

## **I.1 Introduction**

Le terme "sol" est utilisé en génie civil pour désigner un matériau constitué d'un agrégat naturel de particules minérales de dimensions comprises dans des limites prédéfinies. Les sols argileux sont constitués de minéraux variés dont l'affinité à l'eau dépend de plusieurs paramètres, entre autres la structure minéralogique. Certains sols comportent une proportion de particules argileuses telles que les illites et les smectites, kaolin etc.

## **I.2 La liquéfaction**

### **I.2.1 Introduction**

La liquéfaction des sols est un phénomène d'instabilité ou de perte de résistance qui peut avoir lieu sur un milieu généralement granulaire saturé ou partiellement saturé. Elle se manifeste par une augmentation de la pression interstitielle liée au comportement contractant du sol lors de l'application d'un chargement rapide (séisme, chocs, etc.). Le phénomène de liquéfaction est à l'origine d'une brusque instabilité des sols qui en s'écoulant sous l'effet de la pesanteur et les charges peuvent alors provoquer des dommages irréparables aux ouvrages et structures situés à proximité.

Hazen en 1920 a utilisé pour la première fois le terme de liquéfaction, phénomène qui a provoqué la rupture du barrage de Claveras en Californie. Ce mot liquéfaction a été utilisé aussi par Casrto (1936) comme étant la réponse d'un sable saturé contractant soumis à un chargement statique en contrainte imposée menant à sa perte de résistance. D'autres chercheurs ont donné des définitions pour la liquéfaction qui est la perte de résistance d'un matériau sableux saturé en eau engendrée par la disparition des forces intergranulaires qui lient les grains de sable entre eux, suite à une surgénération de la pression interstitielle. C'est alors que le sol perd sa cohésion et commence à couler comme un liquide. Il existe maintenant un accord acceptable sur l'identité du phénomène de liquéfaction, qui peut être résumé dans la définition proposée par Sladen et al. 1985, qui rejoignent celle donnée par Seed en 1979: « La liquéfaction est un phénomène dans lequel une masse de sol perd un pourcentage important de sa résistance au cisaillement, sous l'action d'un chargement monotone ou cyclique, quasi statique ou dynamique, et s'écoule de manière semblable à un liquide.

### **I.2.2: Dégâts de liquéfactions des sols**

La liquéfaction des sols est un problème sérieux capable de causer des dégâts souvent irréparables, tant à des ouvrages existants qu'à de nouvelles constructions, ainsi la liquéfaction peut provoquer (Figure I.1):

- La rupture des barrages

- La rupture des culées des ponts
- Le tassement des dépôts de sable, le déplacement latéral d'un terrain, etc...



Niigata (Japon), 1964



Alaska (USA), 1964



San Fernando (Californie), 1979



Kobé (Japon), 1995

**Figure I.1:** Exemples de désordres causés par le phénomène de liquéfaction

### I.3. Influence des fines sur le comportement mécanique des sols

#### I.3.1. Introduction

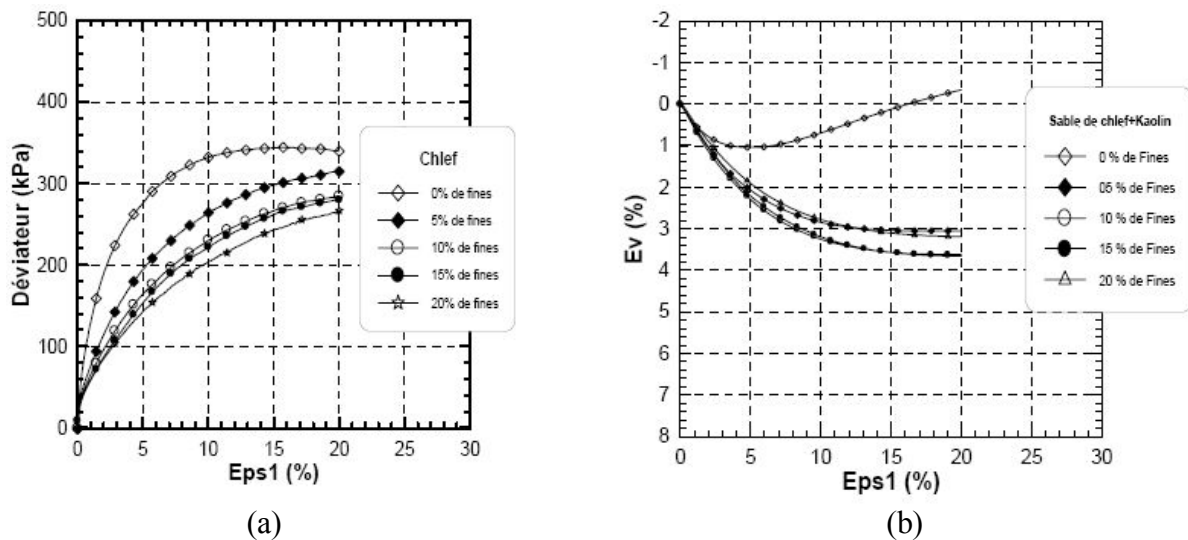
Le rôle des fines sur le comportement à la liquéfaction des sables a fait l'objet de plusieurs recherches. On ne trouve pas de consensus quant à l'effet de la teneur en fines sur le comportement des mélanges sables-sols fins. Plusieurs recherches ont rapporté que la résistance à la liquéfaction d'un sable augmente avec l'augmentation de la teneur en fines (Chang et al. 1982; Dezfoulian 1982; Amini et Qi 2000), d'autres ont trouvé que l'augmentation de la teneur en fines réduit la résistance à la liquéfaction (Shen et al. 1997; Troncoso et Verdugo 1985; Finn et al. 1994; Vaid 1994; Lade et

Yamamuro 1997; Zlatovic et Ishihara 1997). D'autres études ont trouvé que la résistance à la liquéfaction diminue jusqu'à atteindre une résistance minimale, puis elle réaugmente avec l'augmentation de la teneur en fines (Law et Ling 1992; Koester 1994, Bouferra et I.Shahrour 2004).

### I.3.2. Influence des fines plastiques

#### I.3.2.1. Effet du kaolin

D'après Arab 2008, la figure I.2 montre les résultats des essais drainés réalisés pour différentes des fractions des fines sur un mélange sable-Kaloin pour des fractions des fines comprises entre 0 et 20%. Les résultats de ces essais montrent que l'augmentation de la fraction des fines se traduit par une amplification de la contractance du sol et une réduction de sa résistance. Ce résultat est observé pour les fractions des fines étudiées dont la valeur maximale est égale  $F_c = 20\%$ .



**Figure I.2:** Essais de compression drainée sur un mélange sable-argileux (Arab 2008)

#### I.3.2.2. Effet du kaolin-bentonite

Bayat et al. 2014, ils ont trouvé que les échantillons de mélange sable-kaolinite avec d'une teneur en kaolinite allant jusqu'à 20% entraîne une Résistance au cisaillement maximale des échantillons, la teneur en kaolinite conduit à une augmentation du cisaillement du pic. D'autre part, l'échantillon contenant 20% de teneur en kaolinite (valeur seuil) donne la plus faible résistance maximale pour une pression de confinement nette donnée (Figure I.3, I.4, I.5). En outre, l'échantillon contenant 0% la teneur en kaolinite présente la plus haute résistance au cisaillement du pic et un excès positif de pression d'eau interstitielle par rapport aux autres échantillons contenant de la kaolinite à une pression de confinement nette donnée.

