

AMELIORATION DES SOLS LIQUEFACTION

Serge LAMBERT – Keller Fondations Spéciales



Journée Technique AFPS-CFMS du 5 avril 2016
« Vibrations et Séisme »

SOMMAIRE

Introduction

1. Principes de justification des traitements anti-liquéfaction

2. Justification des traitements anti-liquéfaction

3. Dispositions constructives

4. Contrôles

CONCLUSION

La liquéfaction du sol est une des sources majeure des désordres observées durant les tremblements de terre.

Que dit l'EC8 sur les améliorations de sol vis-à-vis de la liquéfaction ?

(13) Il convient que l'amélioration du sol pour éviter la liquéfaction se fasse soit par compactage du sol pour augmenter sa résistance à la pénétration au-delà des limites dangereuses, soit par l'utilisation d'un drainage pour diminuer l'accroissement de pression d'eau interstitielle produit par les secousses sismiques.

(14) Il convient d'envisager avec prudence la seule utilisation de fondations sur pieux, en raison des forces importantes induites dans les pieux par la perte de résistance du sol dans la ou les couches liquéfiables, et en raison des incertitudes inévitables liées à la détermination de l'emplacement et de l'épaisseur de cette ou ces couches.

Justification des traitements anti-liquéfaction

OBJECTIF:

$$F_s = CRR/CSR \geq 1,25$$

ou $r_u = \sigma'_v/u \leq 0,6$

Selon le procédé retenu, le potentiel de liquéfaction peut être réduit :

Action 1: en augmentant la compacité du sol : augmentation de CRR

Action 2: en drainant

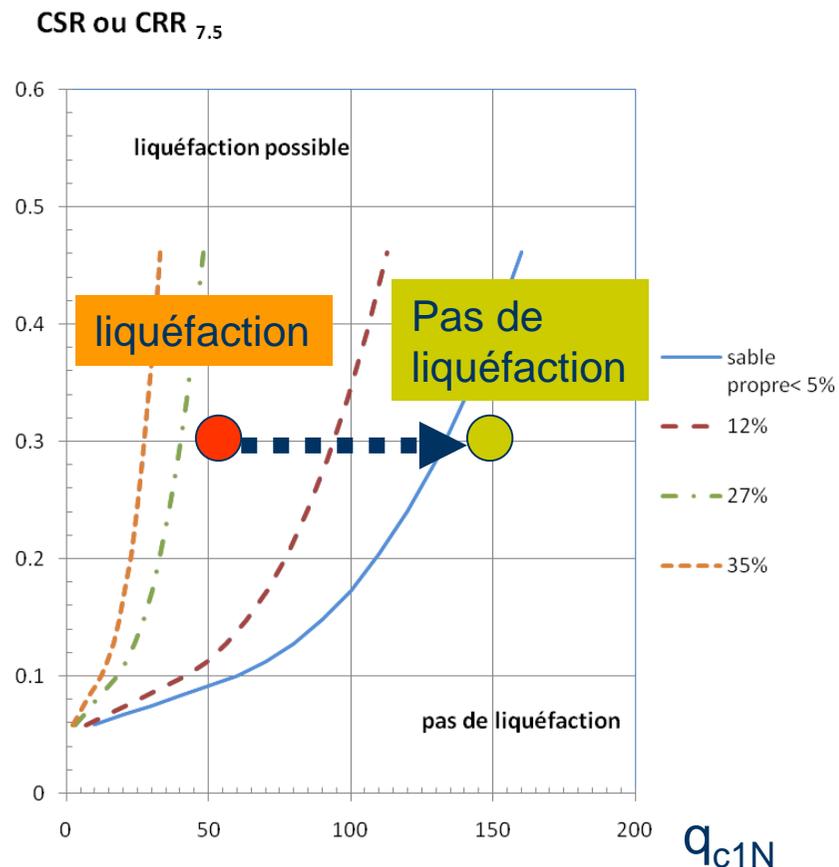
Action 3 : en diminuant les sollicitations dans le sol ce qui se traduira par une réduction du cisaillement et de la distorsion dans le sol

Action 4: en confinant le sol liquéfiable

en combinant certaines des actions précédentes.

