

DETERMINATION EXPERIMENTALE DU FACTEUR K_σ D'UN SABLE, POUR LES ETUDES DE LIQUEFACTION.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE K_σ CORRECTION FACTOR OF A SAND FOR LIQUEFACTION ANALYSES

Emmanuel JAVELAUD¹, Julien DUFOUR¹, Sandrine COMBA¹

¹ EDF DI-TEGG, Aix-en-Provence, France

RÉSUMÉ – La résistance cyclique d'un sol à la liquéfaction augmente de façon quasi-proportionnelle avec la pression de confinement. L'écart avec une évolution parfaitement proportionnelle est pris en compte via le coefficient K_σ lors de l'application de la méthode simplifiée de Seed. Cet article présente l'évaluation du coefficient K_σ d'un sable à partir d'essais cycliques à l'appareil triaxial et la compare aux relations proposées dans la littérature (Youd *et al.*, 2001 ; Idriss & Boulanger, 2008). Les essais réalisés sur ce sable montrent un conservatisme des relations usuelles lorsque la pression de confinement est de 50 kPa, et une bonne correspondance avec la relation d'Idriss et Boulanger (2008) lorsque la pression de confinement est de 200 kPa.

ABSTRACT – The cyclic loading resistance of a soil increases almost proportionally with increasing confinement but they are some discrepancies that are taken into account in the Seed's simplified method by introducing the overburden factor K_σ. In this paper, we evaluate the K_σ factor of a sand based on cyclic triaxial laboratory tests and compare the results to the design relationships given by Youd *et al.* (2001) and Idriss & Boulanger (2008). The results show the conservatism of two the design relationships when the effective overburden stress is of 50 kPa, and a good correspondence with Idriss & Boulanger (2008) value at 200 kPa.

1. Introduction

Les essais cycliques de liquéfaction réalisés au laboratoire montrent que la résistance cyclique des sols augmente quasi-linéairement avec la pression de confinement (Harder and Boulanger, 1997 ; Montgomery *et al.*, 2014). C'est cette quasi-proportionnalité par rapport à la contrainte de confinement qui permet de normaliser la résistance à la liquéfaction des sols par la contrainte verticale effective σ'_v et de présenter, sous la forme d'un diagramme unique indépendant de la profondeur, le rapport de résistance cyclique $CRR_{M=7,5}$ en fonction des résistances du sol normalisées (N_1)_{60-cs} ou q_{c1N-cs} par exemple.

L'écart par rapport à une évolution parfaitement proportionnelle de la résistance cyclique des sols en fonction de la pression de confinement traduit toutefois un comportement non-linéaire du sol. Ce dernier est pris en compte lors de la mise en œuvre de la méthode simplifiée pour les études de liquéfaction par l'intermédiaire du facteur K_σ qui s'écrit :

$$K_{\sigma} = \frac{CRR_{M,\sigma'_v}}{CRR_{M,\sigma'_v=100kPa}} \quad (1)$$

Pour la prise en compte forfaitaire du facteur K_σ dans les études de liquéfaction fondées sur les essais *in situ*, l'état de l'art actuel de la méthode (Youd *et al.*, 2001) propose une

formulation sous la forme d'une loi de puissance du rapport (σ'_v / Pa) qui dépend de l'indice de densité I_D (ou densité relative) du sol. Ici σ'_v est la contrainte verticale effective à la profondeur z et Pa la pression atmosphérique (environ 100 kPa). D'autres analyses ont abouti à une formulation plus conservative (Idriss & Boulanger, 2008) :

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{Pa}\right) \leq 1,1 \quad (2)$$

$$\text{avec } C_\sigma = \frac{1}{18,9 - 17,3 I_D} \leq 0,3$$

Cet article présente une évaluation particulière du facteur K_σ réalisée pour un sable. Il présente les résultats expérimentaux obtenus, et discute de l'application des relations proposées dans la littérature pour le cas particulier de ce sable.

