

ETUDE EN LABORATOIRE DE L'AMELIORATION DES SOLS PAR L'AUGMENTATION DE LA DENSITE RELATIVE

ARAB A.¹, SHAHROUR I.²

¹ *Laboratory of Materials sciences and Environment, Civil Engineering Department, University Hassiba BenBouali, 02000 Chlef, Algeria, ah_arab@yahoo.fr*

² *Laboratory of Civil Engineering and geo-Environment (LGCgE), University Lille1, 59650 Villeneuve d'Ascq, France, Isam.shahrou@univ-lille1.fr*

Résumé:

Cet article présente une étude en laboratoire de l'influence de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction d'un sol. L'étude est basée sur des essais triaxiaux non drainés qui ont été effectués sur des échantillons ayant une densité relative $I_d = 0,15, 0,5$ et $0,65$. L'article est composé de trois parties. Dans un premier temps présente les matériaux et les caractéristiques des sables étudiés. la seconde partie le mode opératoire et le dispositif utilisé. La troisième partie étudie l'influence de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction des trois sables (Hostun Rf, Chlef et Rass). Cette étude permet également d'explorer l'influence de la granulométrie sur le potentiel de liquéfaction.

Les résultats des essais montrent que des résultats concordants ont été obtenus et qui montrent d'une manière très claire que l'augmentation de la densité relative conduit à une importante amélioration de la résistance à la liquéfaction des sables. Cet effet est très important lorsqu'on passe d'une densité relative initiale $I_d=0,50$ à $I_d = 0,65$.

Mots clés: Sable, triaxial, densité, amplitude, potentiel, résistance, cycles.

1. Introduction:

La résistance à la liquéfaction d'un site peut-être améliorée si celui-ci est sujet à un haut risque de liquéfaction, en agissant sur l'un de ces paramètres influents sur la résistance. Actuellement les méthodes les plus utilisées pour la stabilisation des sites agissent sur la densité relative et les conditions de drainage du sol. Récemment de nouvelles méthodes de stabilisation des sites liquéfiables ont été envisagées. Ces dernières consistent à améliorer la résistance à la liquéfaction par inclusion de nappes de géotextile, par augmentation de la perméabilité du sol.

La densité relative affecte d'une manière très sensible le potentiel de liquéfaction des sols. La figure 1 donne les résultats obtenus par Tatsuoka et al. (1986) sur le sable de Toyoura. On constate que la résistance à la liquéfaction augmente de façon linéaire avec la densité relative jusqu'à une valeur de densité relative $D_r = 0,70$. Après cette valeur, on remarque une augmentation importante de la résistance avec l'augmentation de la densité relative.

Polito et Martin (2001), ont réalisé une série d'essais triaxiaux sur des échantillons de sable (Monterrey et Yatesville) mélangé avec des fines non plastiques. Ils constatent une tendance linéaire entre l'augmentation de la densité relative et la résistance à la liquéfaction (Fig.2) pour les échantillons de sol ayant une teneur en fines en dessous du seuil limite (seuil limite des fines étant le passage d'une matrice de sol à prédominance sable à matrice contrôlée par les fines), cependant la résistance à la liquéfaction en dessus du seuil limite est aussi contrôlée par la densité relative de l'échantillon, cependant la résistance des sols est nettement inférieure par rapport aux mêmes sols qui se trouvent en dessous du seuil avec la même densité relative.

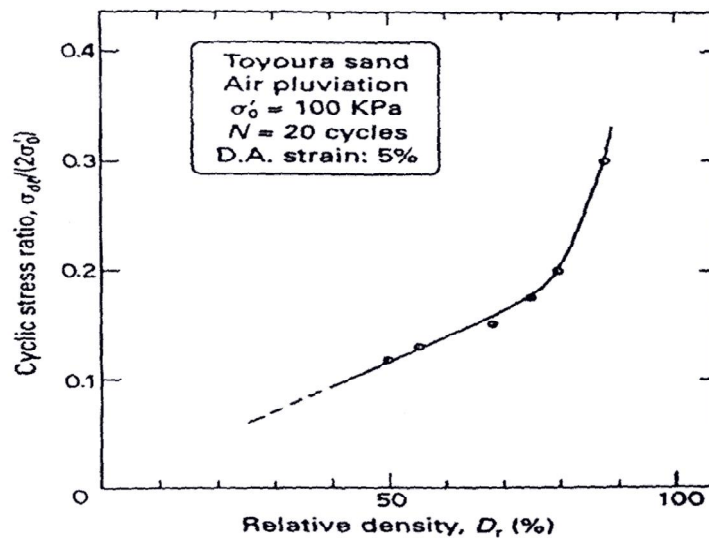


Figure 1: Effet de la densité relative sur la résistance à la liquéfaction (Tatsuoka et al.,1986)

