

# Évaluation de la réduction du risque de liquéfaction par des colonnes ballastées

## Valuation of liquefaction mitigation by stone columns

Lambert S.  
Keller Fondations Spéciales

**RÉSUMÉ :** La densification et le drainage d'un sol sont connus pour être les moyens les plus efficaces pour réduire le risque potentiel de liquéfaction. À ces deux actions peuvent se rajouter également d'autres actions telles que la limitation des sollicitations dans le sol et l'augmentation du rapport de contrainte  $k$  de la contrainte horizontale sur la contrainte verticale. Cet article rappelle que la colonne ballastée combine toutes ces actions et présente différentes méthodes pour les dimensionner vis-à-vis de la réduction du potentiel de liquéfaction. Selon les conditions géotechniques spécifiques du site et la mise en œuvre des colonnes ballastées, certaines actions peuvent avoir une influence plus importante que les autres. Après un descriptif de ces différentes actions, un exemple est donné pour un sable propre et un limon liquéfiable. Il est montré que pour un limon, il est possible de réduire le risque potentiel de liquéfaction en considérant avant tout le drainage et l'effet de concentration des contraintes alors que pour un sable, l'action prédominante est le compactage.

**ABSTRACT:** Densification and drainage of the soil are known to be the most effective ways to reduce the potential risk of liquefaction. To these two actions can also be added other actions such as limiting stresses in the soil and increased stress ratio  $k$  of the horizontal stress on the vertical stress. This article points out that the stone column combines all these actions and presents different methods for sizing towards the reduction of liquefaction potential. According to the site-specific geotechnical conditions and the implementation of stone columns, some actions can have a greater impact than others. After a description of these different actions, an example is given for a liquefiable clean sand and silt. It is shown that for silt, it is possible to reduce the potential risk of liquefaction by primarily considering the drainage and the effect of stress concentration, whereas for sand the predominant action is compaction.

**MOTS CLES :** liquéfaction, drainage, compactage, colonne ballastée.

**KEYWORDS:** liquefaction, drainage, densification, stone columns.

### 1 INTRODUCTION

Par ses capacités à intervenir sur plusieurs paramètres en même temps (compactage, drainage, apport d'un matériau non liquéfiable, réduction des sollicitations sismiques, modification de l'état de contrainte dans le sol), la colonne ballastée est particulièrement bien adaptée dans les sols hétérogènes. L'effet stabilisateur de la colonne ballastée repose sur sa résistance élevée au cisaillement et sur son aptitude à dissiper très rapidement dans son environnement immédiat les pressions interstitielles.

Les retours d'expériences ont montré que les colonnes ballastées se sont avérées très efficaces vis-à-vis du phénomène de liquéfaction, en jouant sur les principaux effets qui permettent de réduire la liquéfaction, c'est-à-dire :

- augmentation du CRR (Cyclic Resistant Ratio ou taux de résistance au cisaillement cyclique du sol) par une augmentation de la compacité du sol,
- réduction du CSR (taux de contrainte cyclique engendré par le séisme Cyclic Stress Ratio): réduction des sollicitations sismiques par la concentration des contraintes de cisaillement liées au séisme sur l'élément le plus raide, à savoir la colonne ballastée, réduisant ainsi le CSR au niveau du sol situé en intermaille (Priebe 1998, Girsang 2001). Ce phénomène est accentué par l'augmentation de la rigidité du massif de sol renforcé par l'accroissement de la contrainte latérale du sol, lié à la mise en œuvre par refoulement du gravier de la colonne ballastée (Nguyen NC et al. 2007),
- réduction rapide des surpressions interstitielles par la forte perméabilité du gravier des colonnes combinée avec une augmentation du gradient hydraulique liée au phénomène de dilatance qui se produit dans les colonnes ballastées lors d'un séisme (Madhav et Arlekar 2000).

