

2.1. Introduction

Un sol soumis à différentes sollicitations externes peut produire plusieurs types de réponses caractéristiques de son comportement vis-à-vis de ces sollicitations, parmi ces comportements on peut citer notamment: la résistance au cisaillement et la résistance au phénomène de liquéfaction.

La résistance au cisaillement d'un échantillon, dépend de plusieurs paramètres. Parmi les principaux paramètres on peut citer: l'histoire des contraintes et des déformations, le degré de saturation, le confinement, la granulométrie et la présence des fines. Ce dernier constitue un paramètre important dans le comportement des sables. Cependant, son effet sur la résistance au cisaillement reste lié à l'indice de plasticité des fines et soulève bien des divergences d'opinion.

2.2. Influence des fines sur le comportement d'un sol

Initialement, la recherche sur la liquéfaction a été axée sur les sables propres uniformes, ne contenant pas de fines (Seed et Idriss, 1971). Cependant, plusieurs évidences empiriques ressortant des observations suite à des liquéfactions qui se sont produites et dont les résumés de leurs résultats sont donnés dans le Tableau 2.1. Les caractéristiques des sols liquéfiés montrent clairement l'influence des fines sur leurs comportements vis-à-vis de ce phénomène.

Année	Lieu	Sources	Caractéristiques des sols liquéfiés
1907	Wachusett (Etat unis)	Olsen et al. (2000)	Environ 5-10% de limon
1964	Niigata (japon)	Kishida (1969)	70% de fines et 10% de fraction d'argile
1968	Tokachi (Japon)	Tohno et Yasuda (1981)	90% de fines et 18% de fraction d'argile
1971	San Fernando (E.U)	Seed et al. (1989)	Sables limoneux
1974	Alberta (canada)	Plewes et al. (1989)	Liquéfaction statique avec 10-15% de teneur en fines
1976	Tangshan (Chine)	Wang (1979)	20% de fraction d'argile
1978	Mochikoshi (Japon)	Ishihara et al. (1990)	Sable limoneux ($F_C \approx 50\%$ fines)
1983	Idaho (E.U)	Youd et al. (1985)	70% de fines et 20% de fraction d'argile
1983	Nerlerk (canada)	Sladen et al. (1985)	Liquéfaction statique du sable limoneux du remblai de Nerlerk (12% de fines)
1991	Sullivan (Canada)	Davies et al. (1998)	Liquéfaction statique d'un sable limoneux ($F_C > 50\%$)
1993	Hokkaido (Japon)	Miura et al. (1995)	48% de fines et 18% de fraction d'argile
1994	Merriespruit (A. de sud)	Fourie et al. (2001)	Liquéfaction statique d'un sable limoneux ($F_C > 50\%$)
1999	Chichi (Taiwan)	Ku et al. (2004)	Teneur en fines de 36% à 53%
1999	Adapazari (Turquie)	Bray et Sancio (2006)	70% fines avec une plasticité de 0 à 25
2009	Olancha (E.U)	Holzer et al. (2010)	Teneur en fines de 15±8%
2010	Christchurch (N. Zélande)	Ward et al. (2010)	Fines grises d'un sable limoneux

Tableau 2.1: Observations et résultats des sols susceptibles à la liquéfaction

Des études en laboratoire ont montré que l'augmentation de la teneur en fines dans un sable augmente la résistance à la liquéfaction (Amini et Qi 2000; Seed et al. 1985; Belkhatir et al. 2012, 2013), tandis que d'autres résultats montrent qu'elle diminue la résistance à la liquéfaction des sables (Lade et Yamamuro, 1997; Zlatovic et Ishihara, 1997; Chien et al. 2002; Xenaki et al. 2003; Bayat et al. 2014; Rahman et al. 2014). D'autres ont trouvé que la résistance à la liquéfaction

diminue initialement jusqu'à une certaine teneur en fines puis elle réaugmente avec l'augmentation de cette teneur (Bouferra et Shahrour, 2004; Polito et al. 2001; Wang 2010; ChoySoon Tana et al. 2015).

Le rôle des fines par rapport au potentiel des sols à la liquéfaction est un sujet très étudié, mais les résultats des recherches sont controversés. D'après ces recherches, la présence des fines peut soit augmenter ou diminuer la susceptibilité à la liquéfaction. Les chercheurs ont lancé leurs recherches pour caractériser les effets des fines sur le comportement des sols vis à vis de ce phénomène. Suite aux séismes de Haichang en 1975 et celui de Tangshan en 1976, Wang (1979) a pu établir des critères pour identifier la susceptibilité des sols à la liquéfaction. Les critères chinois ont connus des révisions et des modifications dont le processus d'évolution a été résumé par Marto et Tan (2012). Néanmoins, des nouvelles preuves montrent une certaine insuffisance et une déviation de ces critères chinois vis-à-vis de la présence des fines. Beaucoup d'interrogations sont émises concernant ces critères et de nombreux chercheurs ont signalé la nécessité de les réexaminer dans un contexte plus large (Prakash et Puri, 2010). La plupart des chercheurs ont préféré s'en tenir à l'hypothèse de départ qui est la limite d'Atterberg et qui est considérée comme le meilleur indicateur pour identifier la susceptibilité des sols à la liquéfaction. Le Tableau 2.2 récapitule le développement des critères de la susceptibilité à la liquéfaction depuis l'introduction des critères chinois en 1979.

Chercheurs	Critères			
	Fraction d'argile (%)	Limite de liquidité (%)	Indice de plasticité (%)	Teneur en eau
Wang (1979)	15 - 20	21-35	4-14	> 0.90
Seed et Idriss (1982)	< 15	< 35	-	> 0.90
El Hosri et al. (1984)	< 20	-	< 10	-
Finn (1991)	< 20	< 33.5	< 13	> 0.87
Youd (1998)	-	< 35	< 7	-
Andrew et Martin (2000)	< 10	< 32	-	-
Polito (2001)	-	< 25	< 7	-
Seed et al. (2003)	-	< 37	< 12	> 0.80
Bray et Sancio (2006)	-	-	< 12	> 0.85
Muhunthan et Worthen (2011)	Caractérisation à travers le diagramme de stabilité (η , LLs)			
Lee et al. (2013)	Notion de phase introduite, basée sur le changement de la teneur en eau			

Tableau 2.2: Evolution des critères de susceptibilité à la liquéfaction

F_{thre} est le seuil des fines dans le mélange ou le contenu transitoire des fines qui caractérise la prédominance du comportement des fines. Ainsi, la valeur de F_{thre} est définie par le point où la tendance du comportement s'inverse avec une augmentation de la teneur en fines.