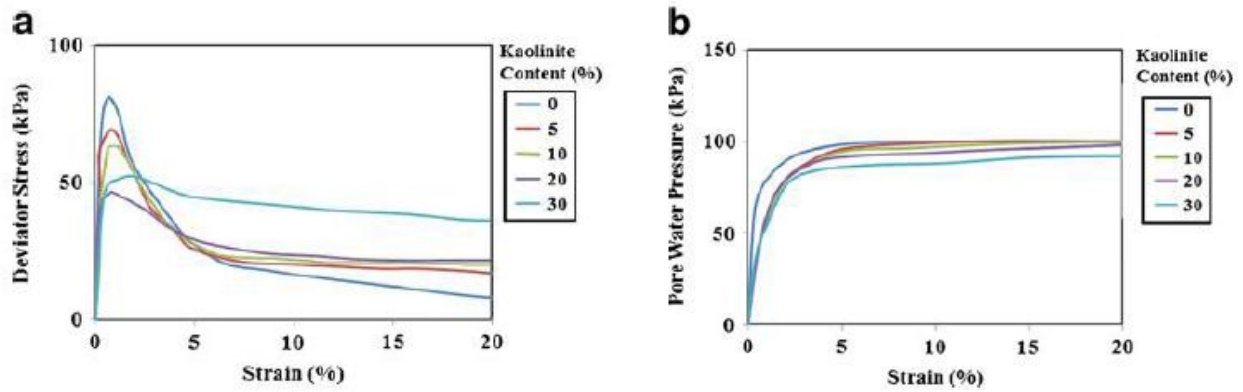


Figure I.3: Courbes de contrainte-déformation (a), Courbes pression d'eau-déformation (b) (Pression de confinement de 100kPa) (Bayat et al. 2014)

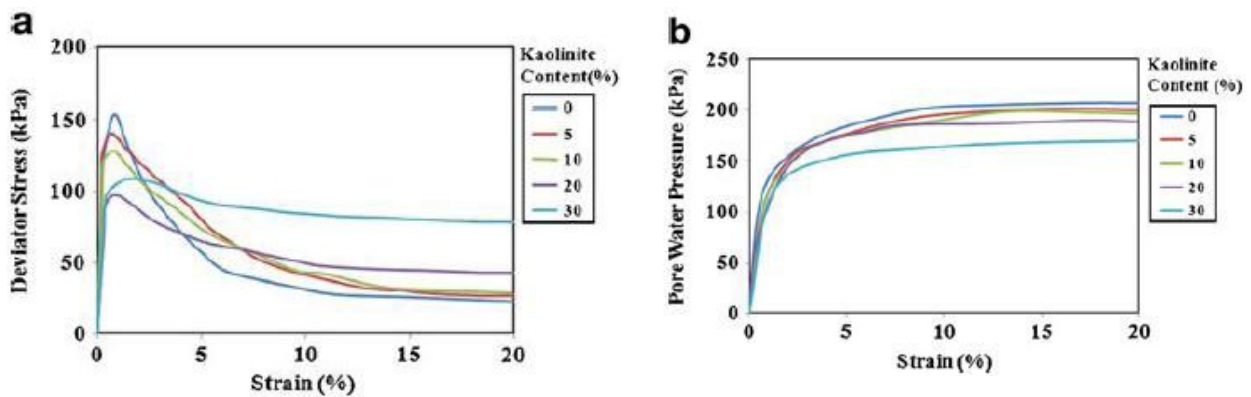


Figure I.4: Courbes de contrainte-déformation (a), Courbes pression d'eau-déformation (b). (Pression de confinement de 200kPa) (Bayat et al. 2014)

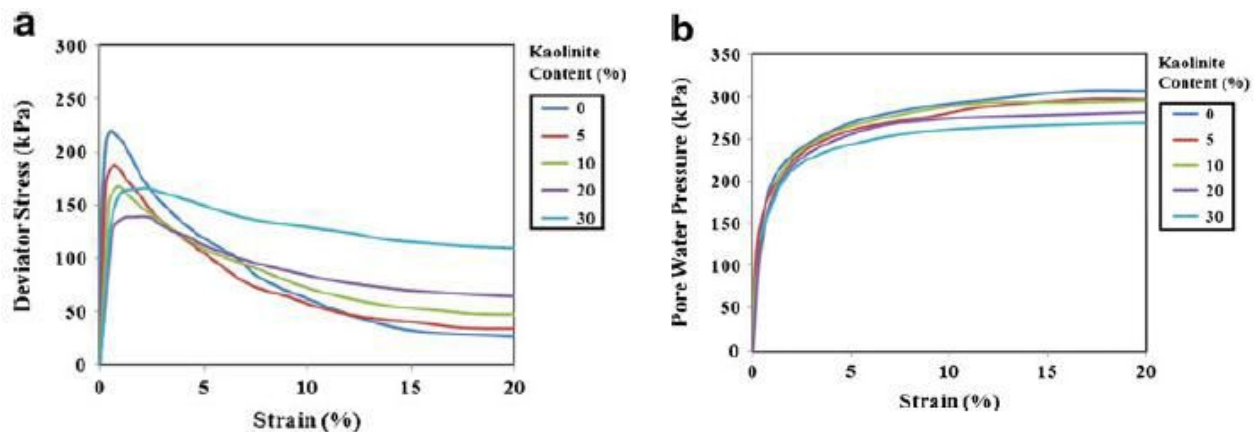


Figure I.5: Contrainte-déformation (a), Pression de l'eau-déformation (b) (Pression de confinement de 300kPa) (Bayat et al. 2014)

La figure I.6, montre que pour les échantillons contenant 10% de la kaolinite ou la bentonite, les valeurs des forces de cisaillement maximales sont rapprochées. On n'a également observé que la teneur en bentonite à des effets considérables sur le comportement mécanique sable que la kaolinite.

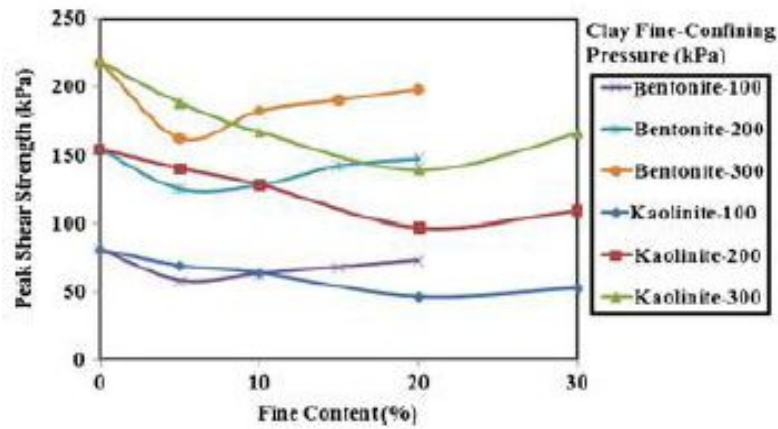


Figure I.6: Effet de la teneur en fine (Bayat et al. 2014)

### I.3.2.3. Effet de l'indice de plasticité

Sandoval 1989 et Prakash et Sandoval 1992 ont réalisé des essais sur des échantillons remaniés de limon (avec une teneur en fines de 96%, IP = 1.7%). Le mélange de kaolin avec du limon a permis d'augmenter l'indice de plasticité (IP) de 2.6% à 3.4% (Figure I.7). On observe que le CSR causant la liquéfaction pour un nombre particulier de cycles diminue quand l'indice de plasticité augmente. Pour un nombre de 10, la résistance au cisaillement cyclique de la liquéfaction initiale est de 0.21, 0.17, et 0.128 pour un indice de plasticité de 1.7, 2.6, 3.4 respectivement. Ces résultats indiquent que pour des faibles valeurs de plasticité, l'augmentation de l'indice de plasticité a pour effet de réduire la résistance à la liquéfaction.