Dans cet article, on présente une étude au laboratoire sur l'influence de la densité relative sur la résistance à la liquéfaction. Ces essais permettent de mieux comprendre l'influence de la densité relative sur le comportement cyclique des sables. L'article est composé de trois parties ; dans la première on présente les matériaux utilisés ; la seconde partie le mode opératoire et le dispositif utilisé ; la dernière donne une analyse des résultats expérimentaux des essais réalisés et discute de l'influence de l'influence de la densité relative sur le comportement cyclique des sables.

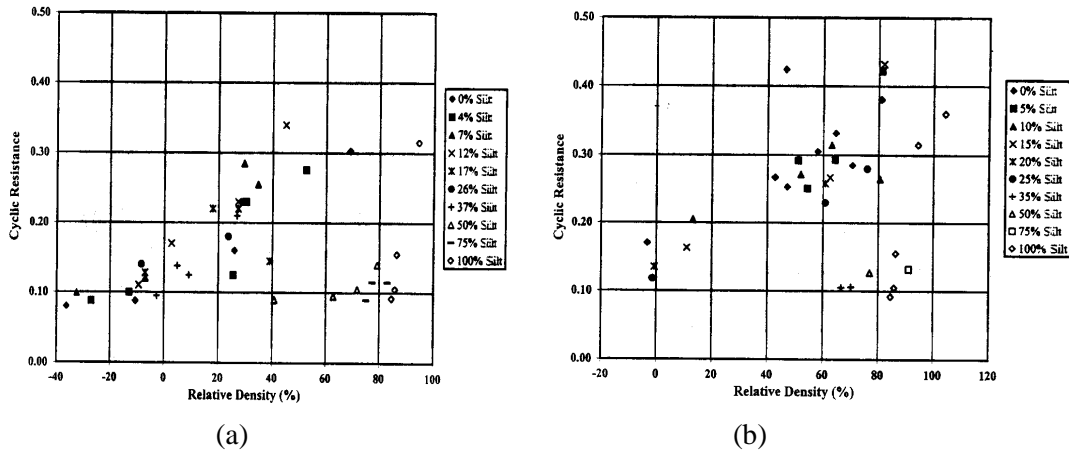


Figure 2 : Effet de la densité relative sur la résistance à la liquéfaction du mélange de sable de Monterrey (a) et Yatesville (b) avec des fines non plastiques (Polito et Martin, 2001).

2. Matériaux et dispositif expérimental.

2.1. Matériaux

Trois matériaux ont été utilisés dans cette étude à savoir le sable de Chlef et Rass (Algérie) et le sable d'Hostun Rf (France).

Le sable de Chlef comme son nom l'indique provient du lit de l'Oued-Chlef qui traverse la ville de Chlef. Le sable d'Oued Rass provient des abords du lit d'Oued Rass (confluent Oued Chlef et Oued Rass). Le sable d'Hostun Rf provient des usines SIKA implantées à 26730 Hostun (Drôme) sur le flanc ouest du Vercors, la carrière d'où provient le sable est implantée dans une série épaisse de sables d'origines Eocène remplissant des poches karstiques.

Le sable de Chlef est un sable moyen ayant une forme arrondie (sable alluvionnaire), avec un diamètre moyen $D_{50} = 0,61\text{mm}$. Le sable d'Oued Rass est aussi un sable moyen de forme arrondie (sable alluvionnaire) avec un diamètre moyen $D_{50} = 0,39\text{mm}$. Le sable d'Hostun est considéré comme un matériau de référence dans de nombreux laboratoires en France. De nombreux essais ont été réalisés sur ce sable (Colliat 1986, Fargeix 1986, Flavigny et al. 1990, Biarez et Ziani 1991, Lancelot et al. 1996, Doanh et al. 1997, Al mahmoud 1997, Hoque et Tatsuoka 1998). Il s'agit un sable moyen ayant une forme angulaire avec un diamètre moyen $D_{50} = 0,471$. La figure 3 montre les courbes granulométriques des matériaux utilisés. Ces courbes ont été obtenues par tamisage sur une série complète de tamis. Le tableau 1 donne les caractéristiques de ces sables.