2. Méthode expérimentale et matériaux

Des essais triaxiaux cycliques de résistance à la liquéfaction ont été réalisés sur le banc triaxial cyclique DYN-TTS du laboratoire d'EDF-DI-TEGG. Ce paragraphe présente le type de matériau testé et la méthode expérimentale retenue pour cette étude.

2.1. Matériau testé

Le matériau testé est un sable fin à moyen présentant une distribution granulométrique resserrée. Il a été prélevé par sondage carotté. Des essais d'identification ont été menés afin de déterminer ses caractéristiques physiques. Le tableau 1 synthétise les résultats obtenus en termes d'analyse granulométrique (D_{max} , passant à d_{10} , d_{50} et coefficient d'uniformité C_u) et d'indice des vides minimaux et maximaux.

Tableau 1. Propriétés physiques des matériaux testés.

Analyse granulométrique (NF EN ISO 17892-4)				Indice des vides minimum / maximum (JGS 0161-2009)	
D_{max} (mm)	d_{50} (mm)	d_{10} (mm)	C_u	e_{min}	e_{max}
2 mm	0,18 à 0,26	0,12 à 0,17	1,56 à 2,15	0,59	1,00

2.2. Protocole expérimental

Les éprouvettes de sable utilisées pour cette étude sont toutes reconstituées en respectant les caractéristiques données dans le tableau 2.

Tableau 2. Paramètres de confection des éprouvettes.

Méthode de confection	Diamètre Φ (mm)	Elancement	Indice de densité I_D après consolidation (%)
Versement à sec et maintien par dépression	50	2	40

Une attention particulière est portée à l'application d'un même mode opératoire lors de la préparation de toutes les éprouvettes, en particulier en termes de confection, saturation et indice de densité après consolidation.

La confection des éprouvettes de sable s'effectue par versement du matériau sec dans un moule à l'aide d'un cône en papier. A l'intérieur du moule est placée une membrane maintenue plaquée par dépression. Au cours du versement, le moule est régulièrement tapoté afin que la quantité de matériau nécessaire à obtenir la densité recherchée puisse y être totalement insérée. Le chapeau de l'échantillon est ensuite placé sur le matériau puis la membrane appliquée tout autour. Une dépression d'environ -20 kPa est alors appliquée à l'intérieur de l'éprouvette assurant sa stabilité pendant la phase de démoulage puis de mise en eau de la cellule triaxiale. Une circulation de CO₂ est appliquée du pied vers la tête de l'échantillon pendant une demi-heure afin de faciliter la saturation de l'éprouvette.

La saturation de l'échantillon est considérée atteinte lorsque le coefficient Skempton B dépasse 0,95 (avec $B = \Delta u/P_c$). La vérification de la valeur du coefficient Skempton B nécessite l'incrément régulier de la pression de confinement P_c par paliers de 50 à 100 kPa tout au long de la phase de saturation.

L'indice de densité (ou densité relative) visé pour toutes les éprouvettes est de 40% après la phase de consolidation (cf. tableau 2) afin de se placer dans des conditions de répétabilité avant la phase proprement dite de liquéfaction de l'échantillon. Cela nécessite donc de viser un état de densité relative légèrement inférieur à 40% au moment de la confection (cf. tableau 3) des éprouvettes.

La consolidation est réalisée lorsque l'éprouvette est considérée comme saturée. Pour cette étude, différentes pressions de consolidation effectives σ_3 ont été appliquées à chaque série d'essais (cf. tableau 4). La stabilisation du volume d'eau expulsé par les éprouvettes lors de l'application de la pression de consolidation indique la fin de l'étape de consolidation.

