

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.



INITIATION DE LA LIQUEFACTION DES SABLES SOUS CHARGEMENT MONOTONE ET CYCLIQUE

INITIATION OF SAND LIQUEFACTION UNDER MONOTONIC AND CYCLIC LOADING

J. Canou F. Bahda A. Saïtta J.C. Dupla

CERMES (ENPC/LCPC)
Paris, France

Résumé : A partir de résultats d'essais de liquéfaction statique réalisés sur un sable de référence, on évalue le concept de surface d'effondrement proposé par Sladen et al. (1985). On présente ensuite des résultats d'essais de liquéfaction cyclique réalisés sur le même sable et l'on montre qu'il est possible de définir pour ces essais un seuil d'instabilité dans le plan de contrainte analogue au seuil défini pour le chargement monotone. Cette similarité de comportement observée entre liquéfaction statique et liquéfaction cyclique fournit un élément intéressant quant à une unification possible des deux phénomènes.

INTRODUCTION

Lorsqu'ils sont cisailés en conditions non-drainées, les sables lâches ($I_D < 0,5$ ou $D_R < 50\%$) subissent le phénomène de liquéfaction, caractérisé par une perte brutale et importante de résistance au cisaillement. Sous l'action des forces extérieures appliquées, le matériau s'écoule alors rapidement avec une résistance résiduelle très faible. Dans le cas d'un chargement monotone, le phénomène est qualifié de liquéfaction statique, et a déjà été à l'origine de glissements et d'écoulements parfois de grande envergure. En 1969, Castro met déjà clairement en évidence l'influence de l'indice des vides du sable et du type de sable sur l'apparition et le développement de la liquéfaction statique. Différents aspects du phénomène tels que l'influence de l'anisotropie de consolidation (existence d'un déviateur initial), les caractéristiques de l'état résiduel, les conditions d'initiation du phénomène, ont été depuis étudiées par différents auteurs (avec entre autres Vaid and Chern, 1985; Schlosser, 1985; Canou, 1987; Kramer and Seed, 1988; Canou et al., 1991; Konrad et al., 1991). Dans le cas d'un chargement cyclique, le phénomène est qualifié de liquéfaction cyclique, mais ne doit pas être confondu avec le phénomène de mobilité cyclique ("cyclic mobility"), plus classiquement connu, pouvant se développer dans des sables mêmes denses, et ayant fait l'objet de nombreux travaux, avec en particulier les recherches menées par l'équipe de Seed aux Etats-Unis. En 1985, Sladen et al. présentent une méthode d'analyse intéressante des caractéristiques de liquéfaction statique d'un sable, basée sur le concept de surface d'effondrement, permettant en particulier de prévoir, dans l'espace des contraintes, le lieu des points d'initiation du phénomène de liquéfaction.

L'objectif de la présente communication est d'évaluer le concept de surface d'effondrement sur une série d'essais de liquéfaction statique réalisés sur un sable de référence, et d'évaluer l'applicabilité de ce concept dans le cas d'essais de liquéfaction cyclique.

EQUIPEMENT ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Le dispositif expérimental se compose, pour ce qui est des essais de chargement monotone, d'une presse mécanique classique à vitesse contrôlée, équipée d'une cellule triaxiale permettant de reconstituer des éprouvettes de sable de 70 mm de diamètre et d'éclatement 2, sans antifretage. Dans le cas cyclique, une cellule triaxiale spéciale est utilisée, permettant, grâce à un système d'asservissement pneumatique, l'application de chargements de caractéristiques définies au préalable (forme du signal, amplitude, fréquence, etc.). Dans les deux cas, les mesures sont réalisées grâce à des capteurs

électriques (force, pression, déplacement), l'acquisition, le stockage et le traitement des données étant réalisés sur micro-ordinateur.

A part pour certains détails spécifiques aux essais de chargement cyclique, la procédure générale de fabrication, saturation et consolidation des éprouvettes est similaire pour les essais monotones et cycliques. Cette procédure est basée sur les techniques classiques utilisées pour la réalisation d'essais triaxiaux sur sable, le point le plus délicat concernant la fabrication d'éprouvettes suffisamment lâches pour se liquéfier. Le matériau est mis en place humide à une teneur en eau très faible (environ 2%) permettant de créer une cohésion d'origine capillaire entre les grains. Il est ensuite compacté par couches dans le moule avec une légère scarification entre chaque couche. Des degrés de saturation convenables (coefficient de Skempton $B \geq 97\%$) sont ensuite obtenus par application de contrepressions de 200 ou 300 kPa.