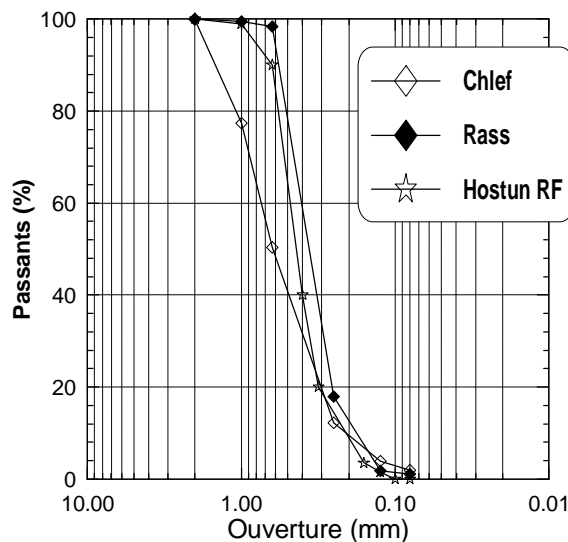


Figure 3: Courbe granulométrique

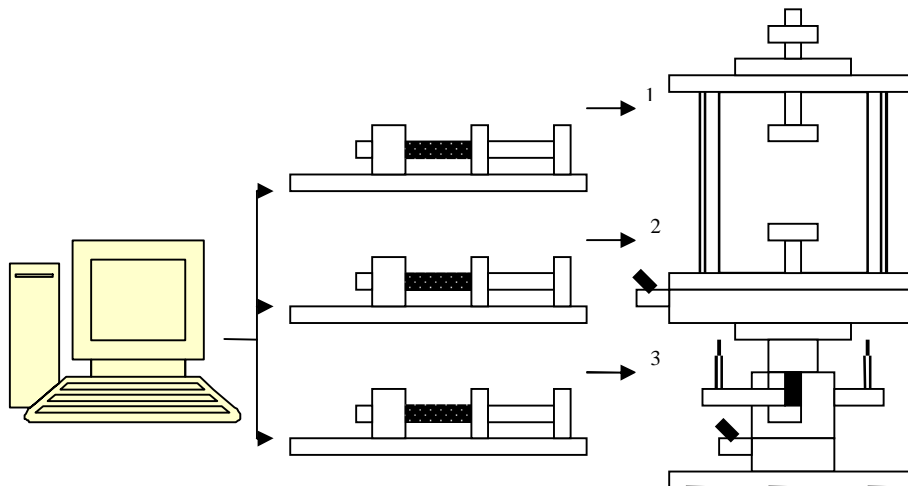
Tableau 1: Caractéristiques des matériaux utilisés

Propriétés	Sable		
	Chlef	Rass	Hostun
Masse spécifique ρ_s (g/cm ³)	2,68	2,664	2,654
e_{max}	0,854	0,770	0,983
e_{min}	0,535	0,490	0,622
Cu (D_{60}/D_{10})	3,38	2,42	2,27
D_{10}	0,225	0,227	0,19
D_{50}	0,61	0,39	0,471
Forme des particules	Arrondie	Arrondie	Angulaire

2.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est présenté schématiquement dans la figure 4. Il comprend :

- Une cellule triaxiale autonome type Bishop et Wesley (Bishop et Wesley, 1975),
- Trois contrôleurs de pression /volume type GDS (200cc),
- Une pompe à vide relié à un réservoir afin de désaérer l'eau déminéralisée,
- Un micro-ordinateur équipé d'un logiciel permettant le pilotage de l'essai et l'acquisition des mesures.



- (1) application de la pression dans la cellule
- (2) contrôle de la pression interstitielle ou variation de volume de l'échantillon
- (3) contrôle du déviateur

Figure 4 : Dispositif expérimental utilisé

Elle est constituée de deux chambres. La chambre supérieure contient l'échantillon et les deux embases servant à appliquer la charge axiale sur celui-ci. La pression maximale que peut supporter cette chambre est de 2 MPa. La partie inférieure consiste en une presse hydraulique. Elle est constituée

d'une chambre métallique dans laquelle un piston peut coulisser. L'extrémité du piston est reliée à l'embase inférieure qui applique la charge axiale à l'échantillon. Comme la section du piston est connue, la force et le déplacement axial appliqué par le piston sont déduits directement de la pression et de la variation de volume dans la chambre. Ces dernières sont contrôlées par un GDS qui permet d'appliquer le chargement axial en contrainte ou en déformation contrôlée. L'échantillon est balayé tout d'abord par du gaz carbonique CO₂ pendant 20 minutes ensuite on fait passer l'eau désaérée et déminéralisée à travers l'échantillon pour le saturer. Les échantillons sont consolidés isotropiquement pour atteindre la valeur de contrainte de confinement effective précédant le chargement. La contre pression utilisée pour nos essais est de 400 kPa, la contrainte de confinement est égale à 500 kPa. Le degré de saturation des échantillons est évalué en mesurant le coefficient de Skempton B après consolidation ($B = \Delta\mu / \Delta\sigma$).