Les chargements cycliques imposés aux éprouvettes au cours de la phase de liquéfaction sont obtenus par un pilotage en contrainte du banc triaxial via un capteur de force de 4kN positionné en tête d'échantillon. Ce pilotage en contrainte permet l'application sur l'éprouvette de cycles de chargement/déchargement en conditions non drainées dont l'amplitude Δq dépend du taux de cisaillement cyclique CSR (Cyclic Stress Ratio) recherché suivant la relation suivante :

$$CSR = \frac{\Delta q}{2.\sigma'_v} = \frac{\Delta q}{2.\sigma_3} \quad \text{où } \sigma'_v = \sigma_3 \quad (3)$$

2.3. Résultats expérimentaux

Trois séries d'éprouvettes sont testées à une pression de consolidation effective σ_3 fixe par série. Pour chaque série d'essai comprenant trois éprouvettes, trois rapports de cisaillement CSR donc trois déviateurs de cisaillement cycliques Δq différents sont appliqués aux échantillons. Le détail des pressions de consolidation et des rapports de cisaillements appliqués est présenté dans le tableau 3.

Le résultat d'un essai de résistance à la liquéfaction s'exprime par le nombre de cycles de chargement/déchargement N_y appliqués à l'éprouvette jusqu'à l'atteinte de l'un des 2 critères suivants :

- -2,5% de déformation axiale ε de l'éprouvette en extension ;
- Un taux de pression interstitielle $R_u \approx 1$; avec $R_u = \Delta u / \sigma_3$, où u est la pression interstitielle mesurée.

Un exemple de résultat d'essai est présenté à la figure 1.