La figure 2.1 proposée par Lade (2012) montre le comportement de transition des structures hétérogènes (sable-fines) entre une dominance des sables ou de fines. Il est important de mentionner que le comportement des mélanges sables-fines est en fonction de la valeur de la teneur en fines F_{thre} . Plusieurs valeurs de F_{thre} ont été proposées, mais la plupart des chercheurs (Derakhshandi et

al., 2008) ont conclu que la teneur en fines ne doit pas dépasser 30%. Les observations précédentes in-situ ont montré une harmonie avec cet argument car la plupart des sols qui ont liquéfié avaient une teneur en fines inférieure à 30%.

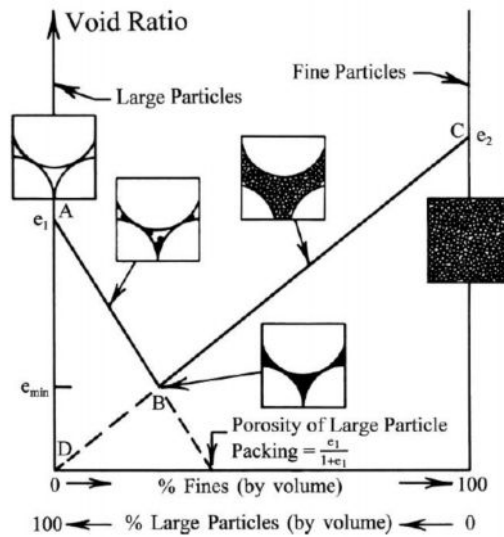


Figure 2.1 Diagramme schématique des valeurs limites de la teneur en fines (Lade, 2012)

Néanmoins, les recherches actuelles suite aux essais en laboratoire et les explorations sur site sont un peu conflictuel (Tableau 2.3).

Relations (quand la teneur en fines croît)	Année	Chercheurs	Domaine de recherche/ résultats/ remarques
Plus liquéfiable	1997	Lade et Yamamuro	Présence des fines crée une structure très compressible
	2009	Beroya et al.	Minéraux argileux contrôlent le comportement cyclique
Moins liquéfiable	2001	Youd et Idriss	Graphe empirique globalement utilisé
	2006	Gratchev et al.	Démontrent l'influence de la plasticité
	2010	Maheswari et Patel	Effet de la teneur en limon dépend de la densité relative
	2013	Chen et Xiao	Analyse après le séisme de 2008
Transition de plus à moins liquéfiable	2010	Abedi et Yasrobi	Teneur en fines critique de 10% à 15%
	2011	Baziar et al.	Transition des fines de 10% à 15%
	2012	Lade	Localisation initiale des fines est le facteur principal
	2012	Wang et al.	Recherche seulement sur la fraction d'argile

Tableau 2.3 Résumé des résultats sur les relations entre les fines et la susceptibilité à la liquéfaction

Les informations obtenues actuellement regroupent les fines plastiques et non plastiques dans la même catégorie des sols granuleux fins sans prendre en considération l'effet de la cohésion dans

leurs comportements. Cela peut fausser l'interprétation des résultats car le comportement des contraintes et de la résistance des limons varie de ceux des argiles.

La Figure 2.2 illustre le comportement de transition des sols granuleux fins. Le comportement type des sols granuleux peut être classé comme similaire au sable ou similaire à l'argile à partir de la valeur limite de l'indice de plasticité qui est égale à 7 (Boulanger et Idriss, 2006). Par conséquent, deux points doivent être bien distingués afin d'expliquer ces tendances apparemment contradictoires, l'effet des fines non plastiques qui influencent la composition de la structure et l'effet des fines plastiques qui maintiennent la pression interstitielle.

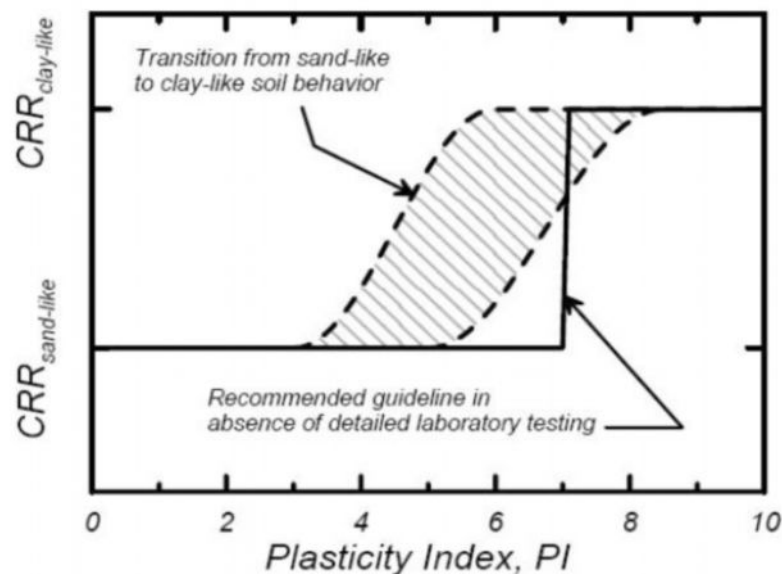


Figure 2.2 Comportement de transition type des sols granuleux de similaire au sable ou similaire à l'argile (Boulanger et Idriss, 2006)

De nombreux chercheurs ont étudié l'effet des fines non plastiques tandis que d'autres ont examinés la manière dont les fines plastiques influencent la susceptibilité à la liquéfaction mais ces recherches s'avèrent légèrement conflictuelles. Une discussion sur les divergences constatées dans la littérature sera donnée sans viser d'établir une harmonisation entre les différentes études. Les résultats des recherches similaires sont regroupés en conséquence sur l'organigramme de la Figure 2.3. Des recherches en laboratoire ont étudié l'influence de la teneur en fines à travers les caractéristiques du sol telles que l'indice des vides, densité relative, etc. Certaines études ont conclu que la présence de fines diminue le potentiel à la liquéfaction tandis que d'autres ont conclu le contraire. Ces conclusions controversées (Yamamuro et Lade, 2012) sont dues essentiellement à la grande variation de la base des données et particulièrement les caractéristiques du sol étudiées.