Puri 1984, 1990 a réalisé des essais triaxiaux sur des échantillons remaniés de limon et mélange argile-limon avec un indice de plasticité variant de 10 à 20% (Figure I.8). La principale conclusion de cette étude est que la résistance du mélange dans le domaine 10-20% augmente avec l'augmentation de l'indice de plasticité.

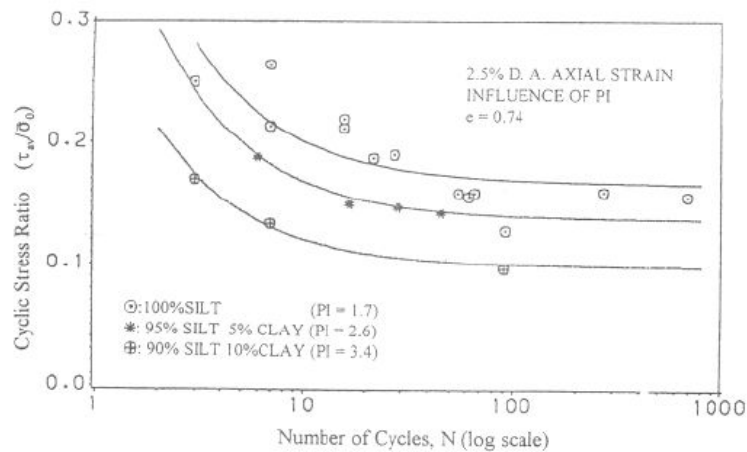
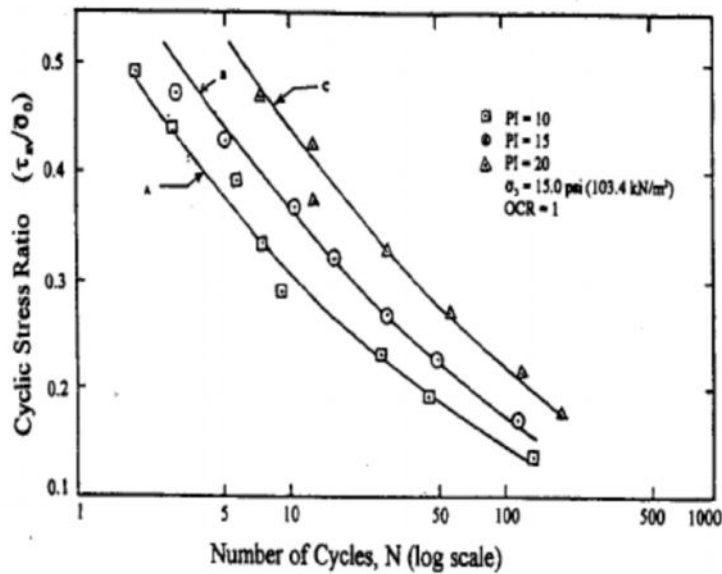


Figure I.7: Influence de l'indice de plasticité sur la résistance à la liquéfaction (Sandoval 1989; Prakash et Sandoval 1992)

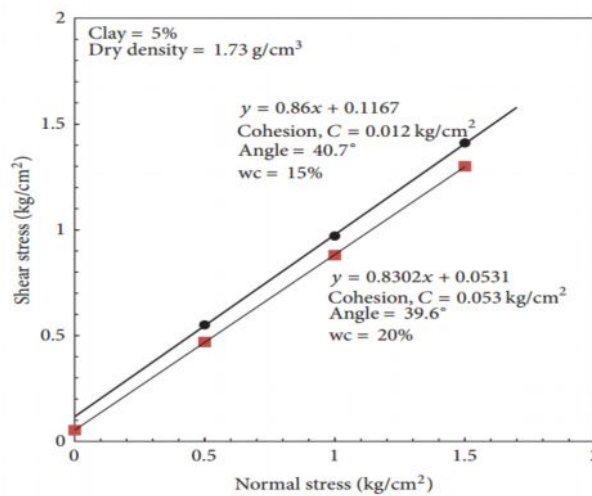




**Figure I.8:** Influence de l'indice de plasticité sur la résistance à la liquéfaction (Puri 1984)

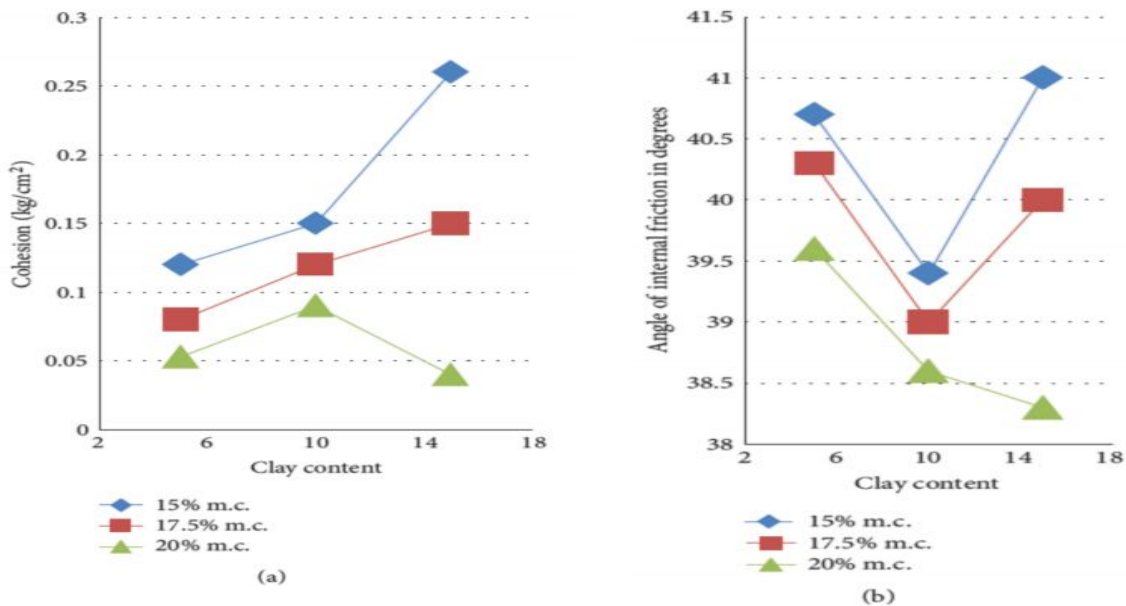
**I.3.2.4. Effet de la teneur en eau**

Hamidi et al. 2009, ont trouvé que les pentes sont approximativement semblables mais interceptent l'axe horizontal à des points variables. Les changements dans l'intersection des pentes de dilatation sont observés en raison de l'augmentation de l'humidité 20%. Ce changement est négatif (moins de 15% d'interception d'humidité) pour la normale contrainte de 0.5. La même comparaison est appliquée aux mélanges de sable argileux de teneur en argile variable. On trouve les tendances générales concernant la teneur en argile typique pour toutes les proportions sauf pour la grandeur du changement (Figure I.9).



**Figure I.9:** Contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale pour le mélange sable-argile (Hamidi et al. 2009)

D'après Dafalla (2013), la figure I.10 présente l'influence de la teneur en argile sur l'angle de frottement et la cohésion. L'angle de frottement interne a donné une valeur minimale de 10% de teneur en argile pour les mélanges non-mouillés, moins de 38 degrés pour un mélange argilo-sable de 20% d'humidité contenu. Le mélange de sable à l'argile humide à 20% de la cohésion et de l'angle de frottement interne lorsque le contenu en argile est élevé. L'argile pure n'est pas tracée sur le graphe, mais la chute de l'angle de frottement interne est de près de 14% moins lorsque l'humidité est augmentée de 30 à 40% associée à une cohésion de 1.13 à 0.61g/cm<sup>2</sup>, respectivement.

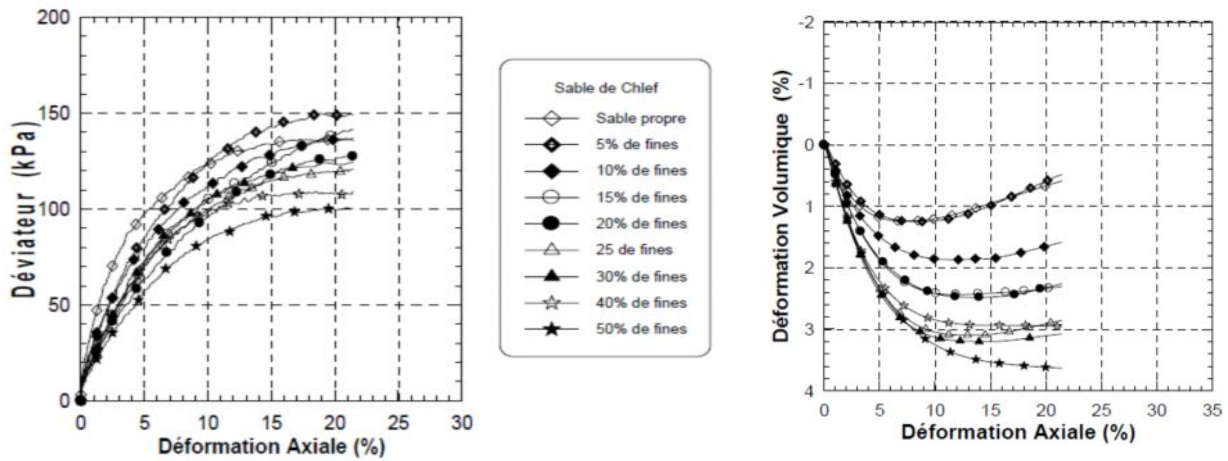


**Figure I.10:** Influence de la teneur en argile sur l'angle de frottement et la cohésion (Dafalla 2013).

### I.3.3. Influence des fines non plastiques

#### I.3.3.1. Essais drainée

D'après Arab et al. 2008, la figure I.11 montre les résultats des essais de compression drainée réalisés pour des fractions des fines comprises entre 0 (sable propre) et 50%. On remarque que la fraction des fines affecte d'une manière sensible les variations du déviateur et de la déformation volumique. L'augmentation de la teneur en fines induit une réduction de déviateur de contrainte du sol-limoneux (le déviateur décroît de 150 à 100kPa quand la fraction des fines croît de 10 à 50%), ceci se traduit par un effet important sur le comportement volumique qui se manifeste par une amplification de la phase de contractance lorsque la fraction des fines augmente.



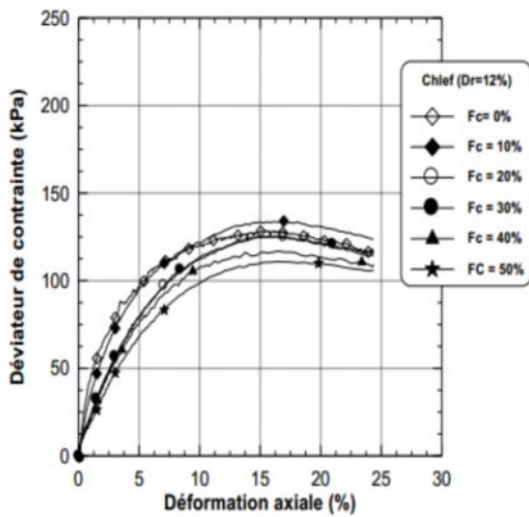
**Figure I.11:** Influence de la teneur en fines sur la réponse drainée du mélange sable-limon (Arab 2008)

D'après Belkhatir et al 2010 les figures I.12a, I.13a et I.14a montre les résultats des essais en compression drainée réalisés pour des fractions de fines comprises entre zéro (sable propre) et 50% pour les trois densités relatives initiales ( $D_r = 12, 50$  et  $90\%$ ). On remarque en générale que la fraction des fines affecte d'une manière sensible les variations du déviateur et de la déformation volumique pour les trois états de sol lâche, moyennement dense et dense. En effet, l'augmentation de la fraction des fines entre 0 et 50% induit une diminution de la résistance à la liquéfaction du sol (déviateur maximal). Concernant la déformation volumique on observe en général que le sable propre et les échantillons à faible fraction des fines ( $F_c < 30\%$ ) présentent une phase de contractance suivie d'une phase de dilatance.

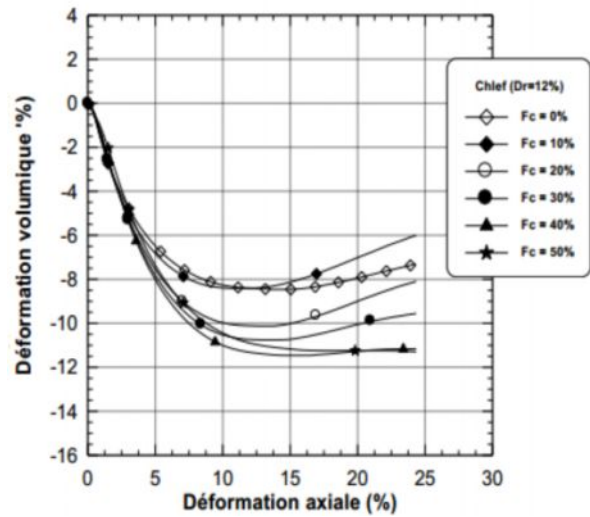
Pour le sol lâche, le sable propre et l'échantillon à 10% de fines la phase de dilatance apparaît à partir de 12% de déformation axiale, tandis que pour les échantillons ayant une teneur en fines de 20 à 30% la dilatance est retardée et apparaît à partir d'une déformation axiale de 13%.

Pour les échantillons avec une teneur en fines de 40 et 50%, on observe uniquement une phase de contractance (Figure I.11.b). Concernant la série des échantillons moyennement dense; pour le sable propre et l'échantillon à 5% de fines, la phase de dilatance apparaît à partir de 8% de déformation axiale, tandis que pour les échantillons ayant une teneur en fines de 10 à 30% la dilatance est retardée et apparaît à partir d'une déformation axiale de 13%. Pour les échantillons avec une teneur en fines de 40 et 50%, on observe uniquement une phase de contractance (Figure I.12.b). Pour les échantillons à l'état dense, on constate que la présence des fines retarde d'une manière significative l'apparition de la phase de dilatance. En effet, la dilatance apparaît après 4.5, 5, 6 et 10% pour les teneurs fines  $F_c = 0, 10, 20$  et  $30\%$  respectivement; au-delà de cette teneur en fines on observe qu'une phase de contractance (Figure I.13.b).



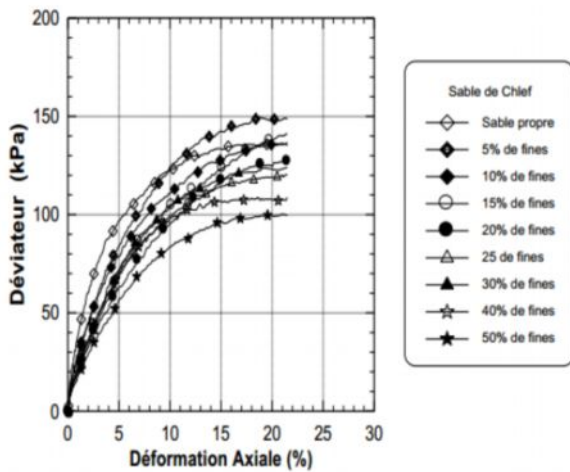


(a)

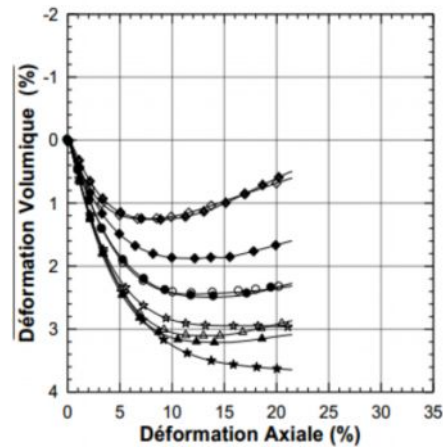


(b)

Figure I.12: Influence de la teneur en fines sur la réponse drainée du mélange sable-limon ( $\sigma'_3 = 100\text{kPa}$ ,  $D_r = 12\%$ ) (Belkhatir et al 2010)

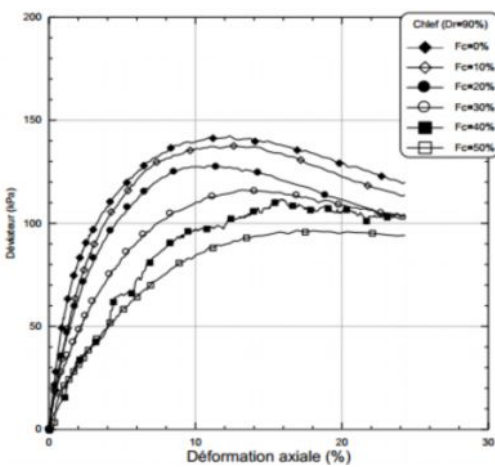


(a)

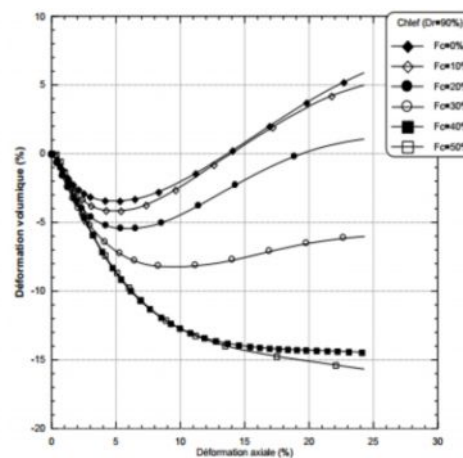


(b)

Figure I.13: Influence de la teneur en fines sur la réponse drainée du mélange sable-limon ( $\sigma'_3 = 100\text{kPa}$ ,  $D_r = 50\%$ ) (Belkhatir et al 2010)



(a)



(b)

Figure I.14: Influence de la teneur en fines sur la réponse drainée des mélanges sable-limon ( $\sigma'_3 = 100\text{kPa}$ ,  $D_r = 90\%$ ) (Belkhatir et al 2010)

I.3.3.2. Essai non drainée

D’après Arab et al.2008, les figures I.15 à I.17 montrent les résultats des essais réalisés pour différentes des fractions des fines sur un mélange sable-limon à trois confinements (100, 50 et 20kPa). Les résultats de ces trois essais confirment ceux des essais drainés, à savoir que l’augmentation de la fraction des fines se traduit par une amplification de la pression d’eau (due à l’amplification de la contractance) et par conséquent par une réduction du déviateur mobilisé (résistance non drainée). Ce résultat est observé pour les trois confinements et pour les fractions des fines étudiées dont la valeur maximale est égale  $F_c = 50\%$ .

Le chemin de contrainte montre clairement le rôle des fines dans la diminution la résistance au cisaillement et la pression moyenne effective qui induit une augmentation de la pression interstitielle.