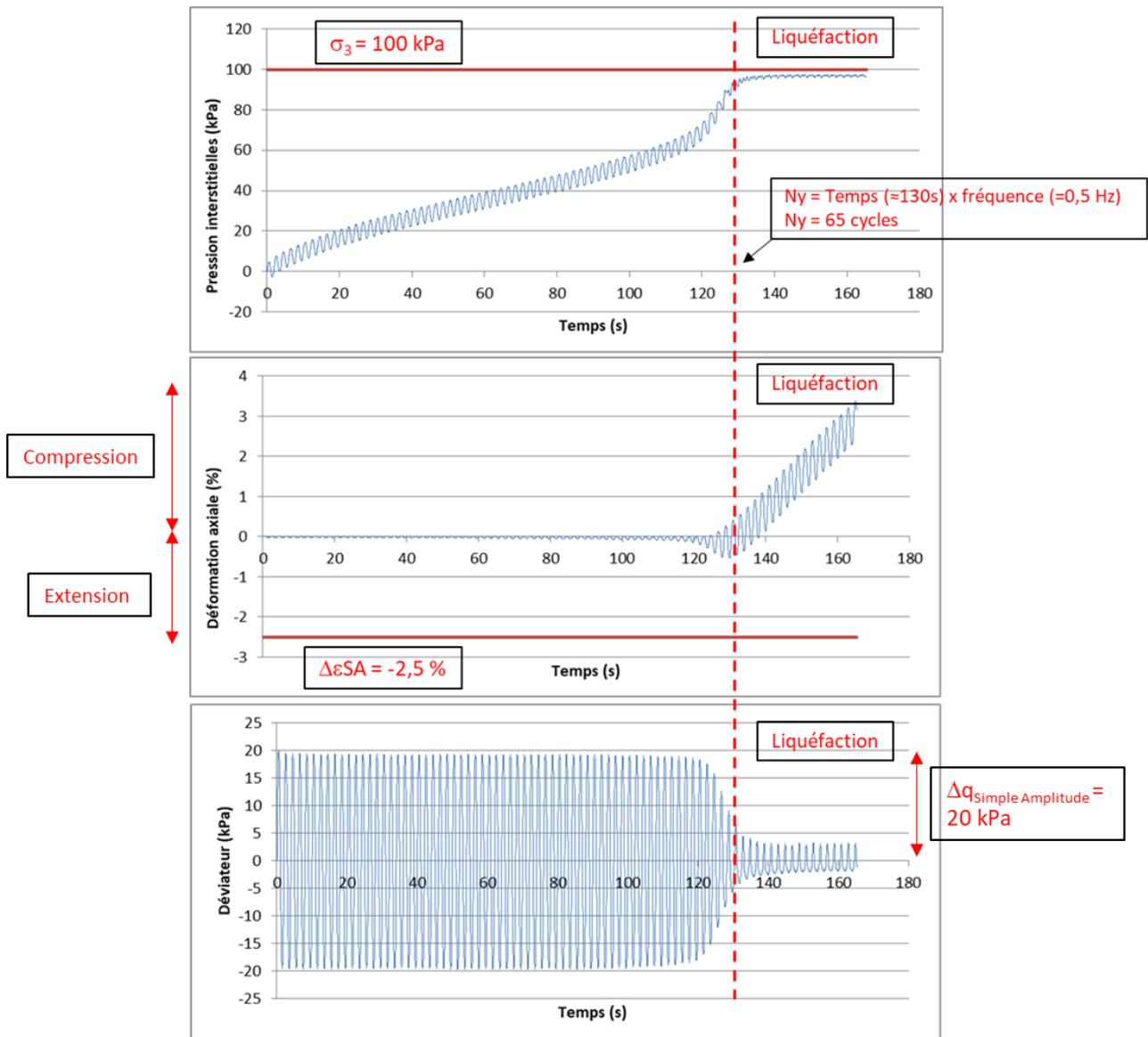


Figure 1. Essai triaxial cyclique piloté en contraintes.

Dans cet exemple, la pression de consolidation σ_3 est de 100 kPa, le taux de cisaillement est de $\Delta q_{SA} / 2\sigma_3 = 0,10$ et la fréquence est de 0,5 Hz. Le critère R_u est atteint en 65 cycles.

Les résultats expérimentaux des neuf essais sont synthétisés dans le tableau 3.

Tableau 3. Synthèse des résultats expérimentaux.

Indice de densité avant consolidation I_D (%)	Indice de densité après consolidation I_D (%)	Pression de consolidation (kPa)	Fréquence (Hz)	CSR appliqué	Nombre de cycles N_y pour obtenir la liquéfaction
42	45	50	0,5	0,10	170
38	38			0,15	20
38	40			0,20	6
38	38	100	0,5	0,10	65
38	38			0,15	7
38	40			0,20	2
37	39	200	0,5	0,10	57
38	40			0,125	14
37	41			0,15	5

La figure 2 présente de façon synthétique les résistances cycliques en fonction du nombre de cycles N_y obtenues pour chaque série d'essais réalisés aux contraintes de confinement de 50 kPa, 100 kPa et 200 kPa.

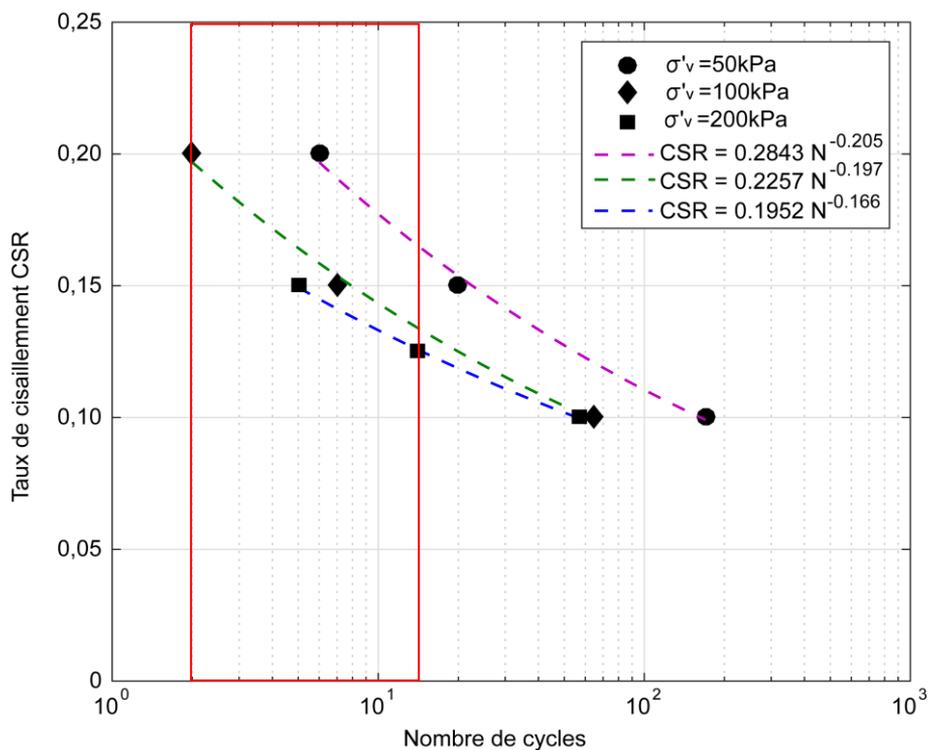


Figure 2. Résistances cycliques en fonction du nombre de cycles N_y obtenues pour chaque série d'essais réalisés aux contraintes de confinement de 50 kPa, 100 kPa et 200 kPa.

3. Analyse des résultats et discussion

La courbe de décroissance du taux de cisaillement cyclique CSR en fonction du nombre de cycles N_y est décrite par une loi de puissance (figure 2) exprimée en fonction de deux paramètres a et b : $a.(N_y)^b$. Pour chaque série d'essais réalisée aux contraintes de confinement de 50 kPa, 100 kPa et 200 kPa, les lois de puissance permettent d'évaluer le taux de cisaillement cyclique CSR quel que soit le nombre de cycles appliqués à l'échantillon puis, par application de l'équation 3, le déviateur cyclique simple amplitude Δq nécessaire pour atteindre au laboratoire la liquéfaction en par exemple 15 cycles. Le tableau 4 récapitule les résultats des essais de liquéfaction réalisés à différentes pressions de consolidation.

Tableau 4. Taux de cisaillement cyclique et déviateur cyclique simple amplitude nécessaire pour atteindre au laboratoire la liquéfaction en 15 cycles.

	CSR recalculé à 15 cycles	Δq (kPa)=2.CSR. $\sigma'_v 0$
$\sigma'_v = 50\text{kPa}$	0,163	16,3
$\sigma'_v = 100\text{kPa}$	0,132	26,5
$\sigma'_v = 200\text{kPa}$	0,125	49,8

L'évolution du déviateur cyclique Δq en fonction de la contrainte de confinement est présenté sur la figure 3 : les trois points sont globalement alignés sur la droite rouge qui passe par le point dont l'abscisse σ'_v se trouve à 100 kPa. Dans le détail, il y a toutefois un écart à la proportionnalité parfaite. Le facteur de correction K_σ permet de prendre en compte cet écart lorsque l'on s'éloigne de la contrainte de confinement de 100 kPa. Pour une contrainte de consolidation σ'_v donnée, K_σ se calcule comme le rapport du CSR à cette contrainte de consolidation σ'_v , divisé par le CSR à $\sigma'_v=100$ kPa : il est inférieur à l'unité à des contraintes verticales effectives supérieures à 100 kPa et supérieur à l'unité à des contraintes verticales effectives inférieures à 100 kPa. Sa définition est donnée à l'équation 1.