DESCRIPTION DU SABLE UTILISE

Le sable utilisé dans cette étude est le sable d'Hostun RF. Il s'agit d'un sable de carrière essentiellement siliceux ($D_{50} = 0,38$ mm, $e_{\min} = 0,656$, $e_{\max} = 1$) formé de grains relativement anguleux, et à granulométrie relativement uniforme ($C_U = 2$). Ce sable est un sable de référence utilisé en France par différents laboratoires, et décrit par Flavigny et al. (1990).

RESULTATS D'ESSAIS TYPIQUES

La figure 1 montre le résultat d'un essai de liquéfaction statique typique réalisé sur le sable RF pour un indice de densité I_D de 0,26 (ou densité relative D_R de 26%) et une contrainte de consolidation isotrope de 200 kPa. Le phénomène de liquéfaction est caractérisé par un pic marqué de résistance au cisaillement de faible niveau ($q_{pic} = 80$ kPa), obtenu pour des déformations relativement faibles ($\epsilon_a = 1\%$ sur la figure), suivi par une chute très rapide de résistance (radoucissement du matériau) jusqu'à l'apparition d'un état résiduel stabilisé en grandes déformations ($\epsilon_a > 7\%$) pour lequel le matériau continue à se déformer sans évolution ultérieure notable de l'état de contrainte. Cet état particulier du sol a été qualifié d'état "stable" ("steady state") par Castro et son équipe (Poulos, 1981), et il est assimilable, dans le cas des sables, à l'état critique, plus classiquement connu. En ce qui concerne la pression interstitielle mesurée pendant le cisaillement, celle-ci présente un taux de génération initial très élevé, rendant compte du caractère très contractant du sable. Ce taux de génération diminue ensuite progressivement jusqu'à

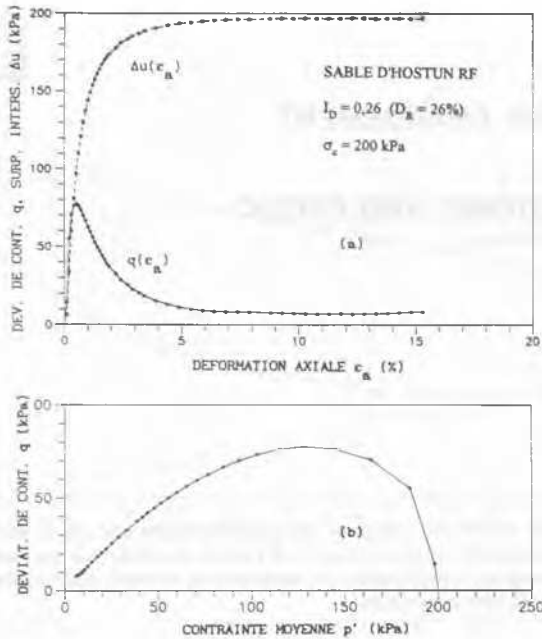


Figure 1 Résultat typique de liquéfaction statique sur le sable RF : (a) courbes (q, ϵ_a) et $(\Delta u, \epsilon_a)$; (b) chemin de contrainte dans le plan (q, p') .

stabilisation complète lorsque l'état stable est atteint. Le niveau de surpression interstitielle résiduel est très élevé, rendant compte de contraintes effectives très faibles régnant dans l'éprouvette à l'état stable.

Le comportement mécanique d'un sable de manière générale, et le phénomène de liquéfaction en particulier, dépendent fortement de l'état initial du matériau défini par son indice des vides (ou sa densité) initial et la contrainte de consolidation isotrope à laquelle il est soumis.

En ce qui concerne l'influence de la contrainte de consolidation isotrope σ_c , la figure 2 montre les résultats de quatre essais réalisés à des contraintes de consolidation de 50, 100, 200 et 400 kPa et un indice de densité d'environ 0,10 ($D_R = 10\%$). On remarque que le pic de résistance obtenu est quasiment proportionnel à la contrainte de consolidation appliquée, avec un coefficient de proportionnalité d'environ 0,4.

En ce qui concerne les états résiduels du matériau (état stable), les théories d'état critique prévoient que ceux-ci ne dépendent que de l'indice des vides initial du sable. Pour un indice des vides rigoureusement constant, on devrait donc obtenir une résistance résiduelle unique pour les quatre essais présentés, ce qui n'est pas rigoureusement le cas (figure 2). L'expérience acquise dans le domaine a montré que les différences observées à l'état résiduel résultaient en majeure partie des densités des éprouvettes qui ne sont pas rigoureusement égales pour les différents essais. Il est en effet très difficile de prévoir de manière précise l'indice des vides réel qui résultera des opérations de mise en place, saturation et consolidation de l'éprouvette.

APPLICATION DU CONCEPT DE SURFACE D'EFFONDREMENT AUX ESSAIS DE LIQUEFACTION STATIQUE

Le concept de surface d'effondrement, introduit par Sladen et al. (1985) permet de prévoir le lieu des points dans l'espace (q, p', e) ou (t, s', e) où l'effondrement du matériau va être initié (lieu des pics de résistance). Ce concept est basé sur les observations expérimentales suivantes, faites par les auteurs: si différentes éprouvettes de sable lâche ayant le même indice des vides initial après consolidation e_1 , sont cisailées en conditions non-drainées à partir de différents niveaux de consolidation isotrope, les points représentant les maxima des chemins de contrainte pour les différents essais sont alignés, et la droite D_1 qui les joint passe par le point d'état stable (ou critique) commun aux différents essais (figure 3). Pour une autre série d'essais réalisée à partir d'un autre indice des vides de consolidation e_2 , une nouvelle droite D_2 serait obtenue, passant par le point d'état stable correspondant à e_2 , et

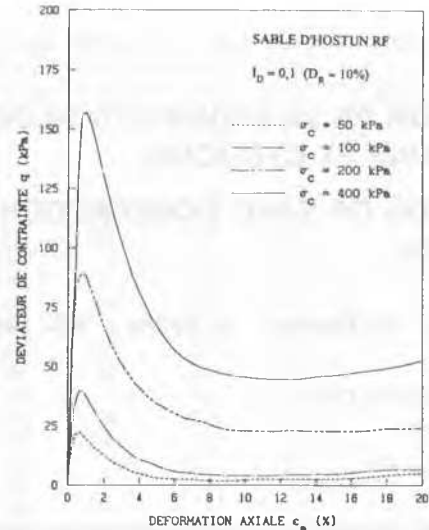


Figure 2 Influence de la contrainte de consolidation isotrope σ_c sur la liquéfaction statique du sable d'Hostun RF.

parallèle à D_1 . Lorsque l'indice des vides initial du sable varie, l'ensemble des droites d'effondrement correspondantes vont donc décrire, dans l'espace (q, p', e) ou (t, s', e) une surface cylindrique, s'appuyant sur la droite d'état stable (ou critique) et appelée par les auteurs surface d'effondrement. Cette surface représente donc le lieu des états du matériau pour lequel le mécanisme d'effondrement (chute rapide de résistance) va être initié. La pente (raisonnablement constante) des droites d'effondrement dans le plan (t, s') est appelée α_L , leur ordonnée à l'origine étant appelée a_L . A partir de ces caractéristiques, il est alors possible de définir, de manière analogue aux caractéristiques de rupture de Mohr-Coulomb ϕ' et c' , deux paramètres d'effondrement ϕ_L et c_L tels que $\sin \phi_L = \tan \alpha_L$ et $c_L = a_L / \cos \phi_L$ (Sladen et al., 1985). Ces mêmes auteurs présentent une plage de variation de ϕ_L relativement étroite pour différents type de sables (14 à 18°).

Comme mentionné ci-dessus, l'intérêt du concept de surface d'effondrement est qu'il peut permettre de prévoir, une fois que les paramètres de la surface ont été déterminés, l'état de contraintes effectives dans le plan (q, p') ou (t, s') pour lequel l'instabilité va être initiée. Un autre intérêt est qu'il va permettre de définir une zone d'états initiaux du matériau potentiellement stables (au-dessous de la surface d'effondrement) pour lesquels la contrainte de consolidation est proche d'un état isotrope, et une zone d'états initiaux fortement instables, situés au-dessus de cette surface, et pour lesquels un supplément de chargement même très faible appliqué en conditions non-drainées va pouvoir initier le mécanisme d'instabilité.

Le concept de surface d'effondrement étant encore relativement récent et étant donné l'intérêt d'un tel concept, il est intéressant d'en évaluer la validité sur des résultats expérimentaux. Nous avons donc appliqué ce concept sur

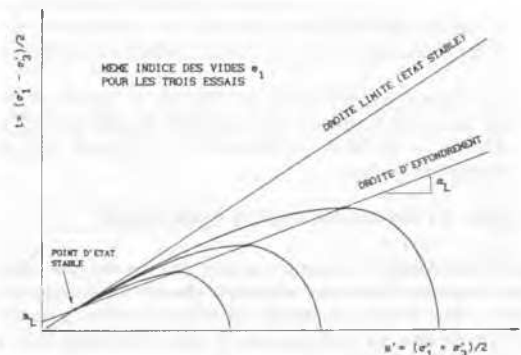


Figure 3 Définition schématique de la droite d'effondrement dans le plan (t, s') (d'après Sladen et al., 1985).

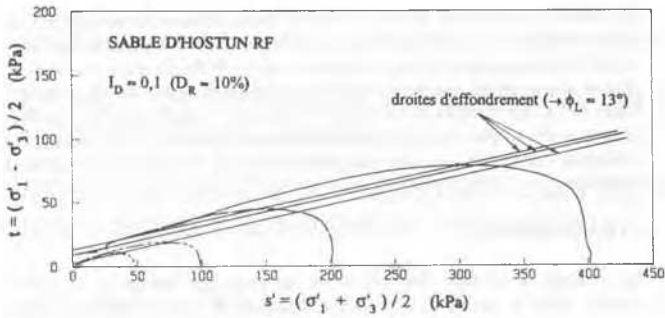


Figure 4 Droites d'effondrement obtenues pour une série d'essais sur le sable d'Hostun RF.

l'ensemble des résultats d'essais réalisés dans le cadre du programme expérimental sur l'étude du phénomène de liquéfaction statique pour le sable d'Hostun RF. La figure 4 montre par exemple les chemins de contrainte dans le plan (t, s') obtenus pour une série d'essais de liquéfaction statique réalisés à différentes contraintes de consolidation. Les droites d'effondrement ont été représentées pour chaque essai, et sont définies par le sommet du chemin de contrainte et l'état stable (ou état critique) correspondant. On constate que, pour les essais considérés, ϕ_L est raisonnablement constant, avec une valeur d'environ 13° . La valeur moyenne obtenue pour ϕ_L à partir d'un programme expérimental relativement important réalisé sur le sable d'Hostun RF, est de 14° , ce qui correspond bien à la plage de variation proposée par Sladen et al., (1985).

L'application du concept de droite d'effondrement au sable d'Hostun RF tend donc à confirmer l'intérêt de ce concept pour l'étude du comportement non-drainé des sables lâches et très lâches caractérisé par le phénomène de liquéfaction statique.

LIQUEFACTION CYCLIQUE DU SABLE D'HOSTUN RF

Un programme d'essais de chargement cyclique non-drainé a été réalisé sur le sable d'Hostun RF pour des conditions initiales similaires à celles utilisées pour les essais de chargement monotone (même mode de préparation dans les deux cas). L'état de consolidation des éprouvettes est caractérisé par le rapport $K_c = (\sigma_c + q_c) / \sigma_c$, σ_c étant la partie isotrope de la contrainte de consolidation, q_c représentant un éventuel déviateur initial de consolidation. La forme du signal de chargement est sinusoïdale, les fréquences utilisées étant relativement faibles (correspondant à des périodes de 30 ou 60 secondes). On est donc dans le domaine des chargements quasi-statiques (pas d'effets dynamiques) pour lesquels l'influence de la fréquence du chargement est négligeable (viscosité du matériau négligeable). L'amplitude du chargement est caractérisée par le rapport de contrainte cyclique $R_{cyc} = \Delta q_{cyc} / 2\sigma_c$. Le chargement cyclique est uniquement de compression, correspondant à des valeurs positives ou nulles de Δq_{cyc} ($\Delta q_{cyc} \geq 0$, pas de phases d' "extension" appliquées).