Les principales méthodes de dimensionnement de ces

différentes actions sont détaillées ci-après, afin d'obtenir soit un coefficient  $r_u = u/\sigma' \leq 0,6$  soit un coefficient de sécurité  $F_s = CRR/CSR \geq 1,25$  (cf. EN 1998-5).

### 2 AUGMENTATION DE LA COMPACITÉ DES SOLS

Avec la colonne ballastée, la compacité du sol est augmentée sous la combinaison de deux effets simultanés, les vibrations et la compression latérale du sol. L'efficacité de ces deux actions est étroitement liée à la nature du sol, au taux de substitution et au maillage.

Des fourchettes de taux d'augmentation de caractéristiques sont données sur la figure 1. Pour les sables propres lâches, réputés pour être les sols les plus sensibles au phénomène de liquéfaction, les augmentations de compacité obtenues sous l'effet des vibrations sont les plus significatives.

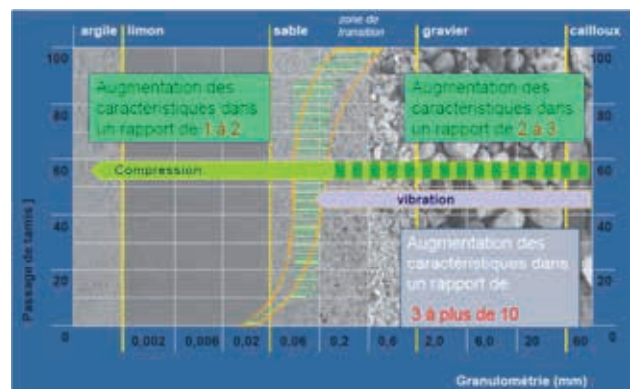


Figure 1. Augmentation des caractéristiques de sol selon la nature des sols et l'action exercée sur le sol par le procédé de renforcement.

Sur la figure 2, est représenté le chemin qui permet de sortir du domaine de liquéfaction.

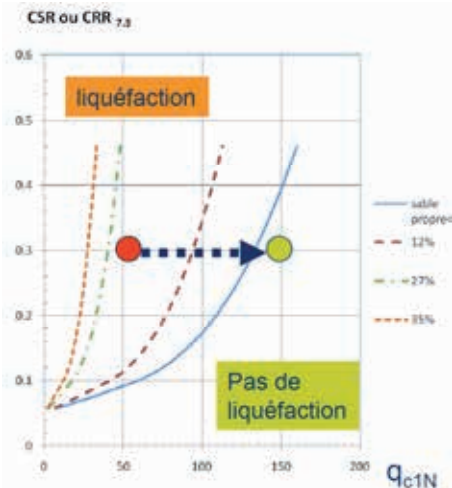


Figure 2. Augmentation du CRR par augmentation de la compacité (cf. abaque guide AFPS 2012).

### 3 RÉDUCTION DES SOLLICITATIONS SISMQUES

Le deuxième effet concerne la diminution de la contrainte de cisaillement dans le sol (diminution du CSR), sous l'effet d'un report de contraintes sur la colonne plus raide. Le massif de sol renforcé présente ainsi une déformation de cisaillement plus faible qui entraîne une réduction du potentiel de liquéfaction.

De nombreuses études ont été effectuées sur le sujet mais souvent en négligeant un des éléments primordiaux de la modélisation des colonnes ballastées à savoir la mise en œuvre par refolement. Nguyen et al. 2007 montre que sans la prise en compte de cette expansion de diamètre qui permet de modifier le rapport des contraintes  $k = \sigma'_h / \sigma'_v$ , l'augmentation de la rigidité du massif renforcé par colonnes ballastées est fortement sous-estimée.