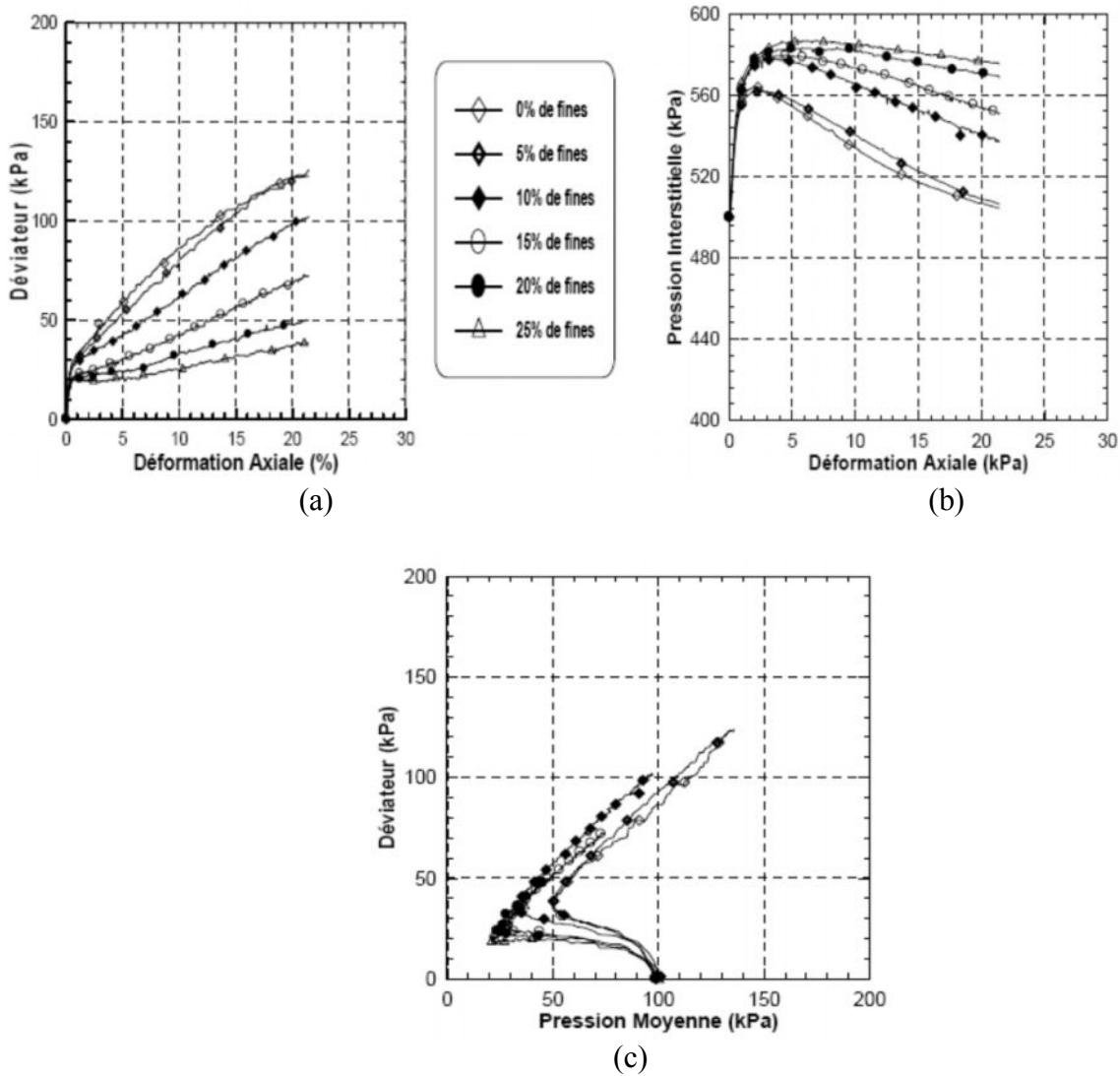
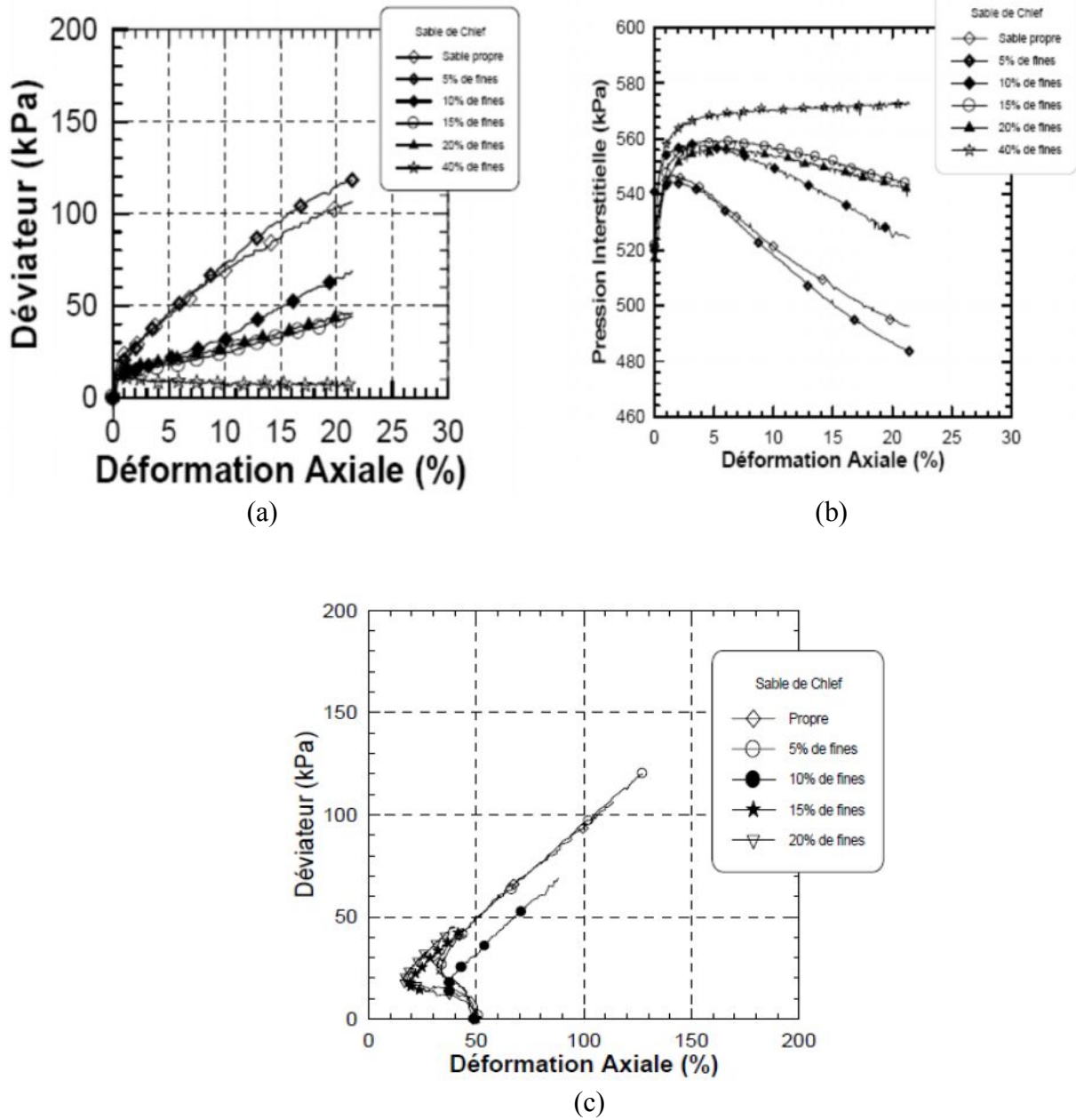
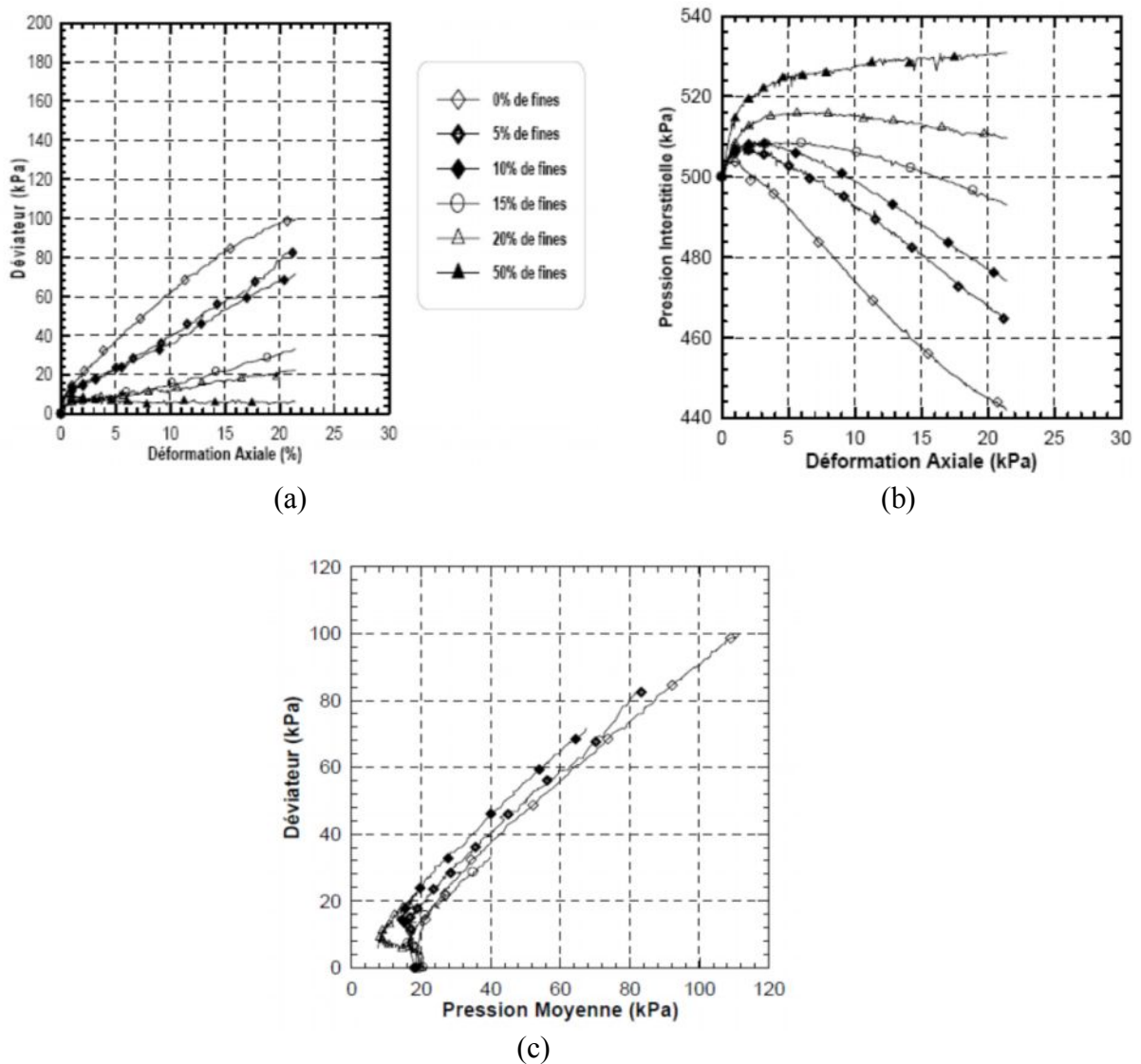