3. Résultats des essais

3.1. Essai cyclique sur le Sable d'Hostun

Les essais triaxiaux non drainés ont été réalisés sous un confinement initial de 100 kPa. Pour chaque densité relative, nous avons réalisés des essais pour différentes amplitudes afin de construire la courbe du potentiel de liquéfaction.

Pour le sable lâche ($I_d = 0,15$), les essais ont été réalisés pour trois amplitudes $q_m = 60, 40$ et 30 kPa. On constate que la liquéfaction s'obtient rapidement (après 2 cycles) pour la forte amplitude ($q_m = 60$ kPa) alors qu'il faut un nombre élevé pour la liquéfaction sous le chargement $q_m = 30$ kPa (18 cycles).

Pour le sable à densité moyenne ($I_d = 0,50$), les essais ont été réalisés pour cinq amplitudes $q_m = 70, 60, 50, 40$ et 30 kPa. On note que pour cette densité, il faut un nombre plus élevé de cycles pour la liquéfaction totale en comparaison avec les essais réalisés sur le sable lâche. A titre d'exemple pour le chargement avec une amplitude $q_m = 60$ kPa, il faut 9 cycles pour la liquéfaction du sable à densité moyenne alors que le sable lâche a subi une liquéfaction après un cycle. Pour le chargement $q_m = 30$ kPa, le sable lâche a subi une liquéfaction après 18 cycles alors que la liquéfaction du sable moyennement dense a nécessité 87 cycles.

Quatre essais ont été réalisés sur un sable avec une densité relative plus élevée ($I_d = 0,65$). Les essais ont été réalisés pour des amplitudes $q_m = 70, 50, 40$ et 30 kPa. On note que pour cette densité, il faut un nombre encore plus élevé de cycles pour la liquéfaction totale en comparaison avec les essais réalisés sur les densités $I_d = 0,15$ et $0,50$. A titre d'exemple pour le chargement avec une amplitude $q_m = 40$ kPa, il faut 3 cycles pour la liquéfaction du sable lâche alors qu'il faut 20 cycles pour le sable à densité relative $I_d = 0,50$ et une soixantaine de cycles pour la densité relative $I_d = 0,65$. Des résultats semblables sont obtenus pour les autres amplitudes.

Les résultats de l'ensemble des essais présentés ci-dessus sont résumés sur les figures 5a et 5b. La première illustre l'influence de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction. Elle montre d'une manière très claire que l'augmentation de la densité relative conduit à une translation importante des courbes de potentiel de liquéfaction vers la droite. C'est-à-dire, que l'augmentation de la densité relative améliore la résistance à la liquéfaction de ce sable. Ce résultat est cohérent avec l'influence de la densité relative sur l'augmentation de la dilatance du sable.

La figure 5b montre l'influence de la densité relative sur la résistance à la liquéfaction qui a définie par l'amplitude du chargement induisant la liquéfaction après 15 cycles. Cette figure montre bien que la résistance à la liquéfaction augmente avec l'augmentation de la densité relative et la diminution de l'amplitude du chargement.