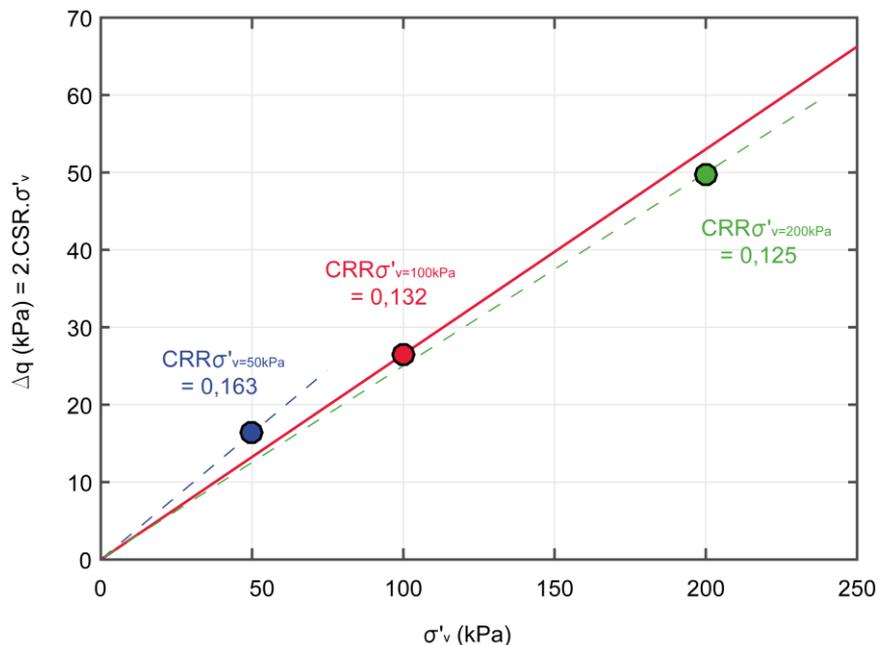


Figure 3. Evolution de la résistance au cisaillement cyclique en fonction de la contrainte de confinement.

Pour les essais réalisés, on a donc, pour une sollicitation sismique équivalente à 15 cycles :

$$K_{\sigma,50kPa} = \frac{CRR_{50kPa}}{CRR_{100kPa}} = 1,23 \quad (4)$$

$$K_{\sigma,200kPa} = \frac{CRR_{200kPa}}{CRR_{100kPa}} = 0,95$$

Le calcul de K_{σ} peut être réalisé à différents nombres de cycles équivalents au séisme N_e . Le tableau 5 montre que dans le cas de ce sable, K_{σ} varie peu entre 4, 10 et 15 cycles.

Tableau 5. Evolution de K_{σ} en fonction du nombre de cycles équivalents du séisme.

K_{σ}	Nombre de cycles N_{eq}		
	4	10	15
$\sigma'_v = 50kPa$	1,25	1,24	1,23
$\sigma'_v = 200kPa$	0,90	0,93	0,95

Les résultats obtenus pour ce sable compacté à une densité relative I_D de 40% sont comparés sur la figure 4 avec les courbes forfaitaires de K_{σ} données par l'état de l'art actuel pour la méthode simplifiée (Youd *et al.*, 2001), ainsi que par Idriss & Boulanger (2008). Youd *et al.* (2001) proposent un K_{σ} de 1,15 à 50 kPa et de 0,87 à 200 kPa tandis qu'Idriss & Boulanger proposent un K_{σ} de 1,06 à 50 kPa et de 0,94 à 200 kPa.