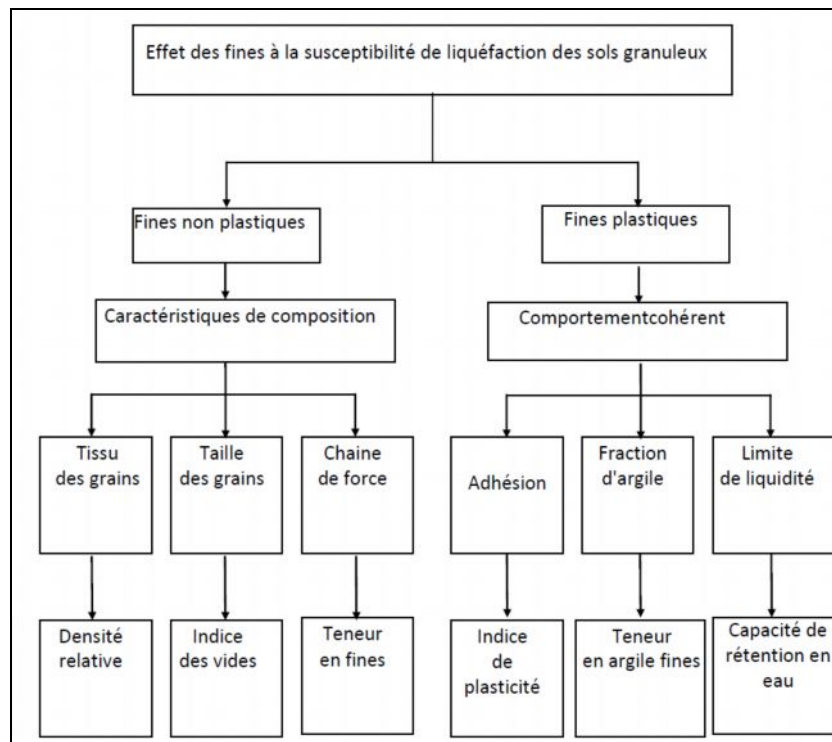


Figure 2.3 Vue d'ensemble du rôle des fines à la susceptibilité de liquéfaction des sols

Un des exemples classiques est le limon. Il se situe entre les sols à haute susceptibilité à la liquéfaction (sable) et les sols non susceptibles à la liquéfaction (argile). Les observations au laboratoire et celles sur le terrain sont complètement opposées. Au laboratoire, la présence de limon crée une structure exceptionnellement élevée en grains compressibles sous faibles pressions de confinement (Lade et Yamamuro, 1997). Le comportement contractif est plus apparent avec une augmentation de la teneur en limon ce qui signifie qu'il est plus liquéfiable que le sable propre lui-même. D'autre part, la courbe empirique établie suite aux essais standards de pénétration in situ (Seed et Idriss, 1971) a montré que le mélange sable-limon a une plus haute résistance à la liquéfaction que le sable propre. Bien que la courbe a été reproduite et révisée avec des données supplémentaires, il n'existe pas d'explication claire pour décrire cette divergence.

Le tissu des grains est un indicateur de la présence des fines dans les sols. Les chercheurs ont conclu qu'il existe une teneur en fines critique (F_{cr}) où les grains fins se comportent comme le sable (Baziar et al. 2011). D'autre part, Thevanayagam et Martin (2002) ont mis au point un système de classification des sols afin de définir la microstructure des sols à matrice de sable (Figure 2.4).

Il existe quatre cas pour décrire la microstructure du mélange sable-fines à travers ces diagrammes de phases. L'ajout des particules fines contribue au remplissage des vides intergranulaire entre les grains du sable et aussi à la formation des contacts métastables entre les grains, ce qu'il va desserrer le squelette du sable.

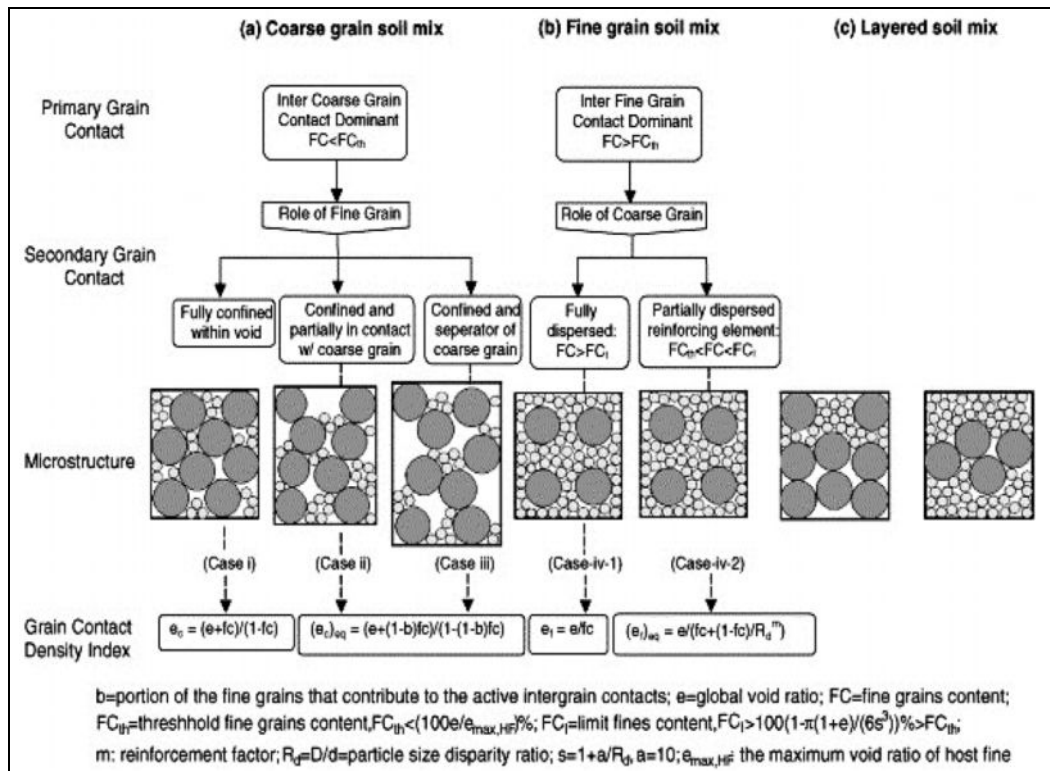


Figure 2.4 Classification de tissu de grain dans les sols de la matrice de sable (Thevanayagam et Martin, 2002)

L'emplacement initial des particules fines dans les grains de sable joue un rôle important dans le comportement contrainte-déformation (Lade, 2012). Théoriquement, les différentes méthodes de dépôt produisent des spécimens qui maintiennent la compressibilité des contacts de grain de la structure variable jusqu'au temps où le cisaillement commence, avec la même teneur en fines et la même densité. Les mélanges sable-fines peuvent être déposés dans la configuration dense qui est plus dilatante, ou moins liquéfiable ou vice versa. Il existe plusieurs méthodes de dépôt comme celle du dépôt sec à l'entonnoir, de la sédimentation sous l'eau, du dépôt par damage humide, etc.

Compte tenu de la variation de la taille des grains qui crée des vides entre eux, l'addition des fines modifie la chaîne interne des forces intergranulaires. Les caractéristiques techniques du sol, tels que le comportement contraintes-déformations et la résistance à la liquéfaction dépendent des forces de la chaîne qui sont créés par les contacts intergranulaires (sable-fines).