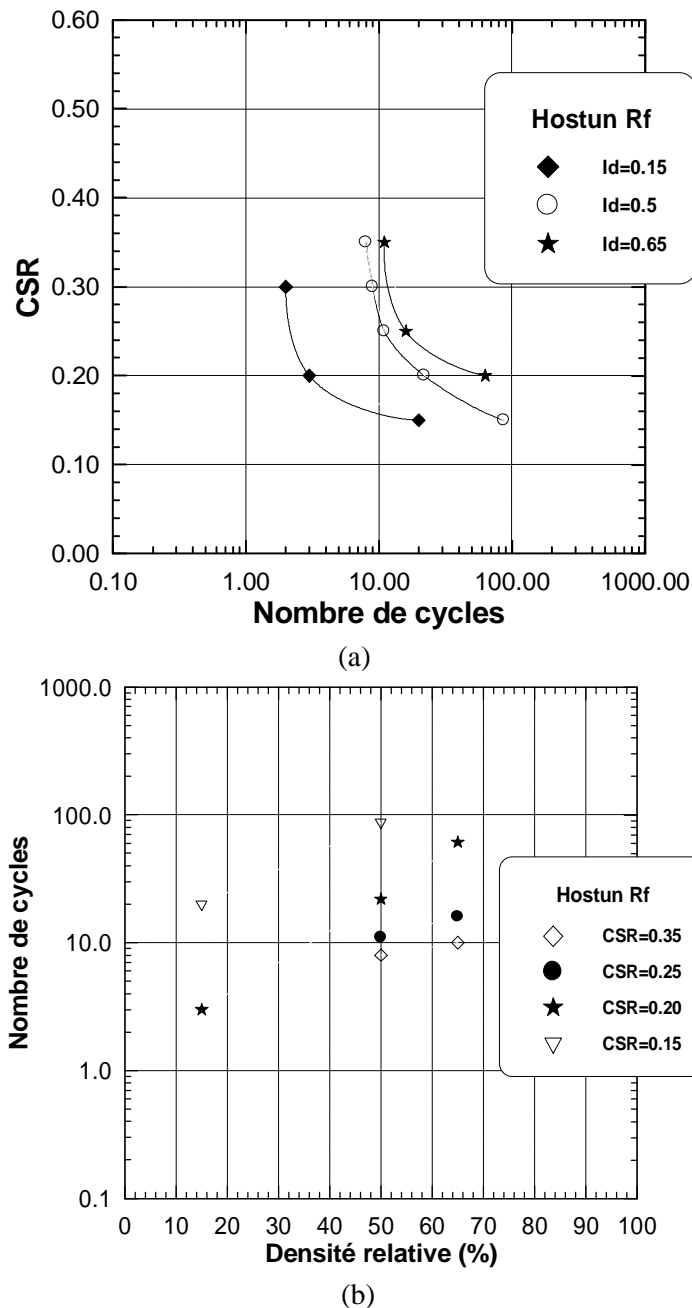


Figure 5 : Influence de la densité initiale sur la liquéfaction du sable d'Hostun Rf
 a) Sur le potentiel de liquéfaction, b) sur la résistance à la liquéfaction,

3.2. Essais cycliques sur le sable de Rass

Des essais cycliques non drainés ont été réalisés sur de Rass pour trois densités relatives $I_d = 0,15$, $0,50$ et $0,65$. Pour chaque densité relative, nous avons fait varier l'amplitude du chargement afin de construire la courbe du potentiel de liquéfaction.

Pour le sable lâche ($I_d = 0,15$), les essais ont été réalisés pour trois amplitudes $q_m = 70$, 50 et 30 kPa. On constate que la liquéfaction s'obtient rapidement pour les fortes amplitudes: après un cycle pour le chargement à $q_m = 70$ kPa et deux cycles pour $q_m = 50$ kPa, alors qu'il faut 15 cycles pour la liquéfaction sous le chargement $q_m = 30$ kPa.

Pour le sable à densité moyenne ($I_d = 0,50$), les essais ont été réalisés pour trois amplitudes aussi $q_m = 70$, 50 et 30 kPa. On note que pour cette densité, il faut un nombre plus élevé de cycles pour la liquéfaction totale en comparaison avec les essais réalisés sur le sable lâche. A titre d'exemple pour

le chargement avec une amplitude $q_m = 50$ kPa il faut 4 cycles pour la liquéfaction du sable à densité moyenne alors que le sable lâche a subi une liquéfaction après deux cycles. Pour le chargement $q_m = 30$ kPa, le sable lâche a subi une liquéfaction après 15 cycles alors que la liquéfaction du sable moyennement dense a nécessité 51 cycles.

Trois essais ont été réalisés sur un sable avec une densité relative plus élevée ($I_d = 0,65$). Les essais ont été réalisés pour des amplitudes $q_m = 70, 50, \text{ et } 30$ kPa. On note que pour cette densité, il faut un nombre encore plus élevé de cycles pour la liquéfaction totale en comparaison avec les essais réalisés sur les densités $I_d = 0,15$ et $0,50$. A titre d'exemple pour le chargement avec une amplitude $q_m = 50$ kPa, il faut 2 cycles pour la liquéfaction du sable lâche alors qu'il faut 4 cycles pour le sable à densité relative $I_d = 0,50$ et 12 cycles pour la densité relative $I_d = 0,65$. Pour le chargement à amplitude $q_m = 30$ kPa, il faut 13 cycles pour la liquéfaction du sable lâche alors qu'il faut 51 cycles pour le sable à densité relative $I_d = 0,50$ et 176 cycles pour la densité relative $I_d = 0,65$.