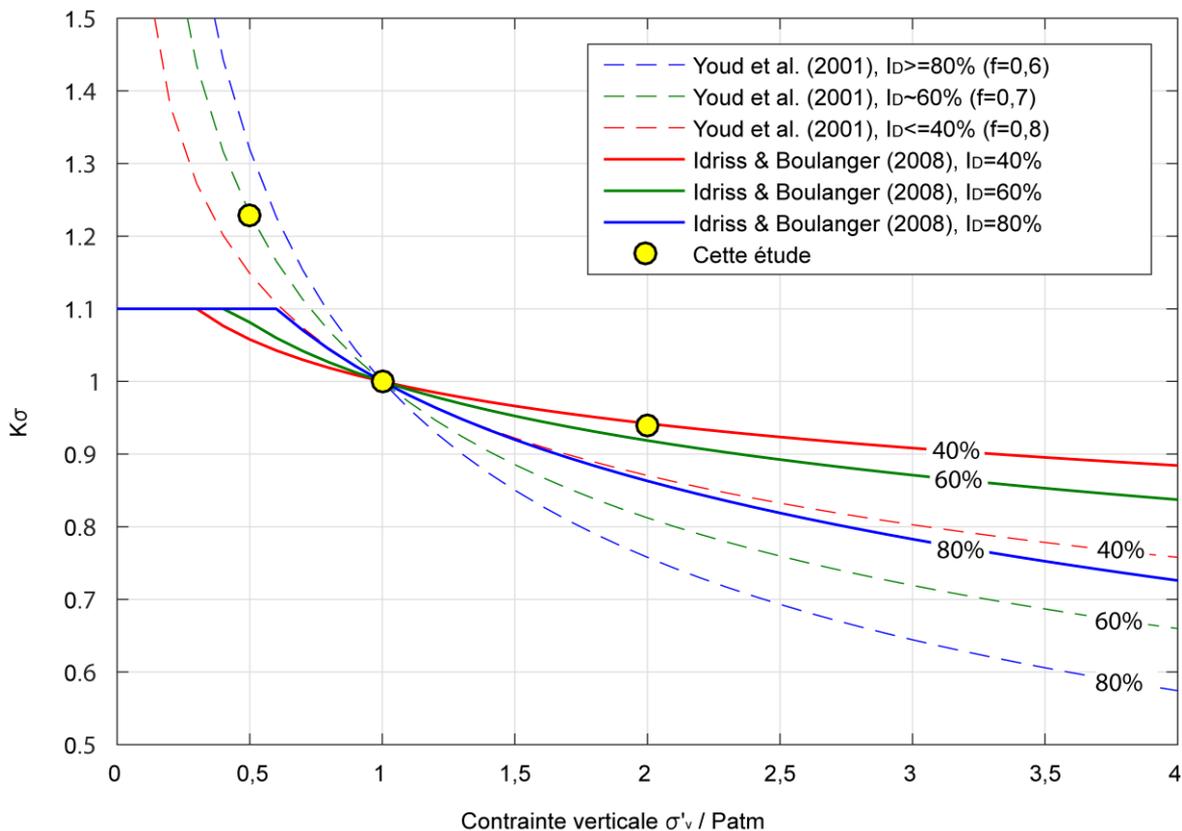


Figure 4. Les relations de K_{σ} données par Youd et al. (2001) et Idriss et Boulanger (2006) sont représentées avec les résultats de cette étude ($I_D=40\%$).

4. Conclusions

Une campagne d'essai de laboratoire à l'appareil triaxial cyclique piloté en contrainte a été réalisée pour définir le coefficient K_{σ} d'un sable. Les essais réalisés montrent un conservatisme des relations usuelles donnant le coefficient K_{σ} lorsque la pression de confinement est de 50 kPa, et une bonne correspondance avec la relation d'Idriss et Boulanger (2008) lorsque la pression de confinement est de 200 kPa.

5. Références bibliographiques

- Harder L.F.Jr., Boulanger R. (1997). Application of K_{σ} and K_{α} Correction Factors. In Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Edited by T.L. Youd and I.L. Idriss, Technical Report NCEER-97-0022.
- Idriss I.M. et Boulanger R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, 237p.
- Japanese Geotechnical Society Standards JGS-0161 (2009). Test method for minimum and maximum densities of sands.
- Montgomery J., Boulanger R.W. et L.F. Harder Jr (2014). Examination of the K_{σ} overburden correction factor on liquefaction resistance. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, n°04014066-1.
- NF EN ISO 17892-4 (2013): Détermination de la distribution granulométrie des particules.
- NF P 94-053 (2001) : Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire - Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau.
- Seed H.B., Idriss I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, vol. 97, SM9, pp 1249-1272
- Youd T.L., I.M. Idriss, R.D. Andrus, I. Arango, G. Castro, J.T. Christian, R. Dobry, W.D. Liam Finn, L.F. Harder Jr, M.E. Hynes, K. Ishihara, J.P. Koester, S.S.C. Liao, W.F. Marcusson III, G.R. Martin, J.K. Mitchell, Y. Moriwaki, M.S. Power, P.K. Robertson, R.B. Seed, K.H. Stokoe II (2001). - Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. J. Geotech. and Geoenv. Engng., vol. 127, n° 10, pp. 817-833.