#### 3.1 Non prise en compte de la mise en œuvre de la colonne ballastée par refolement

Rayamajhi et al. (2012) ont mené une étude aux éléments finis en élastique linéaire destinée à déterminer l'efficacité des inclusions non refoilantes (colonne de sol malaxé, colonne de gravier, inclusion rigide) vis-à-vis de la réduction des contraintes de cisaillement sismiques dans un profil de sols liquéfiables. Les résultats de la modélisation d'une cellule élémentaire comportant une inclusion et le sol environnant au sein d'une maille montrent que la colonne se déforme en cisaillement et en flexion (voir Figure 3) avec une prédominance de la flexion sur les deux premiers mètres puis ensuite de cisaillement. La réduction des sollicitations de cisaillement dans le sol environnant de l'inclusion est croissante avec la profondeur mais négligeable sur les deux premiers mètres en raison de la flexion.

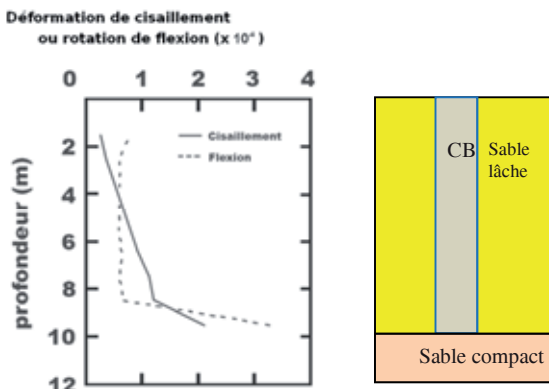


Figure 3. Déformation de cisaillement et de flexion d'une analyse pseudo-statique  $A_r = 20\%$  et  $G_r = 10$  (Rayamajhi et al. 2012).

Rayamajhi montre également que du fait de la non homogénéité de la distorsion dans la maille élémentaire, une diminution de la distorsion moyenne du volume renforcé n'entraîne pas nécessairement une réduction de la distorsion équivalente en tout point du sol. Sur la Figure 4, les profils de  $\gamma_r$  (rapport de la déformation de cisaillement de la colonne sur celle du sol) pour cinq positions différentes en plan, sont représentés en fonction de la profondeur. On peut constater que la déformation de cisaillement est maximale dans la zone 1.

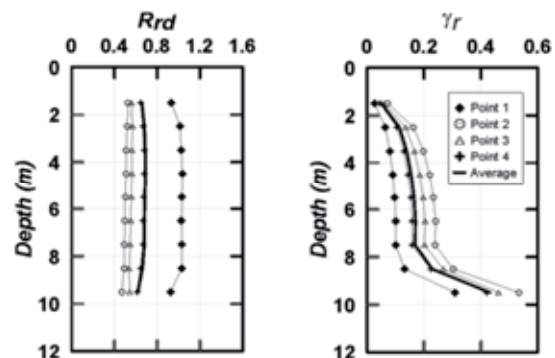
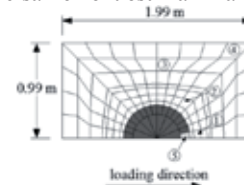


Figure 4. Distributions spatiales de  $R_{rd}$  et  $\gamma_r$  obtenues à partir d'une sollicitation sismique avec  $A_r = 20\%$  et  $G_r = 10$  (Rayamajhi et al. 2012).

Les méthodes de dimensionnement qui supposent la compatibilité des déformations de l'inclusion et du sol (cf. Baez et Martin 1993) peuvent donc amener à surestimer la réduction potentielle des contraintes de cisaillement liée à la présence d'inclusion.

À partir de la méthode simplifiée de Seed et Idriss (1971) pour la détermination du CSR, Rayamajhi propose de déterminer l'augmentation du coefficient de sécurité du sol renforcé en introduisant un coefficient de réduction de CSR nommé  $R_{CSR}$  tel que :

$$F_{s \text{ final}} = F_{s \text{ initial}} / R_{CSR} \quad (1)$$

$$\text{avec } R_{CSR} = \frac{CSR_I}{CSR_U} = \left( \frac{a_{max,i}}{a_{max,u}} \right) \left( \frac{r_{d,i}}{r_{d,u}} \right) = R_{a \text{ max}} \cdot R_{rd}$$

$u$  = sol non renforcé,  $i$  = sol renforcé,  
 $r_d$  coefficient de profondeur.

