

MISE EN ŒUVRE DE L'APPROCHE GRADUÉE DANS LES ÉTUDES DE LIQUEFACTION

METHODS OF INCREASING COMPLEXITY IN LIQUEFACTION ANALYSIS

Emmanuel JAVELAUD¹

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

RÉSUMÉ – Différentes méthodes permettent de quantifier le potentiel de liquéfaction des sols soumis à des sollicitations sismiques, et d'évaluer leur tassement sismo-induit. Cela va de méthodes simplifiées aux plus complexes impliquant des calculs en contraintes effectives. Les méthodes retenues doivent être autorisées par les règlements et sélectionnées en fonction des objectifs recherchés. Cet article présente une aide au choix des outils à mettre en œuvre pour les études, et présente une gradation des méthodes de la plus simple aux plus complexes.

ABSTRACT – Several methods exist to evaluate the liquefaction susceptibility of soils, as well as earthquake induced settlements. They range from simplified methods to complex ones implying effective stress analysis. The methods used must be allowed by the regulations and selected according to the kind of prediction required. This paper proposes some guidance for the selection of appropriate methods.

1. Introduction

Les mouvements sismiques, s'ils sont suffisamment forts, sont susceptibles d'induire des déformations permanentes du sol. Le terme générique de liquéfaction comprend en fait plusieurs phénomènes qui affectent à la fois les sols pulvérulents et les argiles molles. Pour les sols pulvérulents auxquels nous nous intéressons ici, la liquéfaction se produit préférentiellement dans les sables fins saturés à granulométrie serrée en faible état de densité (indice des vides élevé).

La structure usuelle des études de liquéfaction est présentée en Figure 1. Pour qu'il y ait liquéfaction, il faut une combinaison de phénomènes et tout d'abord qu'il y ait opportunité de liquéfaction (Étape 1 de la Figure 1), c'est-à-dire que l'énergie des ondes générées par le séisme soit suffisante pour que le phénomène puisse se produire. Il faut également que les sols présentent une susceptibilité au phénomène et qu'ils se trouvent sous nappe (Étape 2 de la Figure 1). La susceptibilité des sols à la liquéfaction dépend de la nature des sols et de leurs propriétés. Elle peut être évaluée soit qualitativement, à partir d'informations géologiques (nature, âge des terrains, etc.), soit quantitativement, à partir d'essais de laboratoire en particulier. Les matériaux susceptibles de se liquéfier doivent également se trouver sous nappe.

Lorsque les trois conditions ci-dessus sont réunies, les sols sont susceptibles de se liquéfier, et le risque de liquéfaction ainsi que ses conséquences sont quantifiés (Étapes 3 et 4 de la Figure 1) dans le cas de l'action sismique considérée.

Ensuite, si les conséquences du risque de liquéfaction sont inacceptables, un traitement du sol contre le phénomène de liquéfaction peut être envisagé (Étape 5 de la Figure 1).

L'étude de la liquéfaction se fait suivant les règlements propres à chaque type de structure. Une synthèse des principales réglementations en vigueur est donnée par exemple dans Javelaud (2015). Les différents codes de construction précisent également des données d'entrées à considérer pour les études. Ce sont en particulier l'aléa sismique, le niveau d'eau, les matériaux considérés susceptibles ou non de se liquéfier ainsi que les méthodes autorisées.

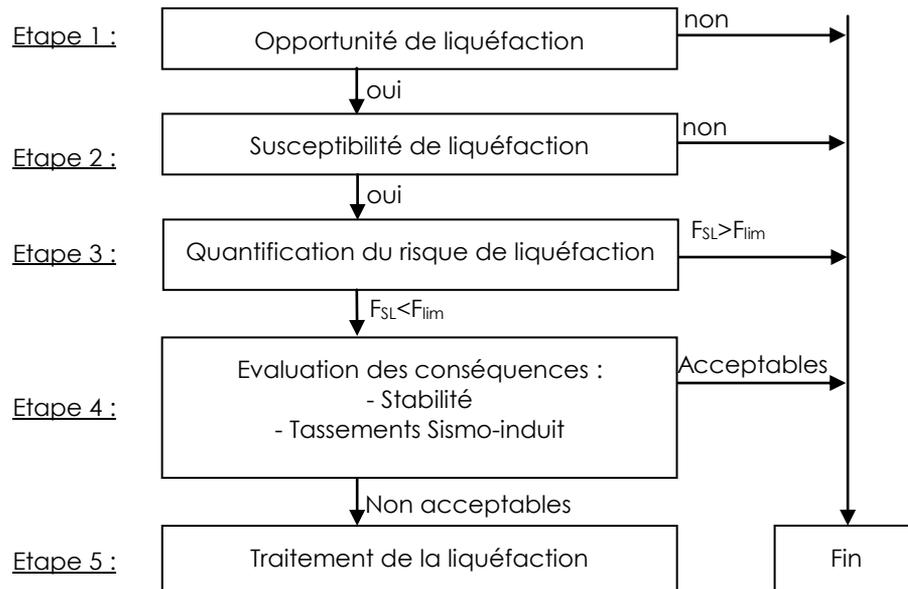


Figure 1. Organisation schématique des études de liquéfaction (avec F_{SL} le facteur de sécurité à la liquéfaction, généralement défini comme le rapport de la résistance au cisaillement cyclique du sol sur le cisaillement causé par le séisme).

L'étude de la liquéfaction doit être adaptée en particulier aux éléments que l'on cherche à évaluer (potentiel de liquéfaction, déformation après liquéfaction, efficacité des traitements anti-liquéfaction, etc.), au stade des études auquel on se trouve (préliminaire, détaillée, avant ou après amélioration ou renforcement de sol), ainsi qu'aux spécificités de chaque ouvrage et à notre degré de connaissance des matériaux.

L'objectif recherché peut s'exprimer en termes de facteur de sécurité à la liquéfaction ou bien de performance. Dans ce dernier cas, les critères à respecter s'expriment en termes de maximum de déformations, de déplacements, ou de montée des pressions interstitielles par exemple.

Le Tableau 1 présente de façon synthétique les différentes méthodes permettant de quantifier le risque de liquéfaction d'un site et d'évaluer les tassements sismo-induits. Elles se répartissent en deux grands types d'approches fondées sur l'utilisation de méthodes qui sont soit en contraintes totales (méthodes [a], [b], et [c] du Tableau 1) ou bien en contraintes effectives (méthodes [d] et [e] du Tableau 1).

Il s'agit de méthodes :

- simplifiées à partir d'essais cycliques au laboratoire (méthode [a]) ou à partir d'essais in-situ (méthode [b]) ;
- intermédiaires (méthode [c]) ou détaillées (méthode [d]) mettant en œuvre des outils numériques impliquant des modèles aux éléments finis en contraintes totales (méthode [c]) ou effectives (méthode [d]) ;
- ou de méthodes spéciales (méthode [e]) fondées sur l'utilisation de tables vibrantes, centrifugeuses ou d'essais particuliers.

Le Tableau 1 présente également les principaux avantages et inconvénients ou limitations de chaque méthode, et fournit ainsi une aide pour le choix des outils à mettre en œuvre lors des études de liquéfaction, avec une gradation des méthodes allant des plus simples (méthodes [a] et [b] du Tableau 1) aux plus complexes (méthode [e] du Tableau 1).

2. Méthode simplifiée fondée sur des essais de laboratoire (méthode [a])

Des essais mécaniques au laboratoire peuvent être réalisés pour évaluer la résistance des sols aux séismes. Il s'agit en particulier d'essais triaxiaux cycliques ou de cisaillement par torsion. Les essais de laboratoire peuvent être réalisés sur une grande variété de matériaux (sableux, limoneux ou argileux). Ils nécessitent toutefois des échantillons intacts.

L'intérêt est une évaluation directe de la résistance au cisaillement cyclique des sols (C.R.R.) dans les conditions initiales ou dans les conditions par exemple du projet après travaux. Le cisaillement causé par le séisme (C.S.R.) peut être évalué par la méthode simplifiée. Il est transcrit en un nombre cycles équivalents n du séisme auquel l'échantillon est soumis.

Ces essais permettent de déterminer un facteur de sécurité.

3. Méthode simplifiée fondée sur des essais in-situ (méthode [b])

Dans la pratique de l'ingénierie, l'approche simplifiée fondée sur les essais *in situ* est généralement utilisée de part sa simplicité de mise en œuvre.

3.1. Quantification du risque de liquéfaction

Des essais mécaniques *in situ* peuvent être réalisés pour évaluer la résistance des sols aux séismes. Il s'agit en particulier d'essais au pénétromètre statique (C.P.T.) ou de pénétration au carottier (S.P.T.), couplés à des prélèvements de matériaux pour réaliser des essais de laboratoire le cas échéant.

La méthode simplifiée est restreinte par la nature des matériaux : trop grossiers, les essais in-situ cités ci-dessus sont difficiles à réaliser ; à l'inverse, une trop grande proportion de fines nous place hors de son domaine d'application.

Si le facteur de sécurité obtenu FS_L est inférieur mais proche du facteur limite recherché ou bien si la résistance cyclique du sol ne peut être obtenue à partir des essais in-situ, des méthodes alternatives plus fines ([a], [c], [d] ou [e]) peuvent être utilisées en évaluant la résistance à la liquéfaction du sol en particulier à partir d'essais cycliques de laboratoire.

Les observations ayant servi à mettre au point cette méthode ont été faites essentiellement dans des sédiments alluvionnaires ou fluviaux Holocènes (c'est-à-dire des dix derniers milliers d'années) et à des profondeurs limitées à 15 m de profondeur. A plus grande profondeur, le risque de liquéfaction diminue et est souvent considéré comme négligeable comme par l'Eurocode 8-5 pour les bâtiments sur fondations superficielles.

Tableau 1. Aide schématique pour le choix des outils à mettre en œuvre lors des études de liquéfaction, en fonction des objectifs recherchés, présentant les principaux avantages et limitations de chaque méthode.

	Méthodes simplifiées		Méthode intermédiaire (extension de la méthode simplifiée) [c]	Méthodes détaillée [d]	Méthodes spéciale [e]
	Essais cycliques de laboratoire [a]	Essais In-situ [b]			
Avantages	Large nature de matériaux testables dans conditions variées (avant / après travaux par exemple)	Simplicité (essais in-situ + essais de laboratoire le cas échéant)	Géométries 2D quelconques	<ul style="list-style-type: none"> - Critères de performance (pression interstitielle, déformation, etc.) ; - Géométries 2D quelconque ; - Prise en compte des conditions de drainage ; - Calculs transitoires non linéaires avec évaluation de nombreux paramètres (montée de pression interstitielle, déformations, ... etc.) 	Essai spécifique
Inconvénients	Prélèvement d'échantillons intacts	<ul style="list-style-type: none"> - Matériaux sans trop grande proportion de fines ; - Géométrie simple : possibilité présentée de prise en compte des sols non plats ; - Abaques non valables au-delà d'une certaine profondeur 	Coût / complexité des calculs	Coût / complexité des calculs	Mise en œuvre de l'essai
Données d'entrée pour le séisme	Magnitude Nombre de cycles n	Magnitude Accélération en surface PGA	Accélération temporelle au niveau du substratum	Accélération temporelle au niveau du substratum	Accélération temporelle
Données d'entrée pour la résistance du sol	Nombre de cycle évalué par des essais cycliques au laboratoire	Essais <i>in situ</i>	Essais <i>in situ</i> Essais de laboratoire	Essais <i>in situ</i> Essais de laboratoire dont cycliques	

3.2. Evaluation des tassements sismo-induits

Des méthodes simplifiées permettent d'évaluer le tassement sismo-induit sous nappe de sables propres. De manière générale, ces méthodes ne sont applicables que lorsque le déplacement latéral du site est faible et elles ne permettent pas d'évaluer le tassement différentiel. Le Tableau 2 récapitule les principales méthodes utilisées ainsi que leurs domaines de validité respectifs.

Tableau 2. Méthodes simplifiées pour évaluer le tassement sismo-induit et leurs limites de validité. Les données nécessaires sont exprimées en termes de densité relative D_r , du nombre de coups N_{SPT} de pénétration au carottier, de résistance de pointe au pénétromètre statique q_c , en fonction du facteur de sécurité à la liquéfaction F_{SL} ou de la distorsion maximale induite par le séisme γ_{max} .

Méthode	Cas	Données nécessaires et leurs limites de validité				
		Densité relative D_r	N_{SPT}	q_c	F_{SL}	γ_{max}
Tokimatsu et Seed (1984, 1987)	Sols saturés	30-80	-	-	Conditions d'application : $F_{SL} > 1$	-
Ishihara et Yoshimine (1992)	Sols saturés	30-90	$N_{1(60)}$ 4-37	q_{c1N} 60-235 (valeur normalisée, sans unité)	Utilise le F_{SL} en complément de D_r , N_{SPT} et q_c	3%-10%
Tokimatsu et Seed (1987)	Sols saturés	-	$N_{1(60)}$ 0,7-50	-	-	-

La méthode de Tokimatsu & Seed (1984 ; 1987) est limitée aux cas où il n'y a pas de liquéfaction ($F_{SL} > 1$) mais est d'utilisation simple car elle nécessite uniquement le facteur de sécurité à la liquéfaction.

La méthode de Tokimatsu & Seed (1987) utilise les essais au Standard Penetration Test SPT et $N_{1(60)}$ le nombre de coups normalisé à un facteur d'énergie de 60 %.

La méthode d'Ishihara et Yoshimine (1992) utilise également le facteur de sécurité à la liquéfaction F_{SL} et plusieurs critères pour évaluer la densité relative du matériau (D_r , $N_{1(60)}$ -CS, q_{c1N}).

Une fois évaluée la déformation volumique ε_v à chaque profondeur, le tassement de la surface lors de la dissipation des pressions interstitielles générées par le séisme est estimé en multipliant pour chaque couche son épaisseur par sa déformation volumique ε_v .

Il est recommandé de panacher les types de reconnaissances in-situ (CPT, SPT) afin de croiser les méthodes pour avoir une estimation plus robuste des tassements sismo-induits : les abaques associés aux essais SPT couvrent en effet des gammes de résistance plus larges, tandis que les CPT ont l'avantage d'offrir des mesures continues sur toute la hauteur du sol testé.

3.3. Exemple de la méthode d'Ishihara et Yoshimine (1992) pour évaluer les tassements sismo-induits

L'évaluation de la déformation volumique ε_v peut être faite grâce à l'abaque d'Ishihara et Yoshimine (1992), modifié par Idriss et Boulanger (2008) (Figure 2), à partir du facteur de sécurité à la liquéfaction FS_L et d'un autre paramètre pris au choix parmi les suivants : densité relative du sol D_r , résistance SPT normalisée $N_1(60)$, résistance pénétrométrique normalisée q_{c1N} , ou distorsion maximale induite par le séisme γ_{max} .

L'abaque initial a été construit par Ishihara et Yoshimine à partir de densités relatives pour un sable propre. Il faut donc privilégier l'utilisation de la densité relative quand elle est disponible.

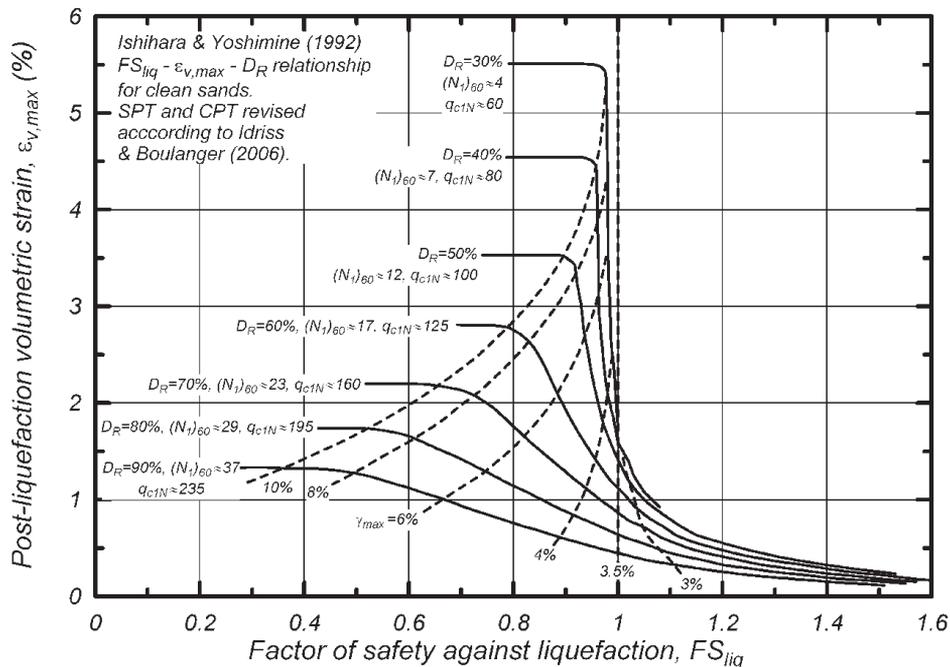


Figure 2. Déformation volumique ε_v en fonction du facteur de sécurité à la liquéfaction ($r_u=100\%$) pour des sables propres de densités relatives initiales variables. (Idriss et Boulanger, 2008).

Cette méthode utilise d'une part le facteur de sécurité à la liquéfaction FS_L déterminé précédemment (§3.1.), et d'autre part, les résultats des sondages CPT ou SPT. L'apport d'Idriss et Boulanger est d'avoir revu les relations liant la densité relative D_r aux mesures faites in-situ avec les sondages CPT ou SPT. Les relations proposées par ces derniers permettent d'utiliser plus facilement les résultats des essais CPT et SPT tels qu'ils sont pratiqués actuellement, et d'utiliser les résistances SPT normalisées $N_1(60)$ et pénétrométriques normalisées q_{c1N} .

Lorsque des essais in-situ de type SPT ou CPT sont réalisés, une deuxième manière de procéder est d'évaluer tout d'abord la densité relative du matériau en utilisant la corrélation que l'on juge mieux adaptée aux cas d'étude, ou de la définir par des essais de laboratoire. Puis d'utiliser la densité relative obtenue pour lire l'abaque d'Ishihara et Yoshimine.

Les limitations de la méthode sont les suivantes :

- cette méthode est limitée aux dépôts constitués de façon prédominante de sable. Le cas de sables contenant des fines sort de son domaine d'application ;
- la résistance SPT normalisée $N_1(60)$ est comprise entre 4 et 37 ;
- la résistance de pointe au CPT normalisé q_{c1N} comprise entre 60 et 235 (valeur normalisée, sans unité) ;
- les courbes avec D_r inférieure à 40% et celles avec $\gamma < 3\%$ ont été estimées avec peu de données.

En pratique, si cet abaque est utilisé pour des sols contenant des fines, $N_1(60)_{CS}$ et q_{c1N-CS} sont à utiliser pour corriger les valeurs en fonction de la teneur en fine. L'abaque a en effet été construit avec des sables propres et la correction Clean-Sand est donc nécessaire.

4. Méthodes intermédiaires d'ingénierie (méthode [c])

Les méthodes intermédiaires incluent des analyses numériques linéaires-équivalentes en contraintes totales pour étendre l'analyse simplifiée aux géométries 2D quelconques.

Par ailleurs, d'autres méthodes, plus détaillées que les méthodes simplifiées (méthode [b]) mais moins lourdes à mettre en œuvre que les méthodes sophistiquées (méthode [d]), sont actuellement en cours de développement en particulier pour évaluer le tassement sismo-induit. On peut noter en particulier le travail en cours de Kteich à l'ESTP sous financement EDF.

5. Méthodes numériques en contraintes effectives (méthode [d])

Lorsqu'il est nécessaire d'évaluer finement le comportement d'ouvrages complexes, des méthodes numériques en contraintes effectives sont mises en œuvre. Elles comprennent une analyse temporelle permettant d'évaluer la réponse dynamique du sol et l'augmentation de pressions interstitielles en tenant compte des conditions de drainage. Les sols sont modélisés par des lois de comportement non-linéaires, d'Hujeux par exemple.

Les critères généralement retenus sont alors des critères de performance (critères de maximum de déformations, de déplacements, ou de montée des pressions interstitielles par exemple). Un exemple d'application est donné dans Kham et al. (2015) où la méthode est appliquée à un barrage en remblai.

6. Essais spéciaux (méthode [e])

En complément des méthodes présentées précédemment, des méthodes spéciales fondées sur l'utilisation de tables vibrantes, centrifugeuses ou d'essais particuliers in-situ sont également utilisées. Les méthodes retenues pour les études doivent être autorisées par les règlements applicables au projet concerné.

7. Conclusions

Plusieurs méthodes existent pour quantifier le risque de liquéfaction et les tassements sismo-induits. La méthode sélectionnée pour un projet particulier dépend de différents facteurs dont le type de structure, le stade des études auquel on se trouve (préliminaire, détaillée, avant ou après amélioration ou renforcement de sol) ou les éléments que l'on cherche à évaluer (potentiel de liquéfaction, déformation après liquéfaction, efficacité des traitements anti-liquéfaction, etc.). Toutes les méthodes sont à priori acceptables mais chacune a des domaines et des conditions d'applications différents ce que reflètent en fait les pratiques suivant les grands types d'ouvrages.

8. Références bibliographiques

- AFPS-CFMS (2012). Procédés d'amélioration et de renforcement des sols sous action sismique, Guide technique, Presses des Ponts, 231p.
- Brûlé S., Javelaud E. (2014). Le traitement contre la liquéfaction des sols en France métropolitaine. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014, Beauvais, 8-10 juillet 2014, 9 p.
- Cetin K.O., Bilge H.T. (2014). Recent Advances in Seismic Soil Liquefaction Engineering, chapitre 19 in A. Ansal (ed.) Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, p585-626.
- Idriss I.M., Boulanger R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, 237p.
- Ishihara K., Yoshimine M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes - Soils and Foundations, Vol.32, N°1, March 1992, pp. 173-188.
- Javelaud E. (2015). Etat de l'art des méthodes d'évaluation du risque de liquéfaction. Cas des ouvrages à risques normal et spécial en France. 9ème colloque National AFPS, IFSTTAR, 11 p.
- Kham M., Rachdi S., Kolmayer P., Lopez-Caballero F., Matsumoto N. (2015). Modélisation 3D d'un barrage en remblai sous séisme. 9ème colloque National AFPS, IFSTTAR, 10 p.
- Seed H. B. et al. (2003) - "Recent advances in soil liquefaction engineering : a unified and consistent framework", 26th annual ASCE Los Angeles Spring Seminar, Keynote Presentation, H.M.S. Queen Mary, Long Beach, California, April 30, 2003
- Tokimatsu K., Seed H. B. (1984). Simplified procedures for the evaluation of settlements in clean sands, Earthquake Engineering Research Center – Rapport EERC 84/16.
- Tokimatsu K. , Seed H. B. (1987). Evaluation of settlements in sand due to earthquake shaking - Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 113, N0°8, pp. 861-878.
- Youd et al (2001). Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 127-10, 817-833.