Les résultats de l'ensemble de ces essais sont résumés sur la figure 6. La figure 6a illustre l'influence de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction. Elle montre d'une manière très claire que l'augmentation de la densité relative conduit à une importante translation importante de la courbe de potentiel de liquéfaction vers la droite. C'est-à-dire, que l'augmentation de la densité relative améliore la résistance à la liquéfaction de ce sable.

La figure 6b montre l'influence de la densité relative sur la résistance à la liquéfaction définie par l'amplitude du chargement induisant la liquéfaction après 15 cycles. Cette figure montre bien que la résistance à la liquéfaction augmente avec l'augmentation de la densité relative et la diminution de l'amplitude du chargement. La différence entre la résistance du sable à une densité relative $I_d = 50$ et celle pour $I_d = 0,65$ est très importante en comparaison avec la différence observée sur le sable d'Hostun (Figure 6b).

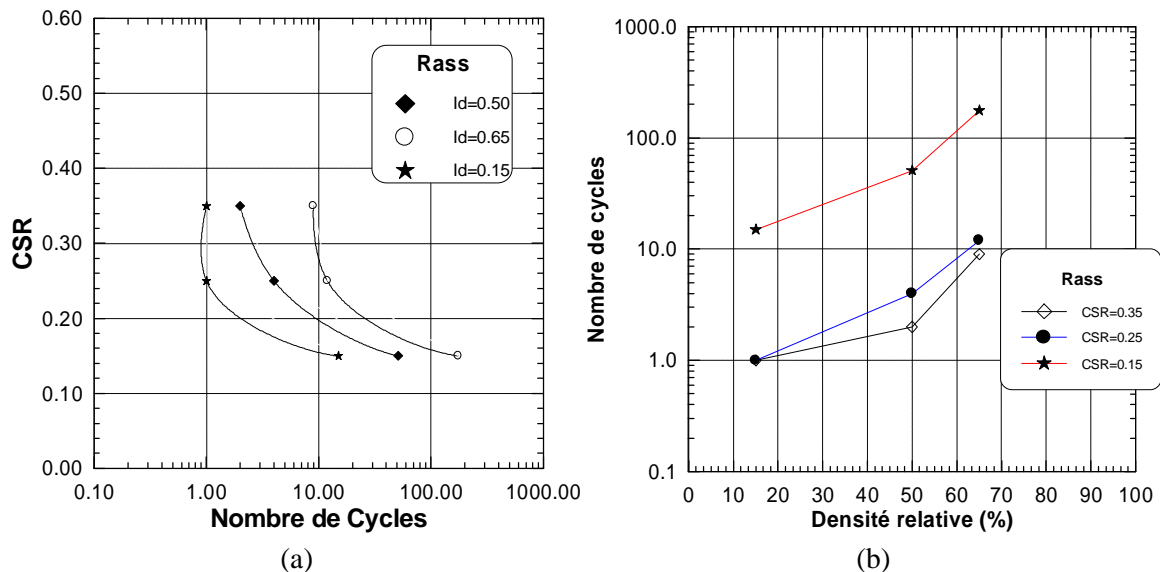


Figure 6 : Influence de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction du sable de Rass :

a) Courbe de potentiel de liquéfaction b) Résistance à la liquéfaction.

3.3. Essais cyclique sur le sable de Chlef

Des essais cycliques non drainés ont été réalisés sur de Chlef pour trois densités relatives $I_d=0,15, 0,50$ et $0,65$. Pour chaque densité, nous avons fait varier l'amplitude du chargement afin de construire la courbe du potentiel de liquéfaction.

Pour le sable lâche ($I_d = 0,15$), les essais ont été réalisés pour les amplitudes $q_m = 70, 50$ et 30 kPa. On constate que la liquéfaction s'obtient rapidement pour les fortes amplitudes: après deux cycles pour les chargements à $q_m = 70$ kPa et 50 kPa, alors qu'il faut 22 cycles pour la liquéfaction sous le chargement $q_m = 30$ kPa.

Pour le sable à densité moyenne ($I_d = 0,50$), les essais ont été réalisés pour les mêmes amplitudes ($q_m = 70, 50$ et 30 kPa). On note qu'il faut un nombre plus élevé de cycles pour la

liquéfaction totale en comparaison avec les essais réalisés sur le sable lâche. A titre d'exemple pour le chargement avec une amplitude $q_m = 50$ kPa il faut 5 cycles pour la liquéfaction du sable à densité moyenne alors que le sable lâche a subi une liquéfaction après deux cycles. Pour le chargement $q_m = 30$ kPa, le sable lâche a subi une liquéfaction après 22 cycles alors que la liquéfaction du sable moyennement dense a nécessité 80 cycles.