Rayamajhi et al. (2012) propose de modifier l'équation de Baez et Martin (1993) de la manière suivante :

$$R_{rd} = \frac{1}{G_r [A_r \gamma_r C_G + \frac{1}{G_r} (1 - A_r)]} \quad (2)$$

où

$C_G$ : facteur équivalent de cisaillement de l'élément de renforcement de sol qui dépend de sa géométrie ( $C_G = 1$  pour des éléments de renforcement circulaire),

$G_r$ : rapport du module de cisaillement de la colonne sur celui du sol,

$A_r$ : taux de substitution soit  $A_{co} / A_{maille}$ ,

$\gamma_r$ : rapport de déformation de cisaillement entre la colonne et la déformation du sol environnant. Sur la base de plusieurs études paramétriques pour des  $A_r$  et  $G_r$  différents, il peut être estimé par  $\gamma_r = (G_r)^{-0.8}$  pour des modèles géométriques basiques.

L'étude de Rayamajhi et al. (2012) se base sur un modèle de sol linéaire élastique et les résultats seraient différents pour un comportement élasto-plastique. Son modèle ne tient pas compte non plus de la modification d'orientation des contraintes principales par la mise en œuvre par refoulement de la colonne ballastée.

### 3.2 Prise en compte de la mise en œuvre de la colonne ballastée par refoulement

Des modélisations numériques établies par Girsang (2001) intégrant la mise en œuvre par refoulement de la colonne ballastée, ont permis de mettre en évidence l'importance de la modification du rapport  $k$  des contraintes horizontales sur les contraintes verticales, au sein du massif de sol (voir tableau 1), dans la réduction du risque potentiel de la liquéfaction. Différentes configurations de sols ont été étudiées sous des chargements sismiques (enregistrements réels du séisme Loma Prieta et Saguenay). Les résultats montrent une réduction importante des surpressions interstitielles entre le sol avant et après renforcement (cf. Figure 5) sans que le caractère drainant de la colonne ballastée ne soit pris en compte dans les modèles.

À partir des résultats de ces modèles, Girsang conclut que l'augmentation de la contrainte horizontale obtenue par la mise en œuvre de la colonne par refoulement permet d'obtenir des déformations essentiellement en cisaillement et de revenir à la formulation de Baez et Martin (1993) :

$$F_{s \text{ final}} = F_{s \text{ initial}} / k_g \text{ avec } k_g = \frac{1}{G_r \left[ A_r + \frac{1}{G_r} (1 - A_r) \right]} \quad (3)$$

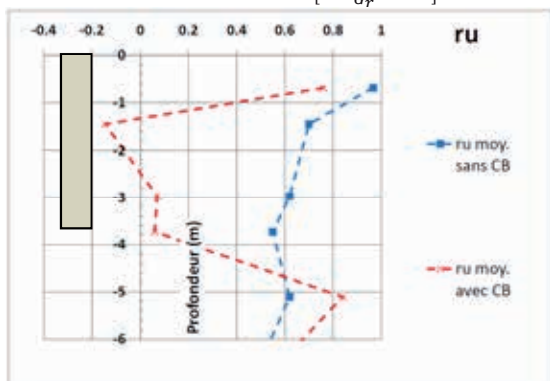


Figure 5. Réduction des surpressions interstitielles par Girsang (2001) pour un sable limoneux ( $G=5,5$  MPa,  $a=0,45$  à  $0,64g$ ,  $G_{cb}/G_{sol}=9$ ).

Tableau 1 : Augmentation des contraintes horizontales liée à la mise en place de la colonne (Girsang 2001).

Tremblement de terre	Sans renforcement de sol	Avec colonnes ballastées	Rapport $k = \sigma'_h / \sigma'_v$
Loma Prieta	Cas 3c	Cas 4c	2 à 9

Les méthodes numériques peuvent donc être une approche intéressante pour tenir compte de ce paramètre important pour la colonne ballastée aussi bien vis-à-vis d'un chargement vertical statique (Nguyen et al. 2007) que d'un chargement horizontal statique ou cyclique (Rayamajhi et al. 2012).