Figure I.15: Influence de la teneur des fines sur la réponse non drainée d’un mélange sable-limon ( $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$ ) (Arab 2008)



**Figure I.16:** Influence de la teneur des fines sur la réponse non drainée d'un mélange sable-limon ( $\sigma'_3 = 50\text{kPa}$ ) (Arab 2008)



**Figure I.17:** Influence de la teneur des fines sur la réponse non drainée d'un mélange sable-limon ( $\sigma'_3 = 20\text{kPa}$ ) (Arab 2008)

D'après Belkhatir et al 2010 les figures I.18, I.19 et I.20 montrent les résultats des essais non drainés réalisés pour différentes valeurs de la fraction des fines (entre 0 et 50%) à une pression de confinement initial de 100kPa pour les trois états étudiés à savoir l'état lâche, moyennement dense et dense. On observe en général que l'augmentation de la fraction des fines conduites à une augmentation de la pression d'eau (Figures I.18b, I.19b et I.20b). Cette augmentation résulte du rôle des fines dans l'augmentation de la contractance des mélanges observés lors des essais drainés. L'augmentation de la pression interstitielle induit une réduction de la contrainte effective de confinement et par conséquent une réduction de la résistance à la liquéfaction des mélanges (déviateur au pic) comme le montre les figures I.18a, I.19a et I.20a. Ces résultats sont en accord avec les observations de Shen et al. (1977) et de Troncoso et Verdugo (1985).

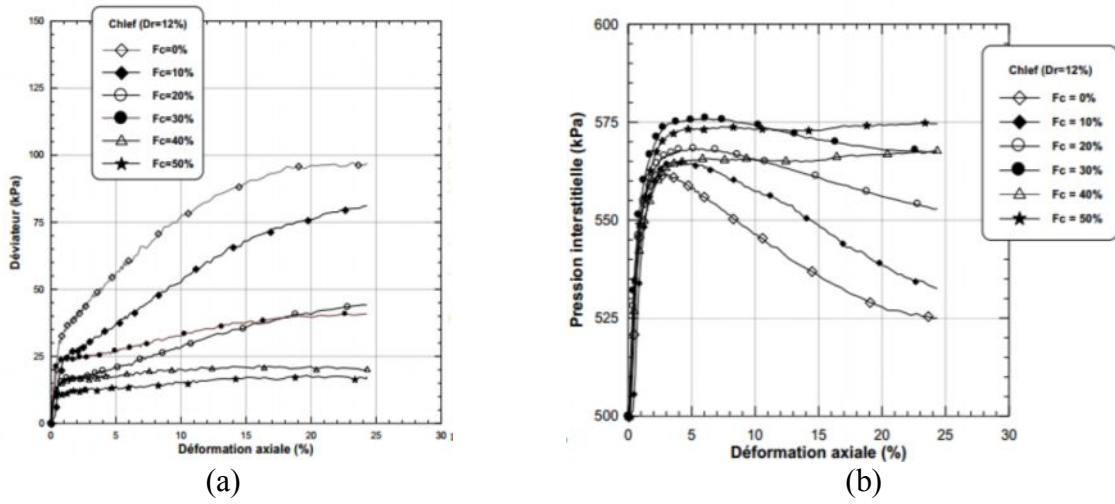


Figure I.18 : Influence de la teneur en fines sur le comportement non drainé des mélanges sable limon ( $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 12\%$ ) (Belkhatir et al 2010)

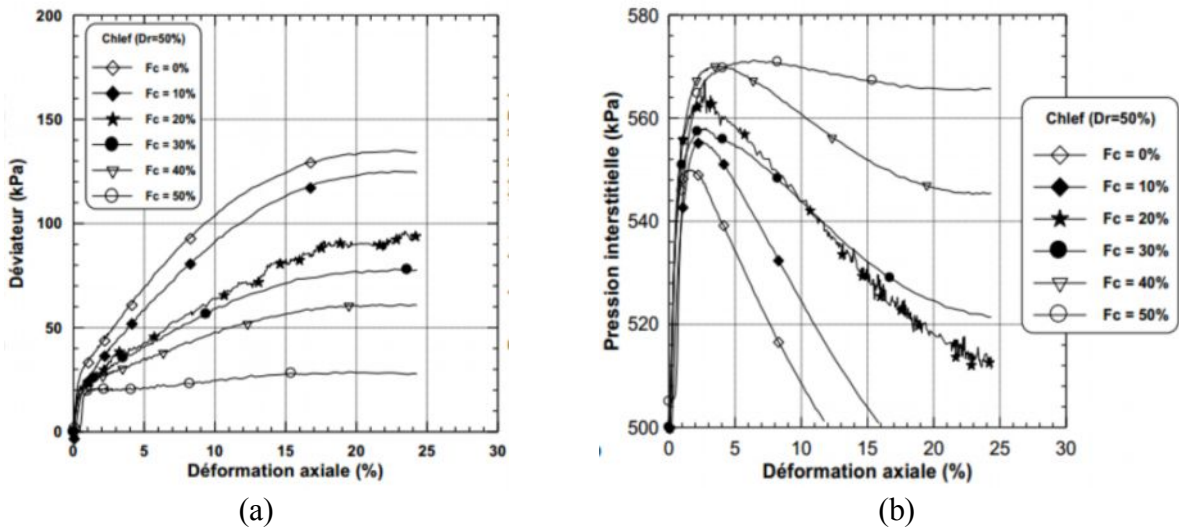


Figure I.19 : Influence de la teneur en fines sur le comportement non drainé des mélanges sable-limon ( $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 50\%$ ) (Belkhatir et al 2010)

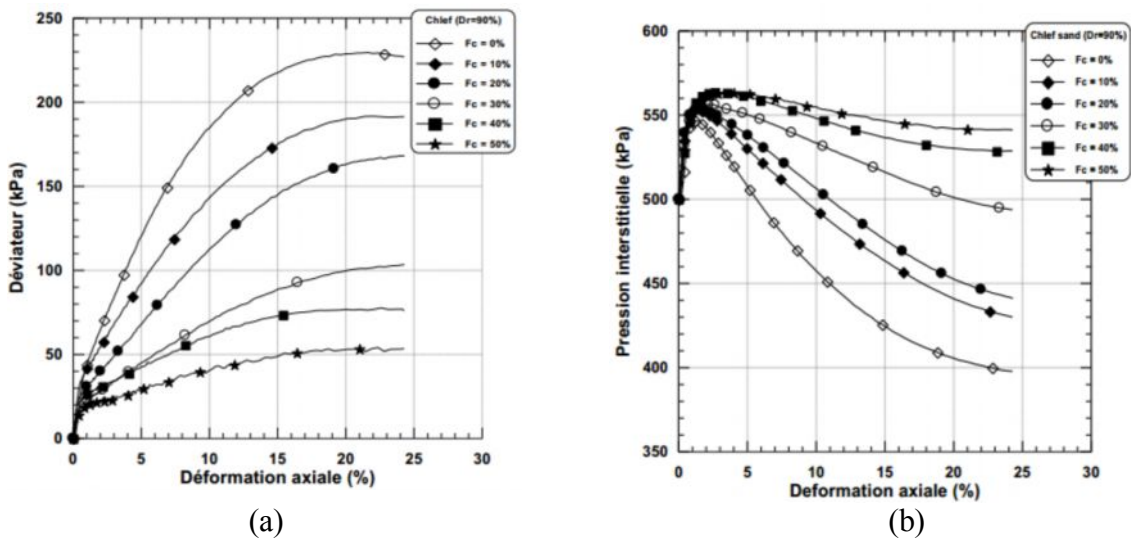
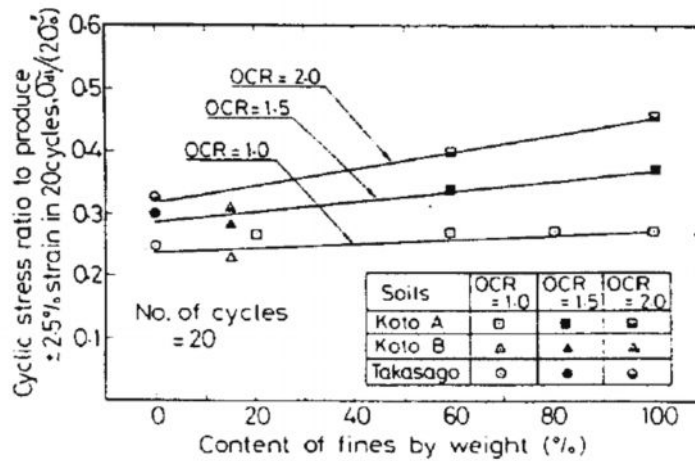


Figure I.20: Influence de la teneur en fines sur le comportement non drainé des mélanges sable-limon ( $\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$ ,  $D_r = 90\%$ ) (Belkhatir et al 2010)

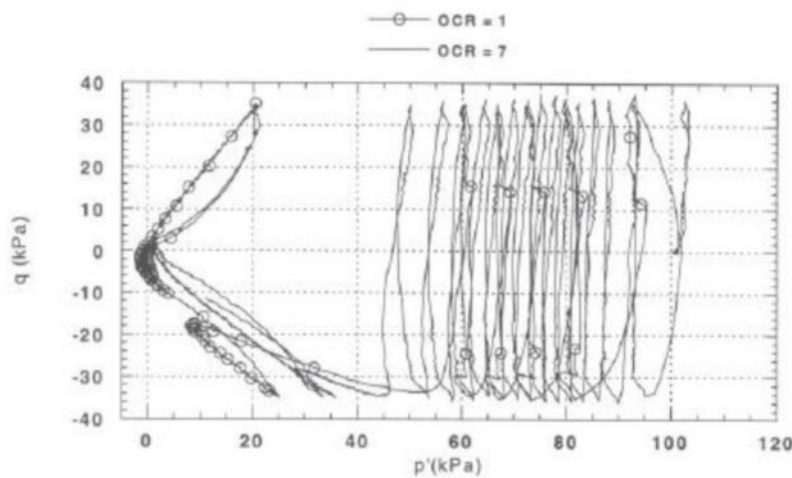


**I.3.4. Influence de la surconsolidation**

Plusieurs chercheurs ont montré que le rapport de surconsolidation a un effet significatif sur la résistance à la liquéfaction des sols (Ishihara et Takutsu 1979, Seed et al 1975, Seed et Peacock 1971). La figure I.21 montre les résultats obtenus par Ishihara et al (1978) sur des sols ayant différentes teneurs en éléments fins. On constate que la résistance à la liquéfaction augmente avec le rapport de surconsolidation. Cet effet s'accroît avec l'augmentation du pourcentage d'éléments fins. En réalisant des essais cycliques sur le sable d'Hostun, Bouferra (2000) a trouvé qu'avec un coefficient de surconsolidation de 7, la liquéfaction est obtenue au bout de 17 cycles, alors qu'avec un échantillon normalement consolidé, il fallait 6 (six) cycles pour obtenir la liquéfaction (Figure I.22).

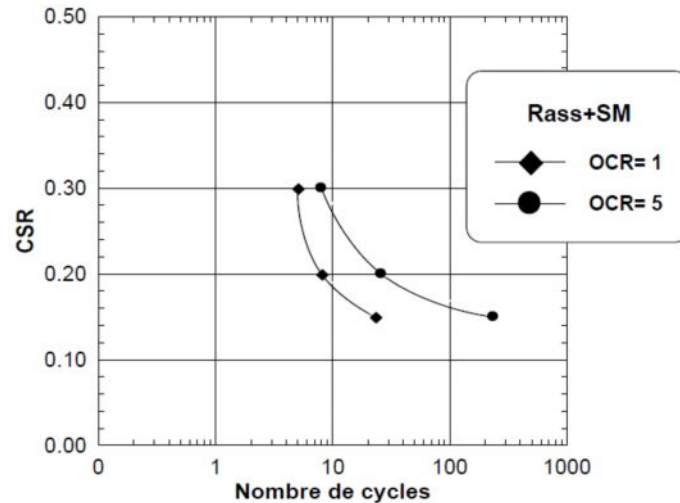


**Figure I.21:** Influence de la sur consolidation sur la résistance à la liquéfaction des sols (Ishihara et Takutsu 1979)



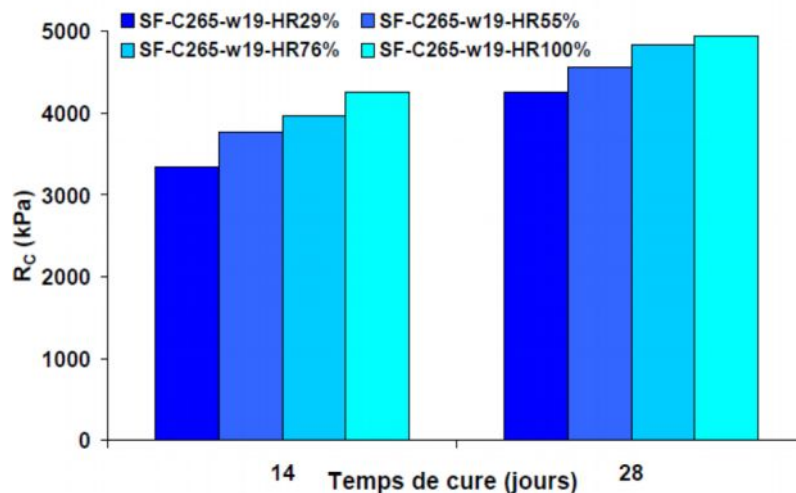
**Figure I.22:** Influence de la surconsolidation sur le comportement cyclique du sable d'Hostun (Bouferra et al.2000)

La figure I.23 montre l'influence de la surconsolidation sur le potentiel de liquéfaction. Elle confirme bien les résultats présentés ci-dessus par Arab (2008), à savoir que la surconsolidation du sol augmente leur résistance à la liquéfaction sur des échantillons de sable de Rass (Chlef). Ceci est dû au fait que la surconsolidation amplifie le caractère dilatant des sols, ce qui a pour effet d'atténuer le taux d'augmentation de la pression d'eau sous chargement non drainé.



**Figure I.23:** Influence de la surconsolidation sur le potentiel de liquéfaction du mélange sable de Rass-limon Sidi M'hamed (SM) ( $F_c = 10\%$ ) (Arab 2008)

La figure I.24 présente les résistances obtenues pour chacun de ces mélanges à 14 et 28 jours. On observe une chute constante et graduelle de la résistance avec la chute de l'humidité Relative. Cela peut s'expliquer par un problème d'hydratation du ciment: En effet, celle-ci ne peut plus se faire de façon optimale et la résistance chute.



**Figure I.24:** Comparaison des résistances obtenues à 14 et 28 jours en fonction des conditions de cure (Fabien Szymkiewicz 2011)

**Conclusion**

Ce chapitre consiste à étudier l'amélioration de la résistance des sols en utilisant les différents types des fines, tels que les fractions des fines plastiques et non plastiques. De nombreux essais ont été réalisés sur des mélanges sable-limon et sable argile permettant de connaître l'influence de la teneur en fines ainsi que la teneur en eau sur les caractéristiques des sols. Les résultats montrent qu'il existe des controverses pour la résistance à la liquéfaction. Tandis que le temps de cure a un rôle très important sur comportement mécanique des mélanges.