Trois essais ont été réalisés sur un sable avec une densité relative plus élevée ($I_d = 0,65$). On note pour cette densité, qu'il faut un nombre encore plus élevé de cycles pour la liquéfaction totale en comparaison avec les essais réalisés sur les densités $I_d = 0,15$ et $0,50$. A titre d'exemple pour le chargement avec une amplitude $q_m = 50$ kPa, il faut 2 cycles pour la liquéfaction du sable lâche alors qu'il faut 5 cycles pour le sable à densité relative $I_d = 0,50$ et 12 cycles pour la densité relative $I_d = 0,65$. Pour le chargement à amplitude $q_m = 30$ kPa, il faut 22 cycles pour la liquéfaction du sable lâche alors qu'il faut 80 cycles pour le sable à densité relative $I_d = 0,50$ et 140 cycles pour la densité relative $I_d = 0,65$.

Les résultats de l'ensemble de ces essais sont résumés sur la figure 7. La figure 7a illustre l'influence de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction. Elle montre clairement que l'augmentation de la densité relative conduit à une augmentation de la résistance à la liquéfaction de ce sable.

La figure 7b montre l'influence de la densité relative sur la résistance à la liquéfaction définie par l'amplitude du chargement induisant la liquéfaction après 15 cycles. Cette figure montre bien que la résistance à la liquéfaction augmente avec l'augmentation de la densité relative et la diminution de l'amplitude du chargement. La différence entre la résistance du sable à une densité relative $I_d = 50$ et celle pour $I_d = 0,65$ est très importante ; elle ressemble à celle observée sur le sable de Rass (Figure 7b).

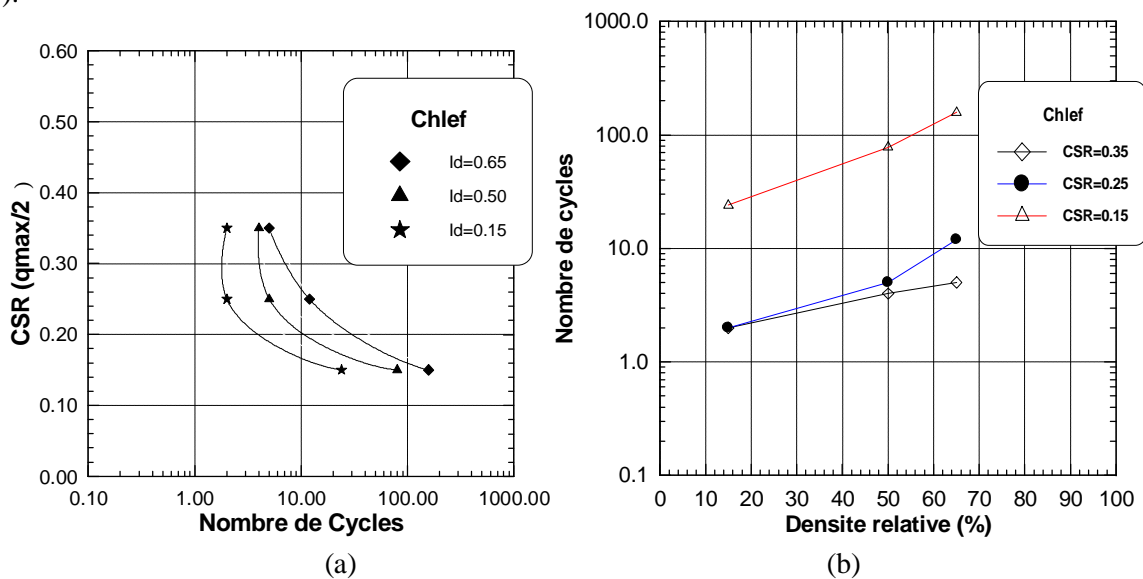


Figure 7 : Effet de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction du sable de Chlef

On remarque que le sable d'Hostun Rf présente une résistance à la liquéfaction plus élevée que celle des autres sables à savoir le sable de Chlef et Rass. Cette résistance élevée du sable d'Hostun Rf peut être expliquée par le fait que ce sable est de caractère dilatant que les autres sables de Chlef et Rass qui sont des sables à caractère contractant (fig. 8).

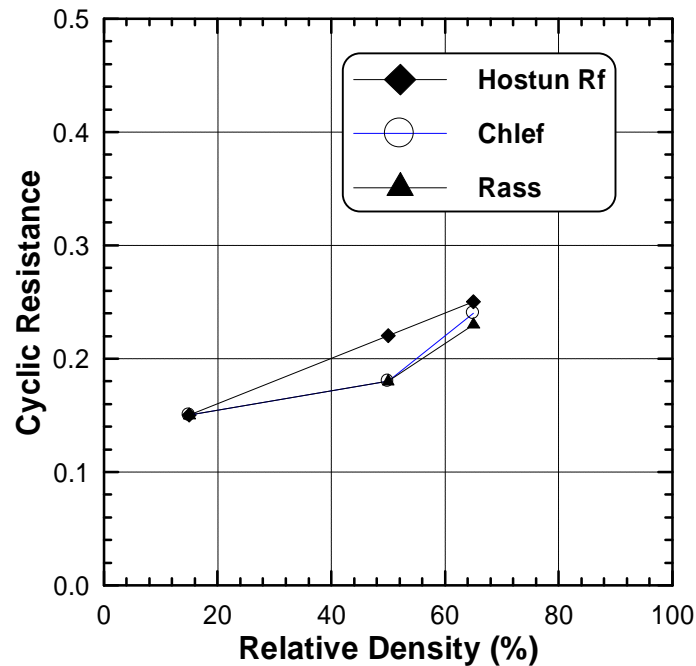


Figure 8 : Effet de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction des sables (Chlef, Rass et Hostun RF)

Conclusion

Cet article a comporté une présentation des résultats d'une étude en laboratoire de l'influence de la densité relative sur le potentiel des sables. L'étude a comporté des essais triaxiaux non drainés qui ont été réalisés à une densité relative initiale $I_d = 0.15, 0.50$ et 0.65 .

L'étude de l'influence de la densité initiale sur le potentiel de liquéfaction a été effectuée sur les trois sables (Hostun Rf, Rass et Chlef). Des résultats concordants ont été obtenus qui montrent d'une manière très claire que l'augmentation de la densité relative conduit à une importante amélioration de la résistance à la liquéfaction des sables.

Les essais montrent que la densité relative initiale affecte d'une manière significative le potentiel de liquéfaction des sables. Elle améliore la résistance à la liquéfaction des sables, son effet devient très important lorsque la densité initiale I_d passe de $0,50$ à $0,65$.

La résistance à la liquéfaction du d'Hostun Rf est supérieure par rapport aux autres sables (Chlef et Rass) et qui peut être expliquer par le faite que le sable d'Hsotun Rf est de caractère dilatant que les autres sables de Chlef et Rass qui sont des sables à caractère contractant

Références

- Al Mahmoud M. (1997): « Etude en laboratoire du comportement des sables sous faibles contraintes», Thèse de doctorat en génie civil à l'USTL, Lille.
- Biarez J. & Ziani F. (1991) : « Introduction aux lois de comportement des sables très peu denses», Revue Française de Géotechnique, Vol. 54, pp. 65-73.
- Bishop A. W. & Wesley L.D. (1975): « A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing», Geotechnique, Vil.25, N° 4, pp. 657-670.
- Colliat J.L. (1986) : « Comportement des matériaux granulaires sous forte contraintes, influence de la nature minéralogique du matériau étudié», Thèse de doctorat de spécialité, IMG, Grenoble.

- Flavigny E., Desrues J.& Palayer B. (1990): « Le sable d'Hostun Rf », Revue Française de Géotechnique, N°53, pp.67-70.
- Gargeix D. (1986): « Conception et réalisation d'une presse triaxiale dynamique-application à la mesure des propriétés des sols sous sollicitations sismiques », Thèse de doctorat, IRIGM, Grenoble.
- Habib P. & Luong M.P. (1978) : « Sols pulvérulents sous chargement cyclique », Séminaire Matériaux et Structures Sous Chargement Cyclique, école Polytechnique, Sept. 28-29, pp 49-79.
- Hoque E. & Tatsuoka F. (1998): « Anisotropy in the elastic deformation of granular materials », Soils and Foundations, Vol.38, N° 1, pp. 163-179.
- Lancelot L., Shahrour I. & Al Mahmoud M. (1996): « Comportement du sable d'Hostun sous faibles contraintes », Revue Française de Géotechnique, N°74, Janvier, pp.63-74.
- Tatsuoka F., Miura S., Yoshimi Y., Yasuda S., & Makihara Y. (1986): « Cyclic undrained triaxial strength of sand by a cooperative test program, Soils and foundations », 26, 117-128.
- Polito C.P. & Martin J.R. (2001): « Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands », Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol., 127, N°5, pp. 408-415.