À partir de la méthode simplifiée des recommandations de l'AFPS (2012), il est possible d'intégrer cette modification du rapport  $k$  dans l'estimation du module de cisaillement équivalent  $G_L$  du massif de sol renforcé selon le modèle de la maille élémentaire. L'augmentation du coefficient de sécurité est ensuite estimée par les formules suivantes :

$$F_{s \text{ final}} = F_{s \text{ initial}} / k_g \text{ avec } k_g = \frac{\gamma_{\text{hom}}}{\gamma_s} = \sqrt{\frac{G_s}{G_L}} \quad (4)$$

## 4 RÉDUCTION DES SURPRESSIONS INTERSTITIELLES

Le troisième paramètre à intégrer concerne la capacité des colonnes ballastées à dissiper les surpressions interstitielles. À la différence d'un drain, la colonne ballastée est constituée d'un matériau de gravier compacté très perméable. Son fort pouvoir d'évacuation de surpressions interstitielles résulte de sa forte perméabilité, mais également de l'apparition lors du séisme d'un fort gradient hydraulique, liée au phénomène de dilatance du gravier des colonnes (Madhav et Arlekar 2000).

Seed et Booker (1977) ont proposé une méthode basée sur la dissipation des surpressions interstitielles afin de réduire le risque potentiel de liquéfaction. L'objectif est de rechercher un rapport  $r_u = u / \sigma'_v \leq 0,6$  afin d'assurer un coefficient de sécurité supérieur à 1,25.

Des diagrammes (Figure 6) permettent de déterminer l'espacement  $b$  des colonnes ballastées de rayon  $a$ , à partir du rapport  $N_{eq}/N_1$  et d'un paramètre adimensionnel  $T_{ad}$  tel que :

$$T_{ad} = \frac{k_s \times t_d}{m_v \times a^2 \times \gamma_w} \quad (5)$$

avec :

-  $t_d$  est la durée du séisme et  $N_{eq}$  le nombre de cycles équivalents défini dans le tableau 2.

Tableau 2 : Nombre de cycles équivalents  $N_{eq}$  et durée du séisme selon la zone de sismicité (Recommandations de l'AFPS).

Zone de sismicité	Magnitude conventionnelle	Nombre de cycles équivalents séisme $N_{eq}$	Durée du séisme $t_d$ (s)
3 (modérée)	5,5	4	8
4 (moyenne)	6,0	8	14
5 (forte)	7,5	20	40

-  $m_v$ : la compressibilité du sol ( $1/E_{oed}$ ),  
 -  $K_s$ : perméabilité horizontale du sol  
 -  $N_1$ : nombre de cycles conduisant le sol à la liquéfaction,  
 -  $a$ : rayon du drain et  $b$  = rayon d'influence du drain.

Cette méthode ne tient pas compte du caractère dilatant du gravier qui permet de réduire encore davantage les surpressions interstitielles (de 11 à 17 % d'après Madhav et al. 2000).

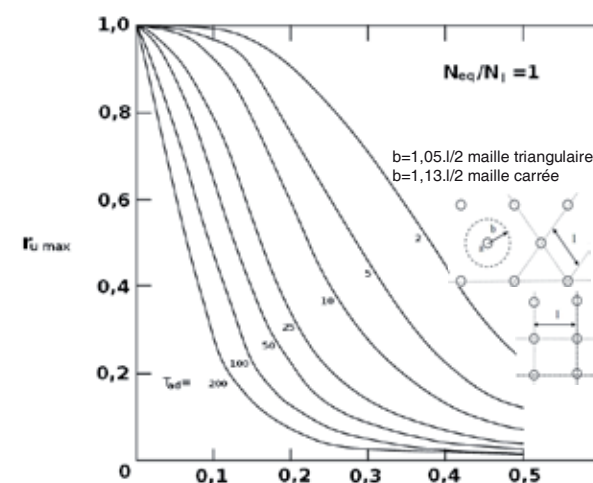


Figure 6. Détermination du rapport  $a/b$  ( $a$  = rayon du drain et  $b$  = demi-espacement) Booker et al. 1976.