Si les fines remplissent les vides entre les grains du sable, la configuration dense sera formée. Les particules fines ont tendance à se coller les unes aux autres de telle façon que le grain grossier produit leurs forces de frottement (Yamamuro et Lade 2012) et donc augmenter la résistance à la liquéfaction. À l'opposé, les grandes particules fines non plastiques ne s'insèrent pas facilement dans les petits vides intergranulaires. Ces fines situées entre les grains du sable non seulement augmentent la compressibilité du sol, mais aussi délocalisent les grains du sable et par conséquent,

les fines se détachent d'une manière significative du squelette du sable et ces sols auront plus tendance à se liquéfier. Le Tableau 2.4 collecte les différentes définitions des indices de vides utilisés dans la littérature.

Indice de vides	Définition	Remarques
Global	$e = \frac{V_s}{V_v}$	Le rapport du volume des vides au volume total
Squelette	$e_{\text{skeleton}} = \frac{V_T G_s \rho_w - (M - M_F)}{M - M_F}$	Vides créés par le squelette du sable, le comportement est contrôlé par le squelette du sable seulement
Intergranulaire	$e_s = \frac{e + (F_c/100)}{e - (F_c/100)}$	Les fines remplissent les vides mais elles ne sont pas prises en compte
Equivalent	$e^* = \frac{e + \alpha F_c}{1 - \alpha F_c}$	une fraction de fines participe dans la chaîne de force

Tableau 2.4 Différentes définitions des indices de vides

La teneur en fines plastiques est l'indicateur principal de la susceptibilité à la liquéfaction des sols de la matrice du sable. En général, l'addition des matériaux plastiques dans les sols de la matrice du sable peut produire deux comportements opposés: (1) Réduction de la perméabilité et par conséquent une augmentation du taux d'accumulation de la pression interstitielle ou (2) le développement d'un caractère plus cohésif, d'où l'augmentation de la résistance à la liquéfaction.

Jusqu'à ce jour, les recherches sur la liquéfaction des sols argileux font encore défaut alors que la majorité de ces recherches se concentrent uniquement sur les sols kaoliniques. Il est évident et d'après les recherches précédentes que la force de liaison des montmorillonites est plus forte que la liaison de la kaolinite. Et c'est pour cette raison que la kaolinite est moins résistante à la liquéfaction comparée à l'illite et la montmorillonite (Beroya et al, 2009). Moss et Chen (2008) ont utilisés de différentes approches pour conclure que l'indice de plasticité (W_p) peut être un bon indicateur de la susceptibilité à la liquéfaction. Gratchev et al. (2006) ont donné trois avantages pour l'utilisation de cet indice de plasticité qui sont la simplicité, la mesurabilité et la validité.

Beaucoup de recherches ont été effectuées sur l'influence de la plasticité sur la résistance à la liquéfaction et diverses valeurs seuils d'indice de plasticité ont été proposées. Perlea (2000) a examiné les sols argileux plastiques de plusieurs sites suite à des séismes en Chine et il a constaté que les sols susceptibles à la liquéfaction ont un indice de plasticité compris entre 4 à 14. Seed et al. (2003) ont conclu que pour $I_p \leq 10$, le sol est susceptible à se liquéfier tandis que pour $10 < I_p < 12$ le sol rentre dans une gamme incertaine. Cependant, les valeurs seuils de ces indices de plasticité restent variables jusqu'à présent.

La conclusion la plus commune sur la relation entre la résistance à la liquéfaction et la plasticité est une courbe hyperbolique positive (Figure 2.5). Cette relation est validée par un ensemble d'essais au laboratoire sur des échantillons reconstitués et non remaniés, l'intervalle de la plasticité critique où la résistance à la liquéfaction est la plus basse se situe entre 4 à 5 (Guo et Prakash, 2000). En outre, Gratchev et al. (2006) ont introduit le concept de "pont d'argile" pour expliquer cette relation hyperbolique en utilisant une analyse micro-tissu de la structure.

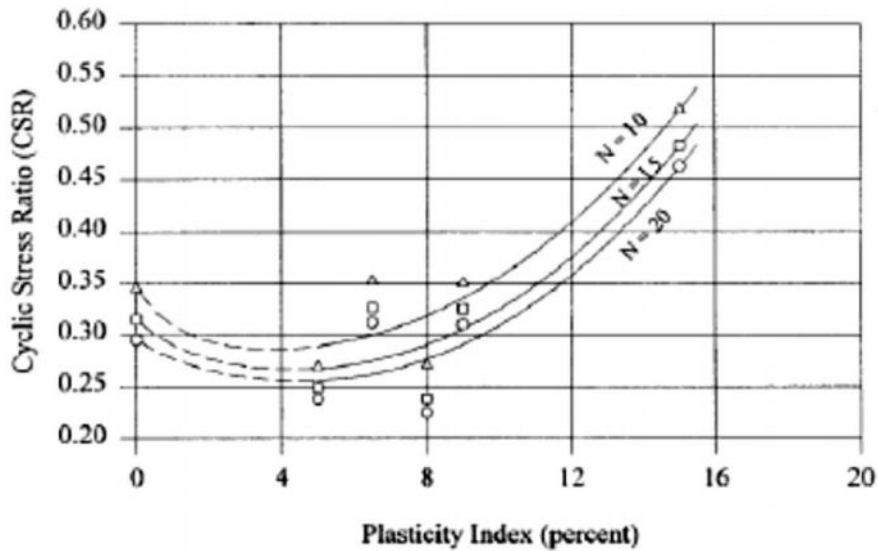


Figure 2.5 Susceptibilité à la liquéfaction en fonction de la plasticité des fines
(Guo et Prakash, 2000)

Des études récentes montrent une certaine divergence dans les résultats observés. Sous un pourcentage de fines constant de 10%, les résultats montrent que les sols de la matrice du sable sont plus liquéfiables quand l'indice de plasticité augmente (Park et Kim, 2012). En outre, les observations après le séisme de Wenchuan en 2008 montrent une relation proportionnelle entre l'indice de plasticité et la résistance cyclique au cisaillement des sols argileux (Chen et Xiao, 2013). La dépendance sur l'indice de plasticité seul est insuffisante si les autres facteurs influents ne sont pas pris en compte (la minéralogie de l'argile, le comportement de la microstructure, la chimie de l'eau interstitielle, etc.). La résistance à la liquéfaction diminue en premier lieu avec l'addition des fines plastiques, puis elle augmente en cas de dépassement en poids d'un certain pourcentage de fines. Les zones de transition pour les sables limoneux ont été rapportées différemment, mais la plupart des résultats montrent qu'elles se produisent entre 15% et 35% de teneur en fines plastiques (Ghahremani et Ghalandarzadeh, 2006). Ces zones de transition critique varient selon le type du sol étudié (granulométrie, caractéristiques intrinsèques, etc.).

Derakhshandi et al. (2008) ont effectué des déformations sous des essais triaxiaux cycliques contrôlés pour étudier l'effet des fines plastiques sur la génération de la pression interstitielle des sols à matrice de sable. Les résultats montrent que les échantillons ayant de 0% à 20% de fines plastiques ont plus de capacité de rétention d'eau comparée aux sables propres. Cependant, la génération de la pression interstitielle diminue lorsque les échantillons ont plus de 30% en teneur de fines plastiques. La génération de la pression interstitielle pour une teneur en argile inférieure à 20% est plus élevée car la teneur en argile diminue la conductivité de la perméabilité dans les sols à matrice de sable. Et contrairement, la présence des teneurs élevées en argile contribue seulement aux instabilités locales au sein de la structure granulaire.

La capacité d'orienter l'eau de rétention sur les surfaces des grains a marqué la différence du comportement cyclique des différents minéraux utilisés dans les essais. Les deux plans basiques de montmorillonite contribuent à des bonnes orientations d'eau en comparaison avec la kaolinite qui possède un seul plan de base. En raison de sa dimension assez grande, l'illite a une capacité d'absorption inférieure à la montmorillonite malgré leurs structures identiques.

En général, il existe encore une incohérence entre les critères des différents chercheurs concernant l'influence des fines sur la susceptibilité des sols à se liquéfier. De même pour les critères chinois qui s'appuient uniquement sur des interprétations simples issues des observations de quelques séismes survenus. Dernièrement, les chercheurs ont commencé à introduire les différents états de sols basés sur leur propre définition pour décrire le comportement à la liquéfaction des sols en incluant l'état critique, l'état d'équilibre de déformation, l'état quasi-stable, l'état d'instabilité, etc.

2.2.1. Effet des fines sur l'indice des vides de consolidation

Pitman et Roberston (1994) ont réalisé des essais triaxiaux sur du sable d'Ottawa (C-109) mélangé avec des fines plastiques (Kaolin) et non plastiques (sable fin concassé 70-140 Silica). La figure 2.6 montre les variations d'indice des vides durant la consolidation avec l'augmentation de la fraction des fines pour trois séries. Les diverses courbes représentent les différents niveaux de contrainte des échantillons à la fin de la phase de consolidation, les échantillons ont été préparés avec un indice des vides constant. On observe un changement prononcé pour le sable mélangé avec du Kaolin par rapport au sable concassé 70-140 Silica. Ce comportement peut être expliqué par le fait que le Kaolin est plus compressible, et, pouvant se déformer autour des grains de sables incompressibles (Ottawa Sand) et permettra un arrangement plus étroit du mélange de sable- fines. La courbe de variation d'indice des vides en fonction de la teneur fines pour le sable fin 70-140 Silica est presque horizontale, cela peut être expliqué par le fait que les échantillons ont subi peu de changement de volume pendant la saturation et les étapes de consolidation; on note aussi que l'indice des vides

initial et après consolidation sont les mêmes. Il est à noter que l'indice des vides de consolidation (e_c) est supérieur à l'indice des vides maximal pour le sable fin 70-140 Silica (e_{max} étant déterminé avec une teneur supérieure à 10% de fines). Il est à noter que l'indice des vides après saturation diminue avec l'augmentation des fines jusqu'à une valeur de 20% et il augmente pour des valeurs plus grandes de teneur en fines. La valeur minimale de l'indice des vides coïncide avec l'apparition du début de changement du comportement du sol dont la matrice est contrôlée principalement par les fines.

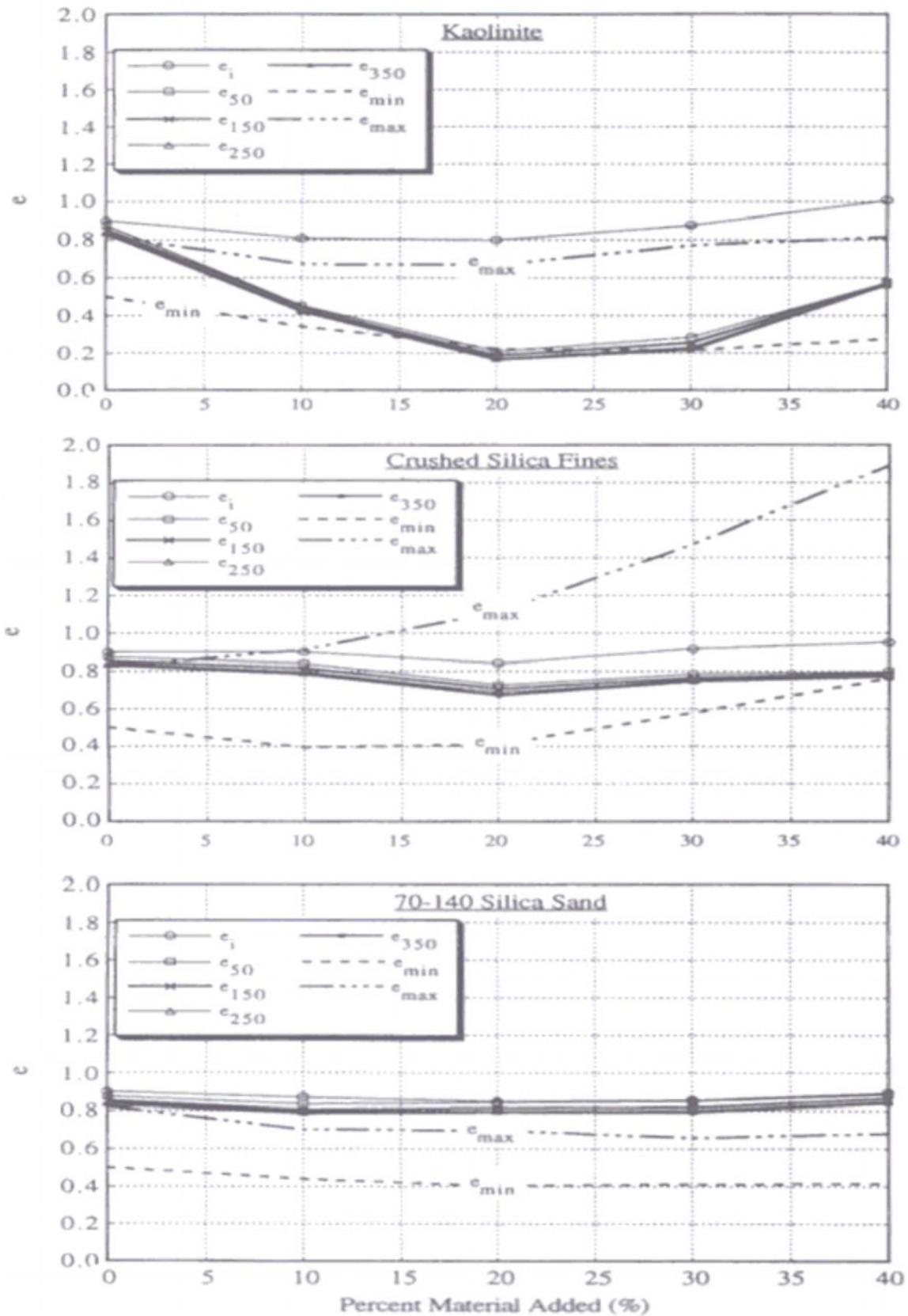


Figure 2.6 Variation de l'indice des vides durant la consolidation en fonction de la teneur en fines (Pitman et Roberston 1994).

2.2.2. Effet des fines sur les indices des vides minimal et maximal (e_{\min} et e_{\max})

En étudiant les propriétés du sable de Brenda, Kuerbis et al. (1988), trouvent que les indices des vides e_{\max} et e_{\min} d'un sable limoneux diminue avec l'augmentation de la teneur en fines de 0-20%. Le taux d'augmentation de ces indices diminue à l'approche de 20% de fines, Kuerbis et al. (1988) et Lade et Yamamuro (1997) avaient observé que e_{\max} et e_{\min} augmentent même quand la teneur en fines excède 25%.

Lade et Yamamuro (1998) en réalisant des essais triaxiaux sur du sable de Nevada et Cambria qui ont été mélangés avec des fines non plastiques avec une teneur de 0 à 100%. L'indice des vides e_{\max} augmente considérablement à faibles pourcentages de fines (figure 2.7). Ceci indique que les grosses particules sont poussées à part par les petites particules coincées entre elles; d'où création d'une structure de particule instable qui se liquéfie facilement sous cisaillement statique; ce comportement a été discuté par Lade et Yamamuro (1997).

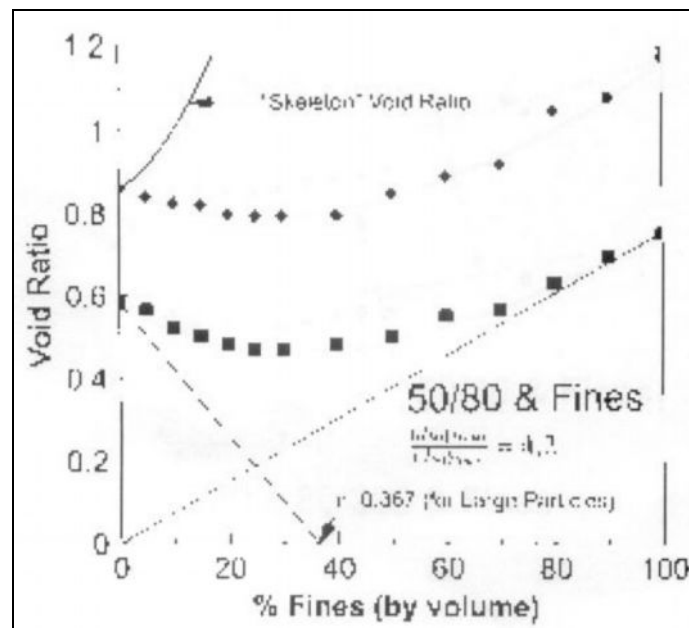


Figure 2.7 Variation de l'indice des vides en fonction de la teneur en fines (Lade et Yamamuro, 1998).

La figure 2.8 montre la variation des indices des vides des mélanges des sables de Nevada 50/80 et 80/200 en fonction de la teneur en fines (Lade et Yamamuro, 1998). On note que le rapport de diamètre est relativement faible, la chute de deux indices des vides n'est pas prononcée. On remarque que la forme des courbes est semblable. La seule différence entre ces deux courbes est les valeurs de l'indice des vides extrêmes qui sont différentes pour les petites particules.

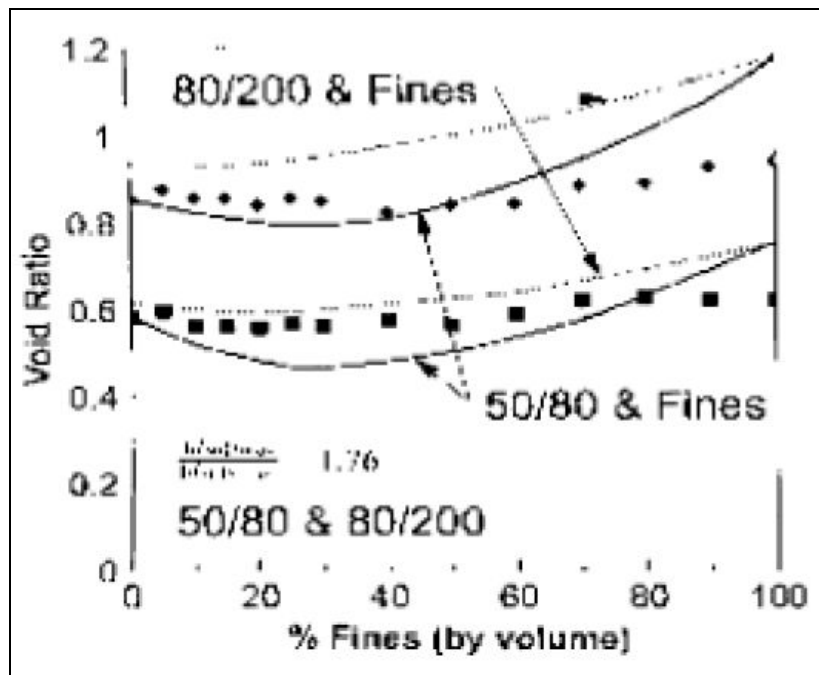


Figure 2.8 Variation de l'indice des vides minimal et maximal pour les sables de Nevada 50/80 et 80/200 en fonction de la teneur en fines. (Lade et Yamamuro, 1998)

2.2.3. Effet des fines sur l'indice des vides intergranulaire

Selon différents auteurs (Kenny 1977; Mitchell, 1993), le comportement d'un mélange sable-limon dépend de l'indice des vides intergranulaire (e_s), l'équation 1:

$$e_s = \frac{V_v + V_f}{V_s}$$

V_v : Volume des vides

V_f : Volume des fines

V_s : Volume des grains solides

Quand les masses spécifiques du limon et du sable sont très proches, cet indice (e_s) peut être déterminé en fonction de l'indice des vides global (e) et de la fraction des fines (F_c) par l'expression (Thevanayagam 1998), l'équation (2):

$$e_s = \frac{e + (F_c / 100)}{1 - (F_c / 100)}$$

2.2.4. Effet des fines sur la résistance à la liquéfaction en termes d'indice des vides granulaire

Finn et al. (1994) avait reporté que la résistance à la liquéfaction est indépendante de la teneur en fines. Plusieurs études ont montré que la résistance au cisaillement cyclique (CSR) est étroitement liée à l'indice des vides du squelette du sable. Troncoso et Verdugo (1985) trouvent qu'à un indice des vides du squelette constant, la résistance à la liquéfaction est constante avec l'augmentation de

la teneur en fines. Shen et al. (1977), Kuerbis et al. (1988), et Vaid (1994), cependant, avait montré qu'à indice des vides constant du squelette la résistance à la liquéfaction d'un sable ne reste pas constante, mais elle augmente avec l'augmentation de la teneur en fines. Le seuil de la teneur en fines est la transition du passage d'une matrice à prédominance sable à matrice d'éléments fins où les grains de sable sont suspendus avec un léger contact entre eux. Polito (1999) a défini la limite de teneur en silt comme étant le point de transition en dessous duquel la structure d'un sol est principalement constituée de grains d'éléments fins (limon) contenus dans une matrice de sable et au-dessus lequel le grain de sable est suspendu dans une matrice d'éléments fins (limon). En dessous du seuil limite de teneur en fines, le sable de Monterrey avec un indice des vides granulaire de 0.75; la résistance à la liquéfaction est presque constante avec l'augmentation de F_c de 0~20% (figure 2.9a). On note que le seuil limite de teneur en fines est de 25% et 36 % pour le sable de Monterrey et le sable de Yatesville, respectivement. Par contre en dessous de cette limite, on trouve que la résistance à la liquéfaction augmente avec l'augmentation de la teneur en fines de 0 à 11% pour le sable de Yatesville avec un indice des vides granulaire constant 0.9 et 1.0 respectivement (figure 2.9b). La résistance à la liquéfaction diminue linéairement avec l'augmentation de l'indice des vides granulaire (figure 2.10a), même observation a été faite pour le sable de Yatesville avec une teneur en fines jusqu'à 50% (figure 2.10b).

Pour les sols dont les teneur en fines sont en dessous du seuil limite, la résistance à la liquéfaction diminue avec l'augmentation de l'indice des vides granulaire; en dessus de cette limite (seuil), la résistance reste relativement constante et indépendante de l'indice des vides du squelette, de la teneur en fines et du type de sol. Pour des échantillons préparés au même indice des vides granulaire, la résistance du sable de Monterrey reste constante avec l'augmentation de la fraction des fines, et celle du sable de Yatesville augmente avec l'augmentation de la fraction des fines.

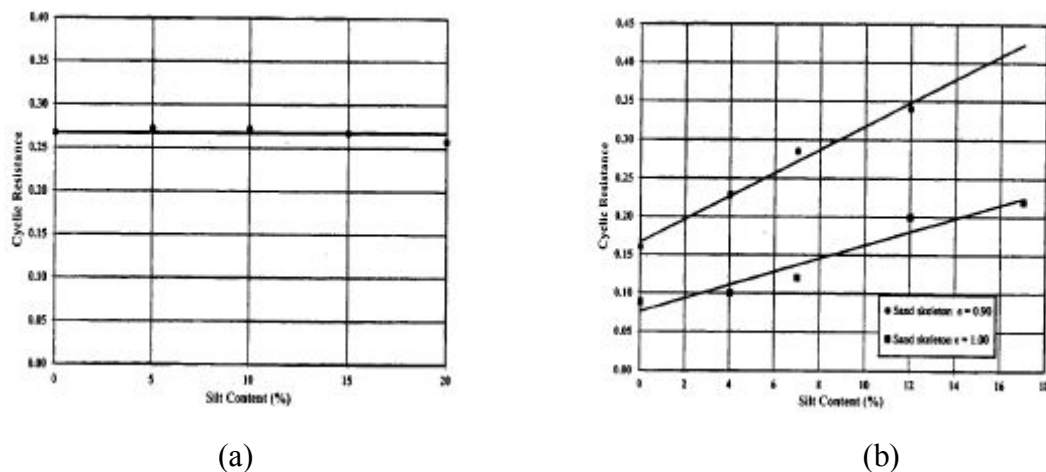


Figure 2.9 Résistance à la liquéfaction en fonction de la teneur en fines préparé à indice des vides du squelette constant des sables de Monterrey (a) et Yatesville (b) (Polito et Martin, 2001).

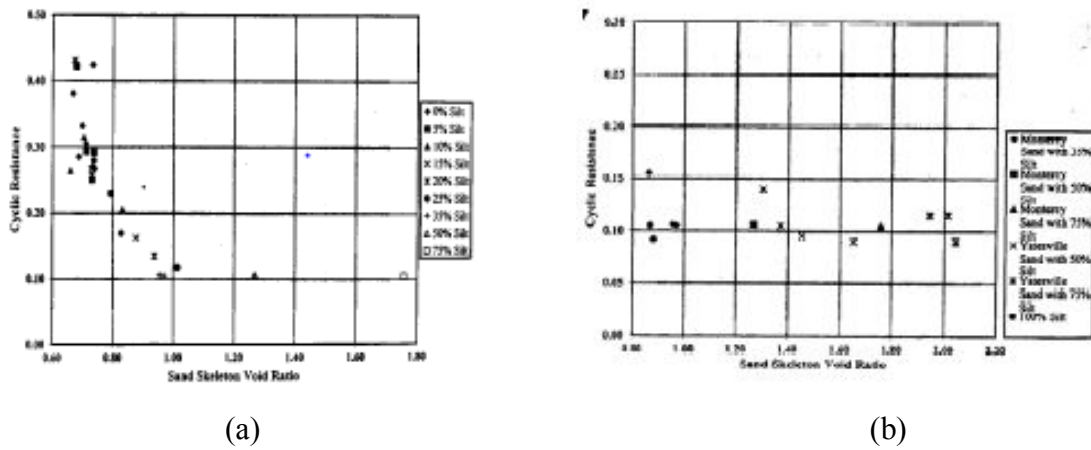


Figure 2.10 Variation de la résistance à la liquéfaction avec l'indice des vides du squelette pour le sable de Monterey (a) et de Yatesville (b) (Polito et martin, 2001).

2.2.5. Effet des fines sur la phase initiale de cisaillement non drainé

La figure 2.11 montre le comportement contrainte-déformation du sables lâche de Nevada avec une teneur en fines de 20% (Yamamuro et Covert, 2001). On note qu'un changement de densité relatif de 4%, induit un changement important dans le comportement, et en particulier à l'état stable. La présence de petites quantités de fines semble induire le comportement contractant uniquement durant la phase initiale de cisaillement non drainé. C'est la raison pour laquelle la liquéfaction statique se produit à faibles déformations. Cependant, le cisaillement des sables lâches avec une teneur en fines (limons) à de grandes déformations mobilise le caractère dilatant (résistance du squelette).

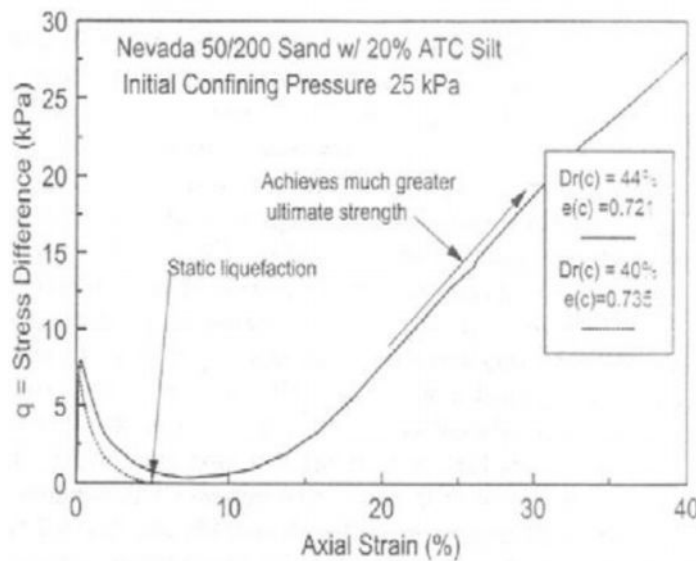


Figure 2.11 Comportement non drainé de deux sables de Nevada 50/200 avec 20% de teneur en fines montrant le revirement extrême de liquéfaction statique à la liquéfaction temporaire (Yamamuro et Covert, 2001).

2.2.6. Effet de l'indice de plasticité sur la résistance à la liquéfaction

Sandoval (1989) et Prakash et Sandoval (1992) ont réalisé des expériences sur des échantillons remaniés de limon (avec une teneur en fines de 96%, $I_p = 1.7\%$). Le mélange de kaolin avec du limon a permis d'augmenter l'indice de plasticité (I_p) de 2.6 à 3.4% (figure 2.12). On note 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 gammes de plasticité (faibles valeurs), 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 2.13). 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. La figure 2.14 illustre les résultats des travaux réalisés par Sandoval (1989), Prakash et Sandoval (1992) et Puri (1984, 1990). On remarque que les valeurs les plus basses de la résistance à la liquéfaction se trouvent dans le domaine d'indice de plasticité variant entre 4 et 10.

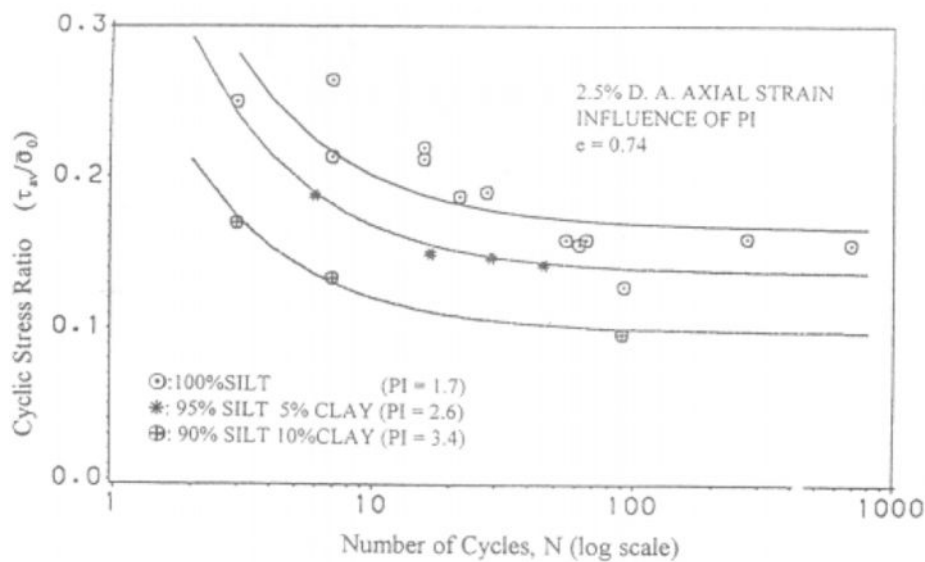


Figure 2.12 Influence de l'indice de plasticité sur la résistance à la liquéfaction (Sandoval 1989; Prakash et Snadoval, 1992).

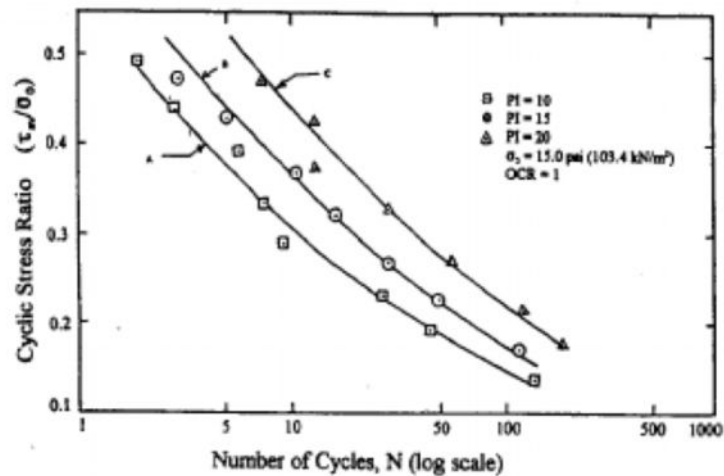


Figure 2.13 Influence de l'indice de plasticité sur la résistance à la liquéfaction (Puri 1984).

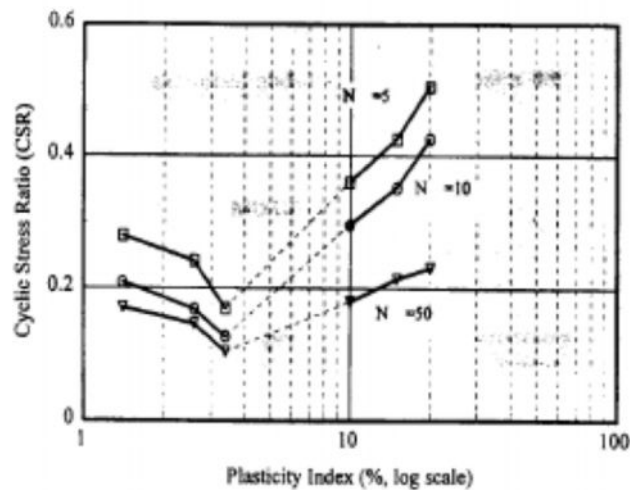


Figure 2.14 Variation de la résistance à la liquéfaction en fonction de l'indice de plasticité (Tianqiang et Prakash, 1999).

2.3. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a permis de présenter les résultats de différents travaux de recherche concernant l'effet des fines sur la résistance de ces sols. Ces recherches sont devenues une source conflictuelle, vu la divergence de leurs résultats, il devient alors primordial que la base de comparaison utilisée entre ces différents sols soit correctement formulée, pour que l'interprétation des résultats apporte des conclusions raisonnables.

A la lumière de cette recherche bibliographique, on va s'intéresser dans notre futur travail de recherche dans le cadre du projet de master, aux différentes méthodes de renforcement et d'amélioration des sols.