La figure 5 montre un résultat typique de liquéfaction cyclique réalisé sur une éprouvette consolidée sous 400 kPa isotrope. On remarque l'accumulation progressive de la surpression interstitielle au sein de l'éprouvette, sans accumulation de déformations excessives, jusqu'à un niveau pour lequel l'éprouvette s'effondre brusquement avec arrêt de l'essai. Il est intéressant de noter que le phénomène observé au cycle "critique", N_{crit} (cycle n° 89 dans ce cas), est très similaire au phénomène de liquéfaction statique, avec une perte brutale de résistance jusqu'à ce qu'un état résiduel (état stable ou critique) soit atteint en grandes déformations.

Un programme expérimental a donc été entrepris pour mettre en évidence l'influence des paramètres densité, niveau de consolidation isotrope σ_c , rapport de consolidation K_c et amplitude du chargement R_{cyc} sur le développement du phénomène de liquéfaction. Jusqu'à maintenant, les essais réalisés ont essentiellement permis de mettre en évidence l'influence du rapport R_{cyc} sur l'apparition et le développement du phénomène. On a pour cela fixé une densité d'étude ($I_D = 0,3$) ainsi qu'un niveau de consolidation isotrope ($\sigma_c = 200$ kPa). Les essais sont ensuite réalisés à différents niveaux de R_{cyc} (Bahda, 1992). Le tableau 1 présente les caractéristiques des

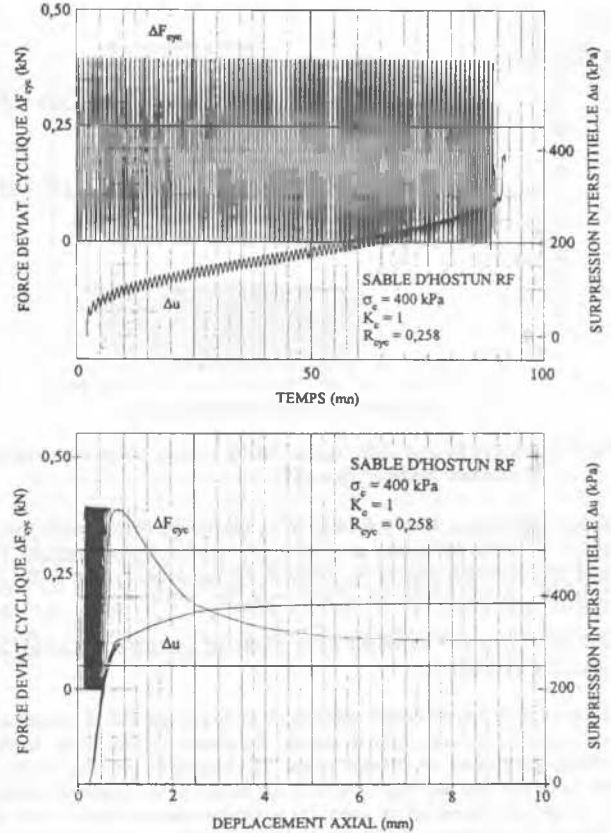


Figure 5 Résultat typique de liquéfaction cyclique réalisé à l'appareil triaxial sur le sable RF : (a) $\Delta F_{cyc}(t)$ et $\Delta u(t)$; (b) ΔF_{cyc} et Δu fonction du déplacement axial.

différents essais réalisés. Quatre valeurs de R_{cyc} ont été utilisées, de 0,05 à 0,125. La figure 6 montre le chemin de contrainte dans le plan (q, p') obtenu pour l'essai CYC1. On constate que le point représentatif de l'état du matériau migre régulièrement vers la gauche, rendant compte de l'augmentation progressive de la surpression interstitielle. Le taux d'augmentation de la surpression interstitielle s'atténue avec le nombre de cycles jusqu'à l'approche du cycle critique (cycle n° N_{crit}) où le taux de génération de la surpression interstitielle augmente à nouveau (5 à 10 cycles avant la rupture). L'effondrement observé au cycle critique N_{crit} termine l'essai par perte d'asservissement du dispositif de chargement, l'éprouvette étant complètement écrasée. Conformément à ce qui a été mentionné plus haut, le comportement observé au cycle critique est très similaire au phénomène de liquéfaction statique, ce qui se traduit par une allure du chemin de contrainte pendant ce cycle du type de ceux représentés sur la figure 6. Cette partie du chemin de contraintes est représentée en pointillés car l'effondrement correspondant est très rapide (moins d'une seconde), et le dispositif d'acquisition de données ne peut pas être réglé en conséquence. Seuls le seuil d'initiation de l'effondrement (sommet du chemin de contrainte) et l'état

TEST	CYC1	CYC2	CYC3	CYC4
I_D	0,3	0,3	0,3	0,3
σ_c (kPa)	200	200	200	200
K_c	1	1	1	1
R_{cyc}	0,125	0,1	0,075	0,05
Type	non alt.	non alt.	non alt.	non alt.
N_{crit}	55	128	175	222

Tableau 1 Caractéristiques des essais de liquéfaction cyclique réalisés.

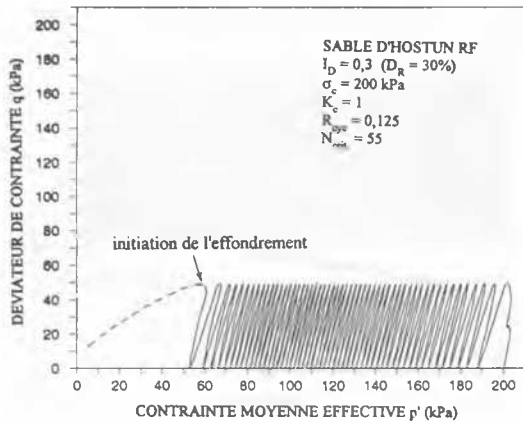


Figure 6 Chemin de contrainte typique dans le plan (q, p') pour un essai de liquéfaction cyclique : essai CYCL.

résiduel sont connus avec précision. Il est intéressant de remarquer que le nombre de cycles nécessaire pour provoquer l'effondrement augmente très rapidement lorsque le rapport R_{cyc} diminue. On passe d'une valeur de N_{crit} de 55 pour $R_{cyc} = 0,125$ à une valeur de 222 pour $R_{cyc} = 0,05$.

APPLICATION DU CONCEPT DE SURFACE D'EFFONDREMENT AU CAS CYCLIQUE

La similarité de comportement observée au cycle critique avec le phénomène de liquéfaction statique incite à essayer d'appliquer le concept de surface d'effondrement défini en statique au cas du chargement cyclique. L'idée en effet est de chercher une relation entre le lieu des points d'effondrement obtenu en chargement monotone et celui (si il existe) obtenu dans le cas des chargements cycliques.

On a donc représenté sur la figure 7 le lieu des points d'effondrement obtenus pour 5 essais de chargement cyclique, ainsi que l'état résiduel correspondant. Cet état résiduel (état stable ou critique) est unique pour les cinq essais puisque l'état initial des éprouvettes est le même. On peut donc tenter de tracer une droite qui pourrait s'apparenter à une droite d'effondrement pour le cas cyclique. On constate en effet que les seuils d'effondrement pour les différents essais s'alignent raisonnablement bien avec l'état résiduel correspondant. Ceci tendrait donc à confirmer l'idée d'un seuil d'effondrement pour le cas des chargements cycliques, analogue au concept de droite d'effondrement en chargement monotone. La comparaison avec la droite d'effondrement obtenue pour des essais de liquéfaction statique réalisés avec des conditions initiales analogues montre que, pour la plage de rapports R_{cyc} testés, les deux seuils d'instabilité sont très voisins (figure 7). Dans le cas cyclique seulement, les seuils d'effondrement sont légèrement décalés vers la gauche par rapport au cas monotone, ce qui se traduit par une droite d'effondrement en cyclique

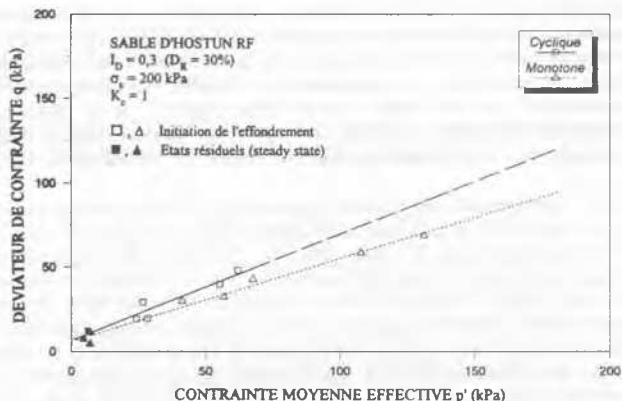


Figure 7 Définition d'une droite d'effondrement pour les essais de liquéfaction cyclique.

légèrement au-dessus de la droite d'effondrement obtenue en monotone. Cette légère différence, qui nécessite cependant d'être confirmée, pourrait être due à un effet d'érouissage cyclique qui tend à retarder l'effondrement par rapport à l'érouissage produit par le cisaillement monotone. Il reste bien sûr à tester le sable RF à des niveaux de déviateur cyclique q_{cyc} supérieurs pour pouvoir compléter le lieu des seuils d'effondrement dans le plan (q, p') , (cf. figure 7) et confirmer cette analogie entre comportement sous chargement monotone et cyclique.

CONCLUSIONS

Le concept de surface d'effondrement, proposé par Sladen et al. (1985) permet, dans le cas de la liquéfaction statique, de prévoir avec une bonne précision le lieu des points où le phénomène de liquéfaction est initié, et permet donc de définir un seuil de stabilité. Dans le cas de la liquéfaction cyclique, on constate une forte similarité entre le phénomène d'effondrement observé au cycle critique et le phénomène de liquéfaction statique. L'application du concept de surface d'effondrement au cas cyclique montre qu'il serait possible, de manière analogue au cas monotone, de définir un seuil d'effondrement du matériau, et que ce seuil serait en fait très proche du seuil défini pour le chargement monotone. Ce résultat nécessite encore, pour être confirmé, la réalisation d'un programme d'essais complémentaire de liquéfaction cyclique, visant à compléter l'étude paramétrique entreprise en étudiant en particulier l'influence du niveau de consolidation isotrope appliqué et de l'indice des vides (ou densité) du sol sur le comportement observé.

L'existence d'un seuil d'instabilité, valable sous chargement monotone et cyclique serait intéressante, dans une perspective d'unification des deux phénomènes (liquéfaction statique et cyclique). Un tel seuil, pouvant être déterminé à partir d'essais monotones uniquement, pourrait ensuite permettre de se faire une idée relativement précise du comportement prévisible sous chargement cyclique, en donnant en particulier le moyen d'estimer de manière simple le niveau de surpression interstitielle nécessaire pour initier l'effondrement du matériau sous chargement cyclique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le ministère de la recherche français ainsi que la structure de recherche française "GRECO Géomatériaux" dans le cadre de laquelle ces travaux sont réalisés, pour leur soutien scientifique et financier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bahda, F. (1992). Etude des conditions d'initiation de la liquéfaction d'un sable sous chargement cyclique, *Mémoire de DEA, ENPC*, 125p.
- Canou, J. (1987). Etude expérimentale de la liquéfaction statique des sables lâches, *Rapport de recherche ENPC-CERMES, n°278*, 238p.
- Canou, J., Thorel, L. et De Laure, E. (1991). Influence d'un déviateur de contrainte initial sur les caractéristiques de liquéfaction statique d'un sable, *Proc. 10th ECSMFE, Firenze, Vol. 1*, pp.49-52.
- Castro, G. (1969). Liquefaction of sands, *Ph.D. Dissertation, Harvard Univers., Cambridge*, 112p.
- Flavigny, E., Desrues, J. et Palayer, B. (1990). Note technique: le sable d'Hostun "RF", *Revue française de Géotechnique, n°53*, pp. 67-70.
- Konrad, J.M., Flavigny, E. et Meghachou, M. (1991). Comportement non-drainé du sable d'Hostun lâche, *Revue Française de Géotechnique, n°54*, pp. 53-63.
- Kramer, S.L. and Seed, H.B. (1988). Initiation of soil liquefaction under static loading conditions, *Journ. of Geotech. Eng. Divis., ASCE, Vol. 114, n°4*, pp. 412-431.
- Poulos, S. (1981). The steady state of deformation, *Journ. of Geotech. Eng. Divis., ASCE, Vol. 107, n°GT5*, pp. 553-562.
- Schlosser, F. (1985). Liquéfaction de veines de sable lâche dans des talus sous-marins, *Proc. 11th ICSMFE, San Francisco*.
- Sladen, J.A., d'Hollander, R.D. and Krahn, J. (1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach, *Can. Geot. Journ., Vol 22*, pp. 579-588.
- Vaid, Y.P. and Chern, J.V. (1985). Cyclic and monotonic undrained response of saturated sands, *Proc. ASCE convention on "Advances in the art of testing soils under cyclic loading"*, pp. 120-147.