## 5 EXEMPLE

Le dimensionnement des colonnes ballastées peut suivre les étapes suivantes :

- détermination de l'augmentation de la compacité du sol par vibration et compression et le  $m_v$  correspondant,
- détermination de la diminution des sollicitations sismiques entre colonnes ( $k_g$ ) et du nouveau  $N_i$ ,
- enfin, intégration de ces deux valeurs dans les formules de Booker (1977), pour définir une maille et un diamètre de colonnes ballastées permettant de vérifier  $r_u = u/\sigma'_v \leq 0,6$ .

Pour un renforcement de sol par colonnes ballastées diamètre 0,8 m, maille 6,25 m<sup>2</sup>, les résultats sont récapitulés dans le tableau 3 pour une lentille de sable ( $k = 10^{-4}$  m/s) et de limon ( $k = 5.10^{-6}$  m/s) à 5 m de profondeur.

Tableau 3 : Résultats de l'exemple.

Nature	$q_c$	$F_s$	$q_c$	$F_s$	$k_g$	$F_s$	$r_u$
	initial (MPa)		amél. (MPa)			Augm. de compacité	
Sable	2	0,13	12	1,0	1	1,0	0,05
Limon	2	0,38	2,5	0,57	0,6	0,65	0,6

### Hypothèses considérées :

Contrainte totale :  $\sigma_o = 100$  kPa ; contrainte effective :  $\sigma'_o = 50$  kPa ;  
 Sable ( $I_c = 2,6$  FC < 5 %)  $m_v = 1,77.10^{-5}$  kPa<sup>-1</sup>,  $T_{ad} = 141$  ; Limon ( $I_c = 1,3$  et FC = 27 %)  $m_v = 3.10^{-5}$  kPa<sup>-1</sup>,  $T_{ad} = 4$ ,  $G_r = 10$ , Magnitude  $M = 7,5$  ; Nombre de cycles représentatifs  $N_{eq} = 20$  ;  $t_d = 40$  s ;  $N_{eq}/N_i = 1$ ,  $a_{max} = 0,4$  g ; CSR = 0,52.

## 6 CONCLUSION

Cet article présente les différentes actions de la colonne ballastée pour réduire le risque potentiel de liquéfaction en tenant compte de la densification de sol, du drainage, de la modification du rapport  $k$  et de la réduction des sollicitations. Selon que l'on soit en présence d'un sable ou d'un limon liquéfiable, ces différentes actions n'agissent pas de la même manière. L'augmentation du coefficient de sécurité des lentilles sableuses sera obtenue avant tout par compactage. Par contre, pour un limon, la justification de la réduction du risque potentiel de liquéfaction passe en général plutôt par la combinaison de toutes les actions de la colonne ballastée.

## 7 REFERENCES

- AFPS 2012. Procédés d'amélioration et de renforcement de sol sous actions sismiques. Presses des Ponts.
- Girsang C. 2001. A numerical investigation of the seismic response of the aggregate pier foundation system. Thesis submitted to the faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University,
- Madhav et Arlekar 2000. Dilation of granular piles in mitigating liquefaction of sand deposits. 12<sup>th</sup> World Conference Earthquake Engineering, Auckland. N° 1035 (CD-ROM),
- Nguyen NC et al. 2007. Prise en compte de la mise en place dans la modélisation numérique en 3D des colonnes ballastées dans l'argile molle. 18<sup>ème</sup> congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 août 2007,
- Rayamajhi D., 2012. Effect of Discrete Columns on Shear Stress Distribution in Liquefiable Soil. GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering.