. Puis, les séquences de cycles sont effectuées en mode EV, défini plus haut, pour différentes vitesses  $v$  comprises entre 0,009 et 0,25 mm/min, sous des amplitudes identiques du déviateur  $\Delta q_y = 77$  kPa et des cycles strictement alternés ( $q_{moy} \approx 0$ ). La durée des séquences de cycles non drainés va de 9 à 96 heures.

Les essais sont interprétés en contraintes effectives.

### ■ Résultats

Les réponses du sol dans les deux essais cycliques CU sont représentées sur la **figure 1** avec les courbes  $(t, \epsilon_a)$ ,  $(t, q)$ ,  $(t, u)$ ,  $(\epsilon_a, q)$  et les chemins des contraintes effectives  $(p, q)$ . Le premier essai a été effectué à la vitesse  $v = 0,25$  mm/min (19 cycles en 9 heures), le second à la vitesse



**figure 1**  
Essais triaxiaux cycliques CU réalisés à deux vitesses de chargement différentes en mode EV. À gauche, courbes de variation de la déformation axiale  $\epsilon_a$  du déviateur  $q$  et de la pression interstitielle  $u$  en fonction du temps. À droite, courbes contrainte-déformation  $(\epsilon_a, q)$  et chemin des contraintes effectives  $(p, q)$ .

$v = 0,009$  mm/min (11 cycles en 96 heures). La vitesse appliquée pendant cet essai est comparable à celle des essais non drainés monotones lents.

Les courbes  $(t, \varepsilon_a)$  présentent une allure très progressive, sans évolution brutale, ce qui est une réponse typique pour un sol argileux. L'accroissement de la pression interstitielle est très lent dans le second essai. Dans le plan des contraintes effectives  $(p, q)$ , les chemins des contraintes n'atteignent pas l'origine. Pendant le premier essai, les chemins  $(p, q)$  « dépassent » les droites de Coulomb de compression et d'extension en crête et en pied de cycle.

Les droites de Coulomb de compression et d'extension représentées dans les plans  $(p, q)$  ont été déterminées à l'aide d'essais triaxiaux CU à chargement monotone lent. Leurs pentes valent respectivement  $M_c = 1,51$  et  $M_e = -1,01$ , et correspondent à un angle de frottement  $\phi' = 37,2$  degrés.

Par rapport aux chargements lents, les fortes vitesses cycliques ont tendance à décaler les chemins de contraintes effectives vers les pressions moyennes plus faibles. Les pentes  $M_c$  et  $M_e$  sont alors surévaluées en valeurs absolues. Dans le cas particulier des deux essais cycliques présentés ici, l'angle de frottement interne est surévalué de près de 10 degrés.

## EFFET DU NIVEAU DES CONTRAINTES STATIQUES

### ■ Essais

Le sable a été prélevé par carottage vers 3 m de profondeur. Il s'agit d'un sable légèrement limoneux dont les teneurs en particules sont  $C_{200\ \mu\text{m}} = 62\%$ ,  $C_{80\ \mu\text{m}} = 26\%$ ,  $C_{20\ \mu\text{m}} = 17\%$ ,  $C_{2\ \mu\text{m}} = 5\%$  et  $D_{\text{max}} = 0,5$  mm. Des essais triaxiaux CU monotones et cycliques ont été réalisés sur le sol intact. Mais le nombre d'essais est limité compte tenu de la disponibilité réduite des carottages.

Aussi, les éprouvettes de deux séries présentées ici ont été reconstituées au laboratoire (diamètre 50 mm et élancement deux). Pour cela, le sable initialement sec est légèrement humidifié (teneur en eau  $w = 2\%$ ), puis il est déversé dans un moule en trois couches et compacté par damage pour obtenir la densité visée (damage humide). L'indice des vides moyen des éprouvettes reconstituées vaut  $e = 1,02$  environ. Les mesures des densités minimale et maximale montrent que l'indice de densité du sable ainsi reconstitué vaut  $I_p = 48\%$ .

Les séquences de cycles ont été réalisées en mode EV à la vitesse constante  $v = 0,05$  mm/min, après consolidation isotrope des éprouvettes sous la pression effective  $p_c = 100$  kPa.

Les séquences de cycles sont caractérisées par des amplitudes  $\Delta q_y$  identiques, telles que  $\Delta q_y / 2 p_c \approx 0,29$  pour la série 1 et  $\Delta q_y / 2 p_c \approx 0,20$  pour la série 2. Les valeurs moyennes statiques  $q_{\text{moy}}$  différentes. La durée des séquences de cycles non drainés va 7 à 66 heures.

### ■ Résultats

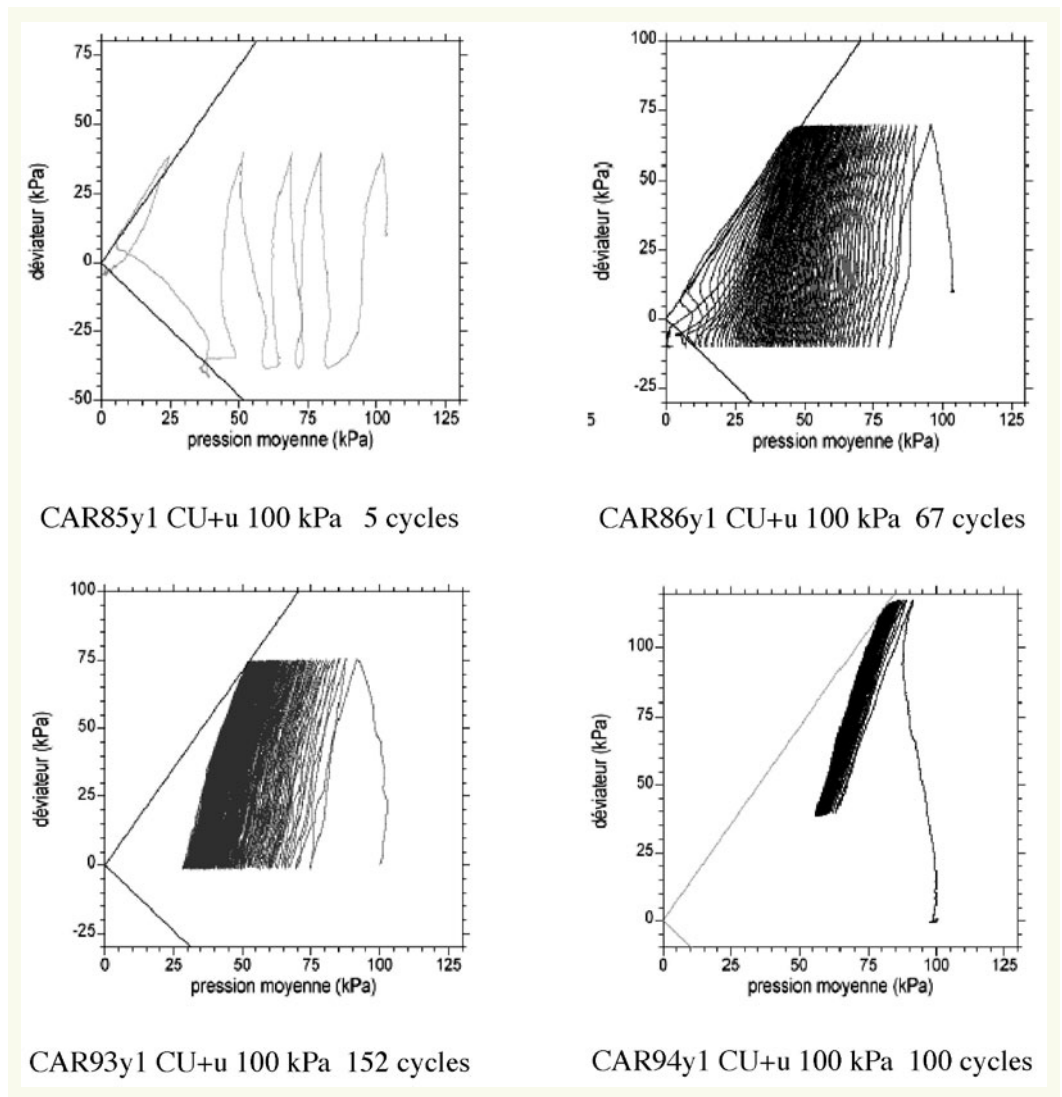
Le **tableau 3** donne les caractéristiques des chargements cycliques pendant quatre essais cycliques CU de la série 2.  $N$  est le nombre de cycles et  $N_{2,5\%}$  le nombre de cycles pour atteindre le critère  $\varepsilon_{\text{ay SA}} = 2,5\%$ . La **figure 2** montre les chemins de contraintes effectives  $(p, q)$  suivis pendant ces essais, qui sont respectivement strictement alterné, alterné en compression ou ondulés, pour la même amplitude  $\Delta q_y$ . Le critère est atteint en 4 cycles pendant l'essai CAR85 qui est strictement alterné.

**tableau 3**  
Caractéristiques des cycles pour quatre éprouvettes de la série 2 ( $p_c = 100$  kPa ;  $\Delta q_y / 2 p_c \approx 0,20$ ).

Éprouvette	$q_{\text{moy}}$ (kPa)	$\Delta q_y$ (kPa)	N	$N_{2,5\%}$	$q_{\text{moy}}/2p_c$
CAR85	1	39	5	4	0,005
CAR86	29	39	67	6	0,145
CAR93	37	38	152	< 152	0,185
CAR94	78	40	77	77	0,390



**figure 2**  
Essais triaxiaux cycliques CU réalisés à deux vitesses de chargement différentes en mode EV. À gauche, courbes d'évolution de la déformation axiale  $\varepsilon_a$ , du déviateur  $q$  et de la pression interstitielle  $u$  en fonction du temps. À droite, courbes contrainte-déformation ( $\varepsilon_a$ ,  $q$ ) et chemin des contraintes effectives ( $p$ ,  $q$ ).



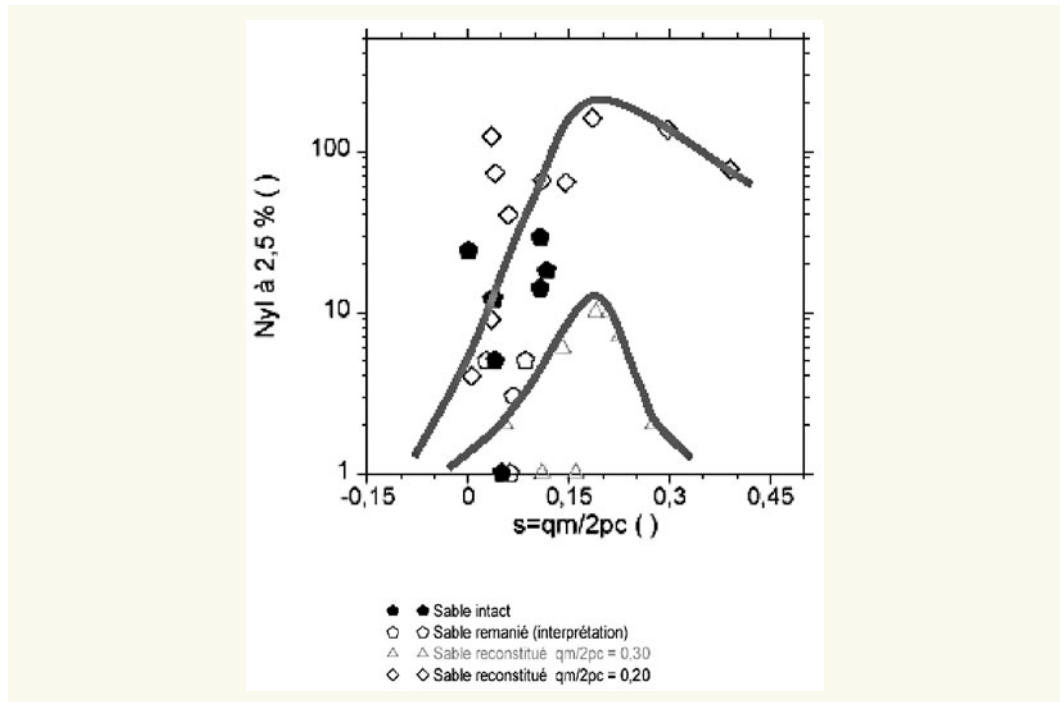
Pendant les essais ondulés, les chemins des contraintes effectives ( $p$ ,  $q$ ) se stabilisent rapidement. Néanmoins, le critère  $\varepsilon_{aySA} = 2,5\%$  est atteint plus rapidement pendant l'essai CAR94 effectué sous la contrainte statique la plus élevée.

Les droites de Coulomb de compression et d'extension représentées dans les plans ( $p$ ,  $q$ ) de la **figure 2** ont été déterminées à l'aide d'essais triaxiaux CU à chargement monotone et des essais cycliques. Leurs pentes valent respectivement  $M_c = 1,42$  et  $M_e = -0,96$ , ce qui correspond à un angle de frottement  $\varphi' = 35$  degrés.

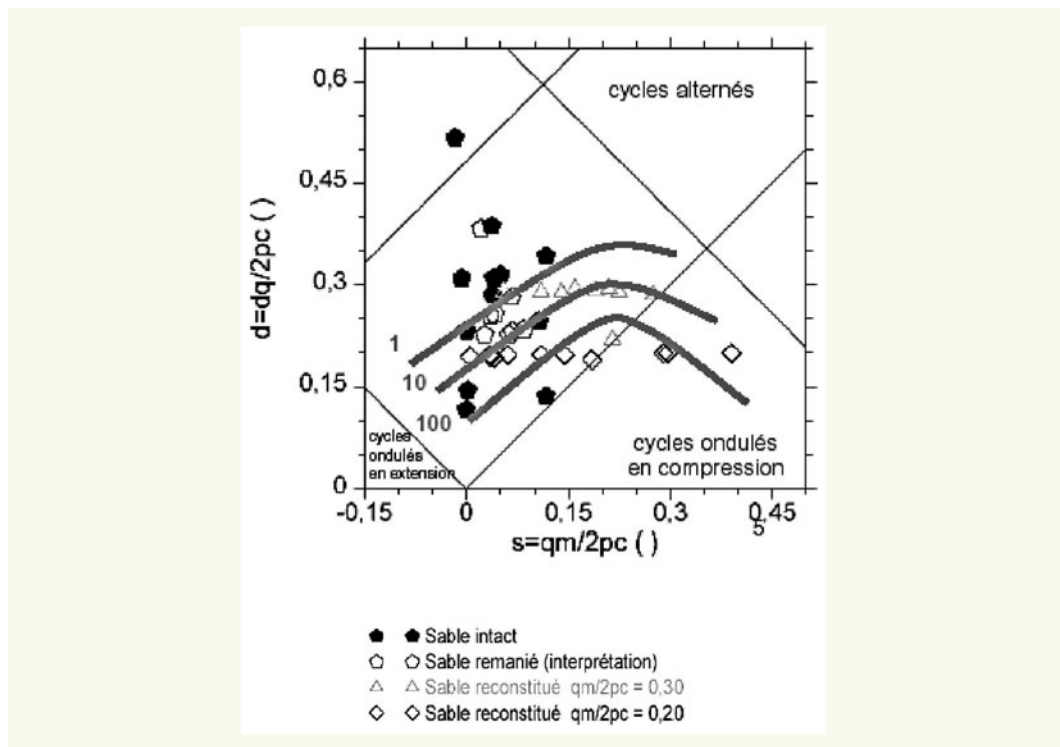
La **figure 3** représente les nombres de cycles pour atteindre le critère  $\varepsilon_{aySA} = 2,5\%$  en fonction du rapport  $q_{moy}/2p_c$  dans les deux séries consacrées au sable reconstitué. Les résultats des essais obtenus sur le sable intact sont reportés aussi. Les courbes indiquées montrent que, avec le sable reconstitué (triangles et losanges), le nombre de cycles est maximal pour un déviateur moyen tel que  $q_{moy}/2p_c = 0,2$  environ.

La **figure 4** représente les résistances cycliques exprimées dans le plan ( $q_{moy}/2p_c$ ,  $\Delta q_y/2p_c$ ) où l'amplitude cyclique  $\Delta q_y$  est représentée en fonction du déviateur moyen  $q_{moy}$  normalisé par  $2p_c$ . Dans ce plan, les deux bissectrices séparent les essais alternés au centre, des essais ondulés en extension à gauche et des essais ondulés en compression à droite. Les figurés distinguent les sables intacts et le sable remanié (série 1 et 2). Pour ce dernier, il est possible de représenter les résistances cycliques obtenues à 1, 10 et 100 cycles et le critère  $\varepsilon_{aySA} = 2,5\%$ . Ces courbes présentent aussi leur maximum vers  $q_{moy}/2p_c \approx 0,2$  environ.

**figure 3**  
 Représentation du nombre de cycles pour atteindre le critère  $\varepsilon_{ay,SA} = 2,5\%$  en fonction du rapport des contraintes statiques.



**figure 4**  
 Représentation de l'amplitude cyclique pour atteindre le critère  $\varepsilon_{ay,SA} = 2,5\%$  en fonction du rapport des contraintes statiques.



Les sables intacts sont plus résistants en moyenne, mais leurs résistances sont dispersées. Ils n'ont pas été testés sous des déviateurs fortement dissymétriques. Ce type de paramétrage n'est donc pas réalisable ici pour ces matériaux.

Deux autres droites de pente -1 et +1 ont été représentée dans le plan  $(q_{moy}/2p_c, \Delta q_y/2p_c)$  de la **figure 4**. Elles représentent la résistance du sable. Partant de l'équation de Coulomb en compression exprimée dans le plan des contraintes effectives  $(p, q)$  sous la forme  $q = M_c p$  (en l'absence de cohésion), puis avec  $q = q_{moy} + \Delta q_y$  et  $p = p_c$  il vient :

$$\Delta q_y / 2p_c = +M_c/2 - q_{moy}/2p_c$$



De même, en extension, avec  $q = q_{\text{moy}} - \Delta q_y$  :

$$\Delta q_y / 2p_c = -M_e/2 + q_{\text{moy}}/2p_c$$

Dans le cas du sable testé ici,  $\phi' = 35$  degrés,  $M_c = 1,42$  et  $M_e = -0,96$ , soit  $M_c/2 = 0,71$  et  $M_e/2 = -0,48$ . Ces droites semblent indiquer un encadrement des courbes  $N_y = 1, 10$  et  $100$  tracées pour le critère à 2,5 %.

Les courbes de la **figure 4**, qui donnent la résistance cyclique en  $N_y$  cycles et en fonction de la dissymétrie du chargement cyclique, sont comparables à celles proposées par Vaid et Chern (1983, 1985), Mohamad et Dobry (1986), Hyodo et al. (1994) ou Hyde et al. (2006) sur des matériaux reconstitués au laboratoire. D'après ces auteurs, les résistances des sables passent par un maximum  $\Delta q_y/2p_c$  pour un niveau statique  $q_{\text{moy}}/2p_c$  qui dépend de la densité du sable.

Les sables lâches sont effondrables et présentent des résistances limitées en compression et en extension, ce qui explique que le maximum  $\Delta q_y/2p_c$  se situe à des niveaux faibles de  $q_{\text{moy}}/2p_c$  situés vers 0,1. Au contraire, les sables denses voient leurs résistances augmenter continûment pour des rapport  $q_{\text{moy}}/2p_c$  qui dépassent 0,2. Dans tous les cas, les résistances en extension sont faibles. Cela explique pourquoi les critères en déformation,  $\epsilon_{\text{aySA}} = 2,5$  % par exemple, sont atteints préférentiellement en extension pendant les essais triaxiaux cycliques strictement alternés.

## CONCLUSION

Trois séries d'essais triaxiaux cycliques ont été présentées dans cette étude. La première concerne un limon argileux testé dans son état naturel sous des vitesses de chargement cycliques différentes. Ces essais montrent que la réponse en pression interstitielle dépend de la vitesse de chargement. La qualité de l'interprétation des essais en contraintes effectives dépend donc du choix de la vitesse. Les fréquences cycliques habituellement mises en œuvre sur les sables propres sont largement à très largement supérieures aux vitesses préconisées dans les procédures triaxiales pour les essais à chargement monotone sur les sols limoneux ou argileux. L'exemple du limon argileux testé ici semble indiquer que ces vitesses sont trop rapides elles aussi pour effectuer les chargements cycliques non drainés. Le choix des vitesses préconisées dans les procédures d'essais triaxiaux à chargement monotone ne semble pas conservatif.

Les deux autres séries d'essais triaxiaux cycliques ont été effectuées sur un sable légèrement limoneux reconstitué. Chaque série est effectuée sous une amplitude cyclique donnée, mais à différents niveaux de contraintes statiques. Les résistances cycliques du sable reconstitué passent par un maximum pour un niveau de cisaillement moyen situé en compression. De ce fait, les résistances en extension sont faibles. Ainsi, les critères de résistance définis en déformation sont atteints préférentiellement en extension pendant les essais triaxiaux cycliques alternés.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR** (Association Française de Normalisation, 1994). Sols : reconnaissances et essais. Essais à l'appareil triaxial de révolution. NF P 94-074, Octobre 1994, 36 p.
- BISHOP A.W., HENKEL D.J.** (1964). The measurement of soil properties in the triaxial test. Edward Arnold Publishers LTD, London, 228 p.
- GIBSON R.E., HENKEL D.J.** (1954). Influence of duration of tests at constant rate of strain on measured drained strength. *Géotechnique*, vol. 4, n° 1, pp. 6-15.
- HYDE A.F.L., HIGUCHI T., YASUHARA K.** (2006). Liquefaction, cyclic mobility and failure of silt. *J. Geotech. and Geoenv. Engrg.*, vol. 132, n° 6, pp. 716-735.
- HYODO M., TANIMIZU H., YASUFUKU N., T. MURATA H.** (1994). Undrained cyclic and monotonic triaxial behaviour of saturated loose sand. *Soils and Foundations*, vol. 34, n° 1, pp. 19-32.
- MOHAMAD R., DOBRY R.** (1986). Undrained monotonic and cyclic triaxial strength of sand. *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, vol. 112, n° 10, pp. 941-958.
- VAID Y.P., CHERN J.C.** (1983). Effect of static shear on resistance to liquefaction. *Soils and Foundations*, vol. 23, n° 1, pp. 47-60. *Soils and Foundations*, vol. 25, n° 3, pp. 154-156.