ACTION 1: augmentation du CRR

L'augmentation de la compacité, en diminuant le volume des vides du sol et donc son caractère contractant, permet d'augmenter sa résistance au cisaillement

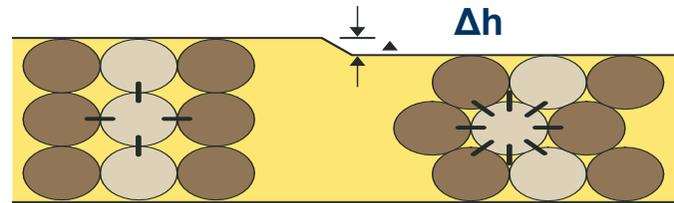


ACTION 1: augmentation du CRR

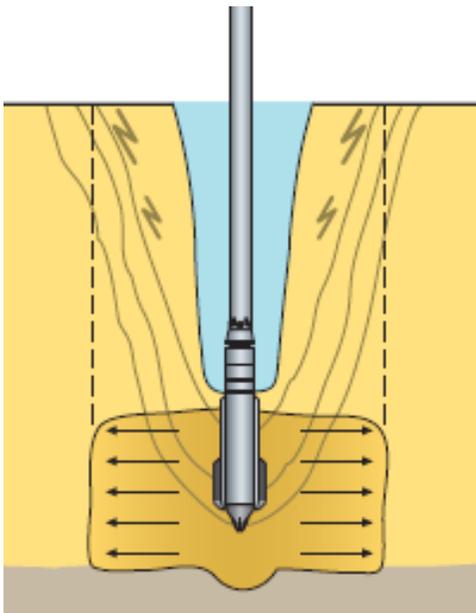
COMMENT choisir la méthode d'amélioration la plus appropriée ?

ACTION 1: augmentation du CRR

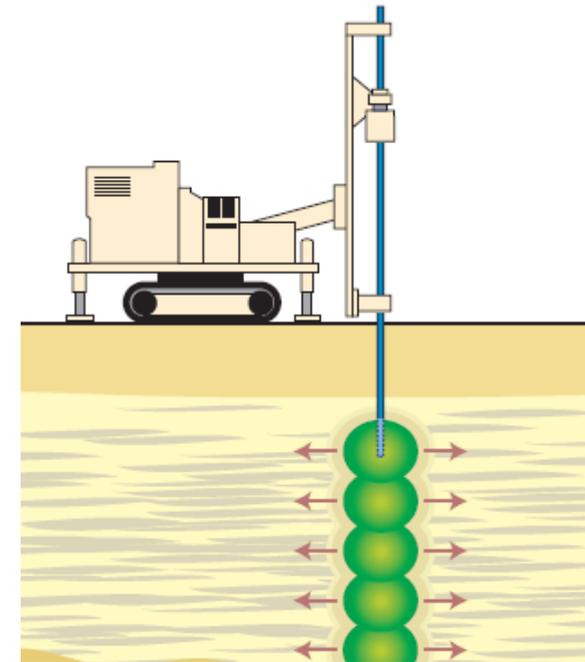
2 manières de réduire l'indice des vides d'un sol:



Par vibration



Par compression

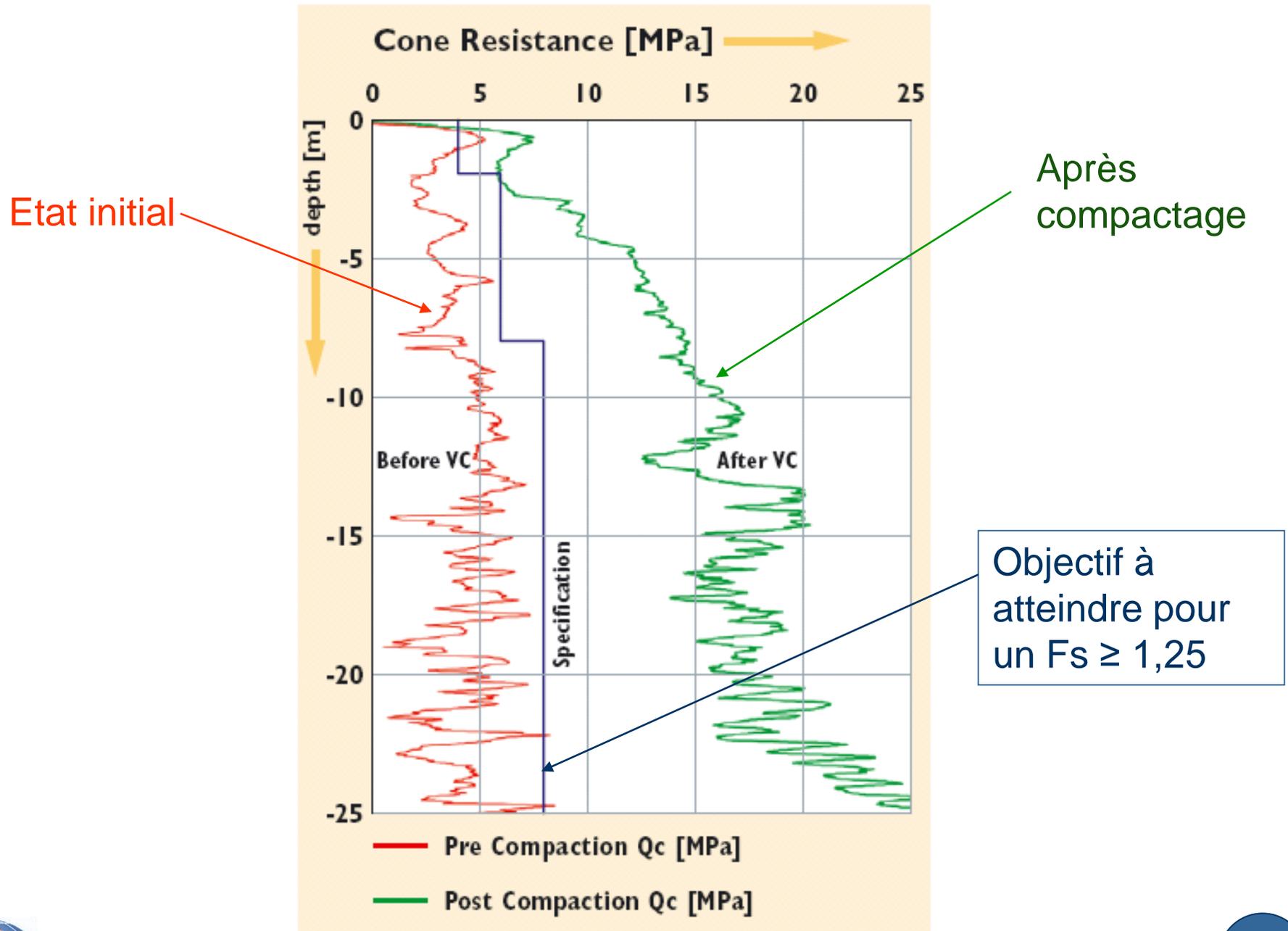


ACTION 1: augmentation du CRR

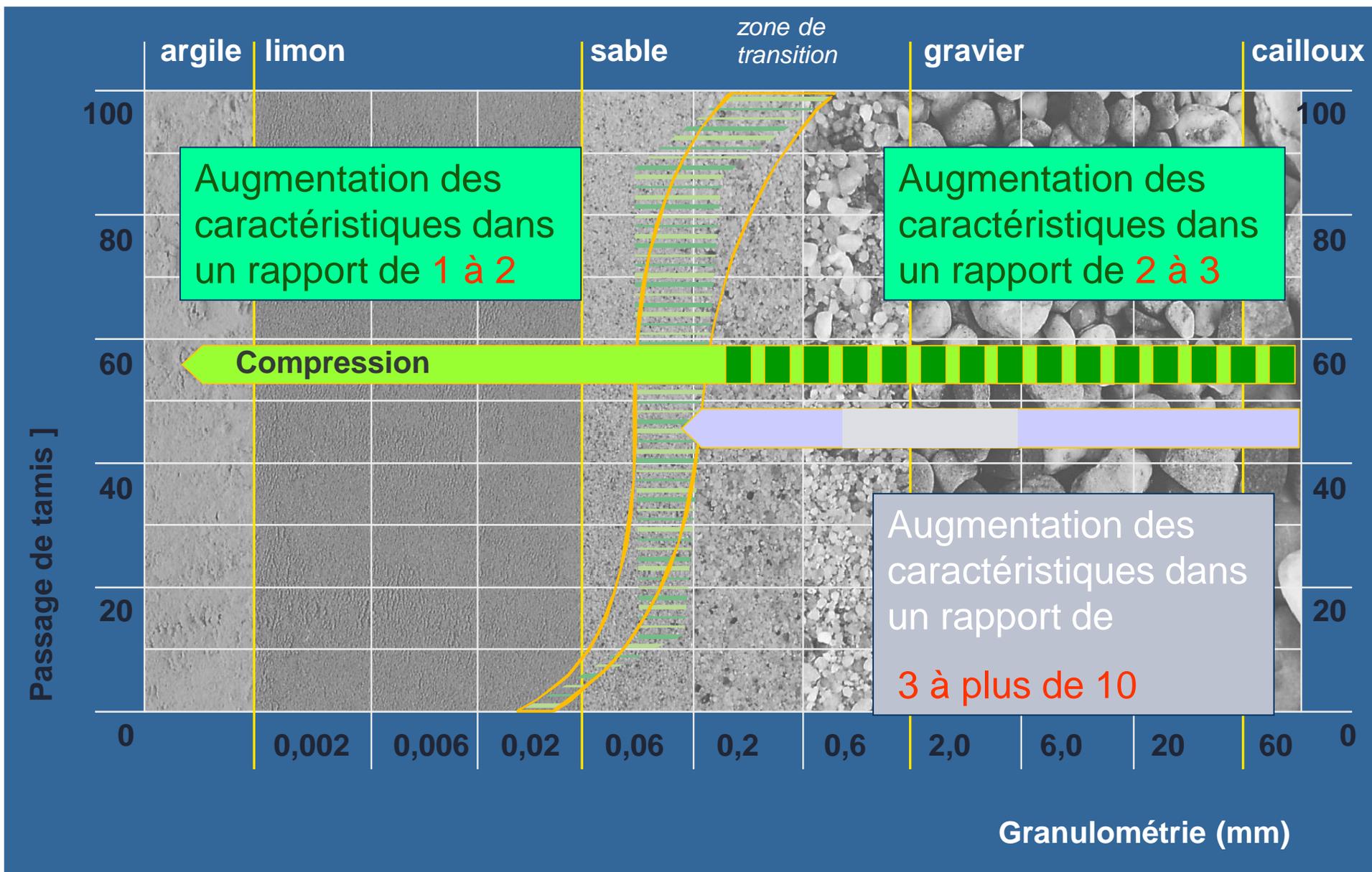
Procédés utilisés

| Amélioration de sol | | Renforcement de sol par inclusions | |
|------------------------------------|----------------------|------------------------------------|--|
| Par compression | Par vibration | Par compression | Par compression et vibration |
| Pre-chargement avec ou sans drains | Vibro compactage | Injection solide (CHS) | Colonnes ballastées Plots ballastés |
| Injection solide (CHS) | Compactage dynamique | | Colonnes de béton vibré (Colonne Eliterre) |

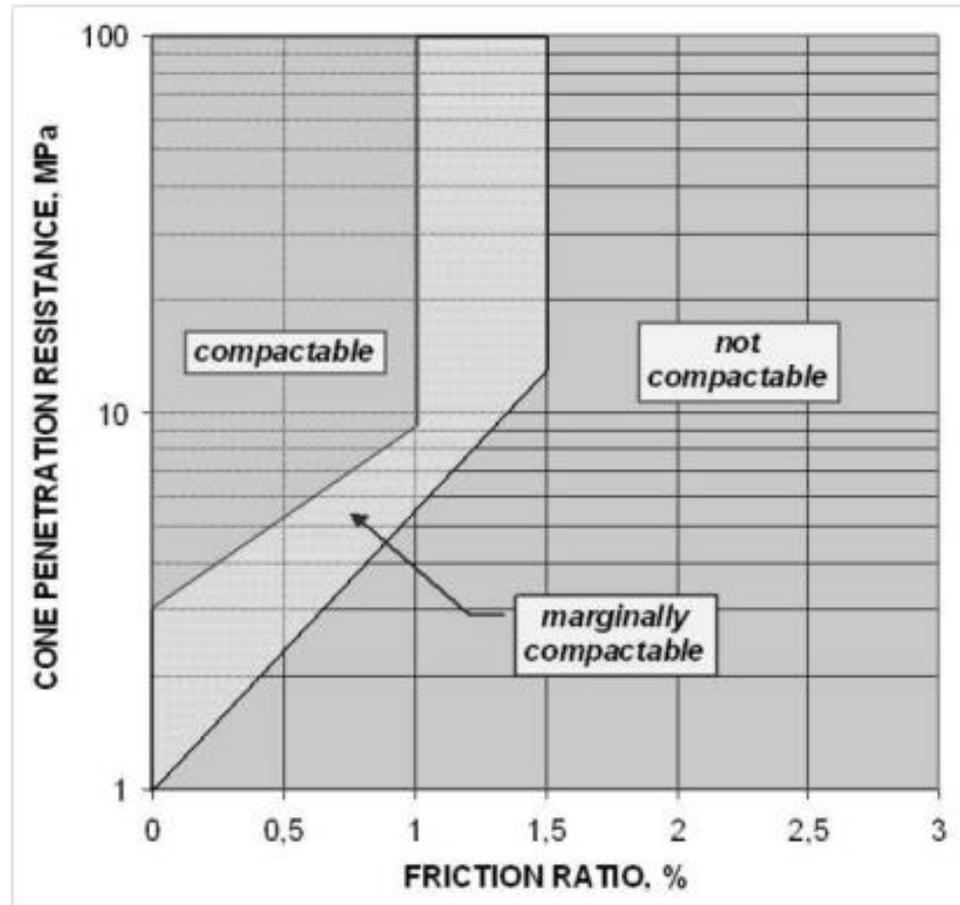
ACTION 1: augmentation du CRR



ACTION 1: augmentation du CRR

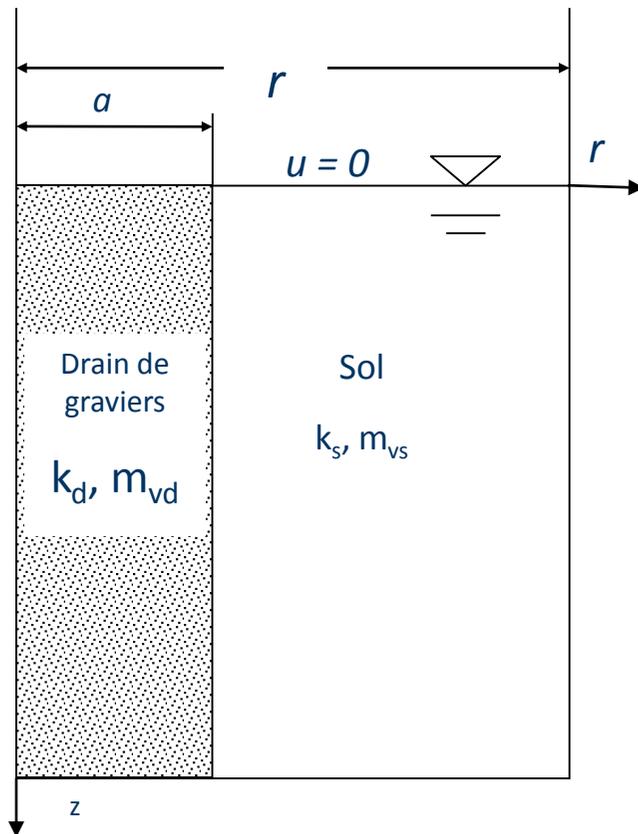


ACTION 1: augmentation du CRR



Compactage par vibration des sols basé sur l'essai CPT (Massarsch 1991)

ACTION 2 : drainage



Afin d'éviter la liquéfaction, un système de drainage n'est efficace que si la **dissipation est suffisamment rapide** par rapport à la génération des surpressions interstitielles.

Type de drains utilisés:

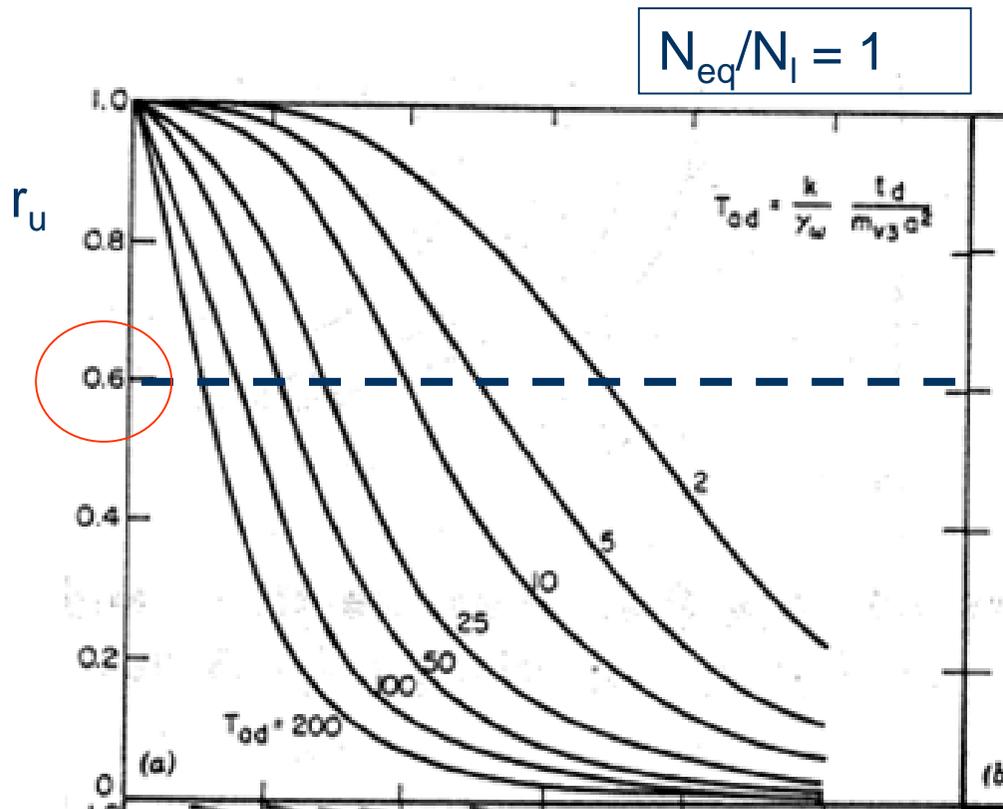
- drains de sables,
- drains de graviers,
- ou des drains tubulaires spécifiquement conçus pour cette application.

On exclut les drains plats préfabriqués.

Différents auteurs ont travaillé sur le sujet
Booker et al (1976) fût le premier

ACTION 2 : drainage

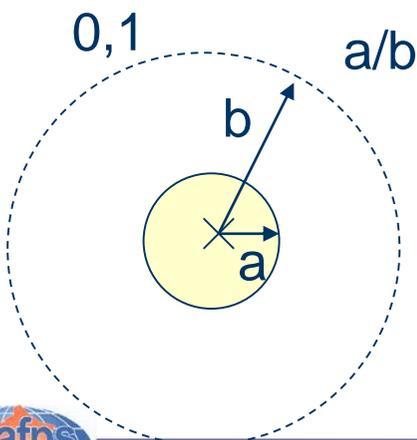
Méthode Seed et Booker (1977)



A partir de :

- la perméabilité du sol,
- la durée du séisme,
- la compressibilité du sol,
- la durée du séisme,
- le nombre de cycles équivalents N_{eq} du séisme,
- le nombre de cycles conduisant à la liquéfaction du sol N_l

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



Définition de l'espacement l des drains
 $b = 1.05(l/2)$ pour une maille triangulaire
 $b = 1.13(l/2)$ pour une maille carrée



ACTION 3: diminution des sollicitations

Le potentiel de liquéfaction peut être réduit par une diminution de la déformation de cisaillement du sol (distorsion) entre les éléments de renforcement.

La mise en place d'éléments de renforcement rigidifiant, diminue la distorsion moyenne du volume renforcé γ_{hom} (sol homogénéisé équivalent)

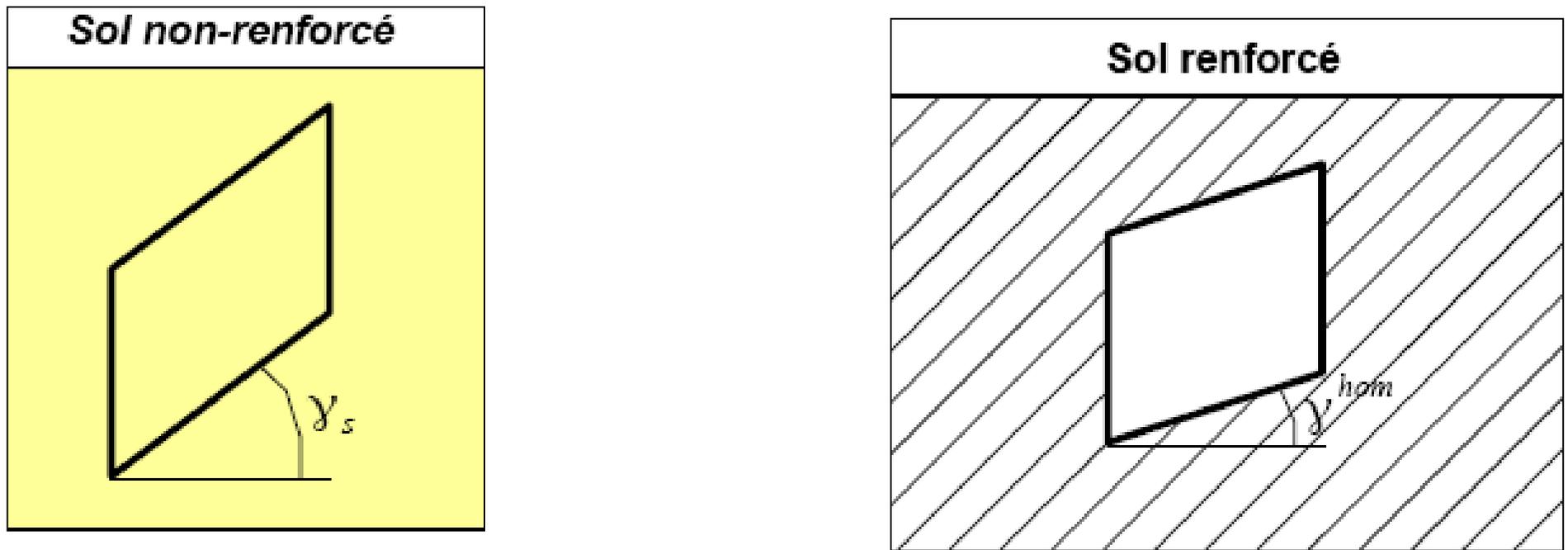


Figure 1-40 :sol renforcé et non renforcé (d'après de Buhan 2012)

ACTION 3: diminution des sollicitations

Comment déterminer le module moyen du massif du sol renforcé ?

G_L du massif du sol renforcé est encadré par les bornes de Voigt et Reuss soit entre la moyenne harmonique et la moyenne arithmétique :

$$\left(\frac{1-\eta}{G_s} + \frac{\eta}{G_e} \right)^{-1} = \langle 1/G \rangle^{-1} \leq G_L \leq \langle G \rangle = (1-\eta)G_s + \eta G_e$$

Exemple: pour une inclusion: $G_e = 1000$ MPa et un sol et $G_s = 10$ MPa

Taux de substitution $\eta = 5\%$: $10,5 \text{ MPa} \leq G_L \leq 59,5 \text{ MPa}$

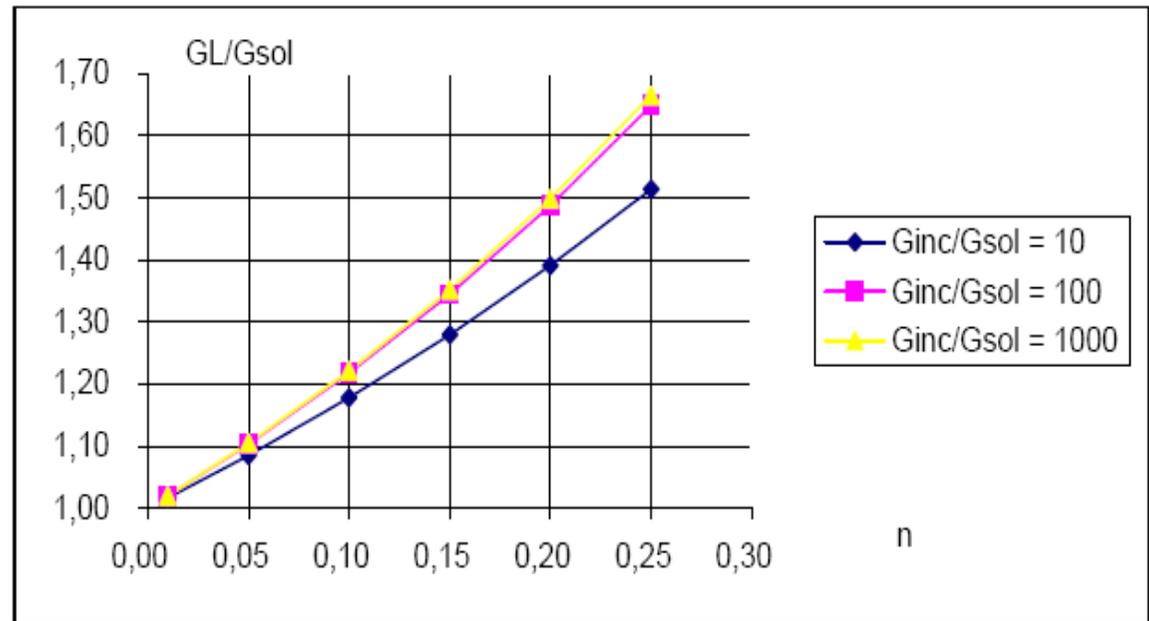
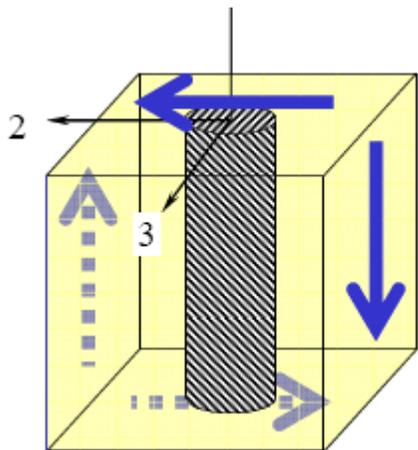
$$1,05 \leq G_L/G_s \leq 5,95$$

ACTION 3: diminution des sollicitations

Comment déterminer le module moyen du massif du sol renforcé ?

Pour des matériaux homogènes, élastiques et isotropes l'évaluation quasi-exacte de ce module G_L est donnée par Hashin (1983).

$$G_L \cong G_s + \frac{\eta}{(1-\eta)/(2G_s) + 1/(G_c - G_s)}$$



Commentaires:

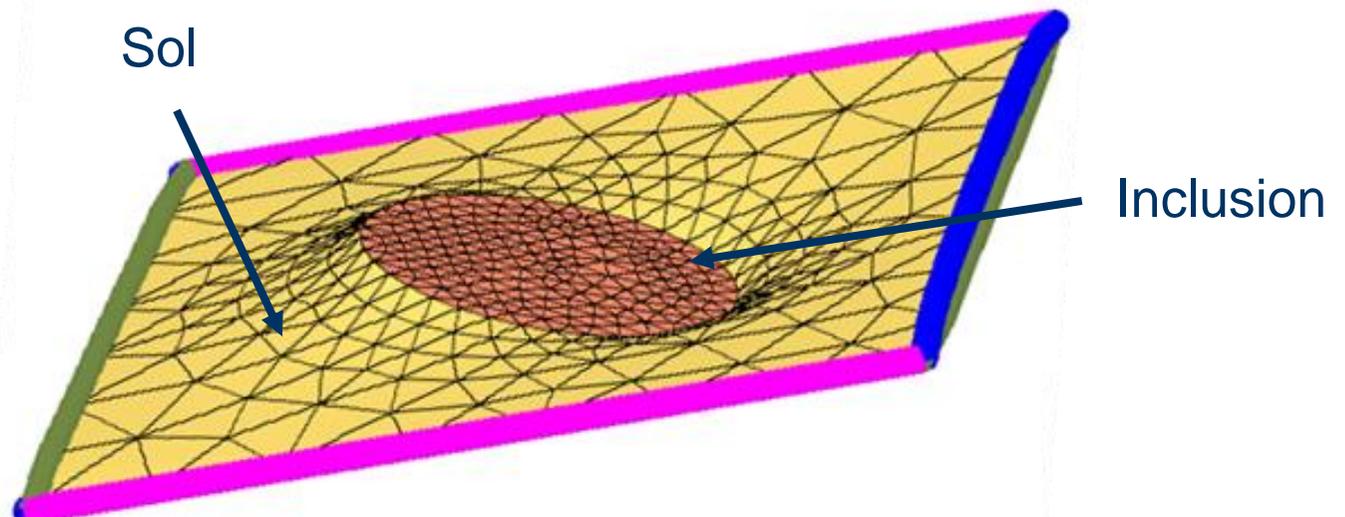
Hashin ne s'applique pas pour des lentilles de faible épaisseur.

ACTION 3: diminution des sollicitations

La distorsion du sol entre les éléments de renforcement n'est pas homogène (Guéguin et de Buhan 2012),



La distorsion moyenne du volume renforcé γ_{hom} n'entraîne pas nécessairement une réduction de la distorsion équivalente en tout point du sol :



Conséquence: si $\gamma_{\langle \text{sol} \rangle} > \gamma_{\text{hom}}$ on surestime la réduction de la distorsion du sol à partir de γ_{hom} .

ACTION 3: diminution des sollicitations

Bilan

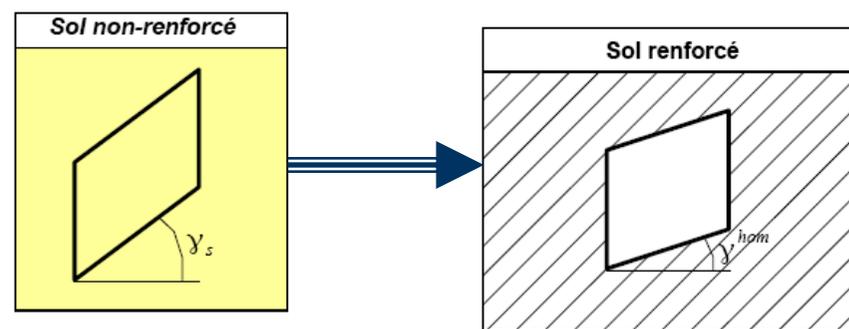
Le risque de liquéfaction est directement relié à la distorsion
Le risque est d'autant plus important que la distorsion est élevée

En présence d'éléments de renforcement de sol, 2 actions s'opposent :

1) d'un coté, augmentation de la rigidité du massif renforcé et

diminution de la distorsion du massif γ_{hom}

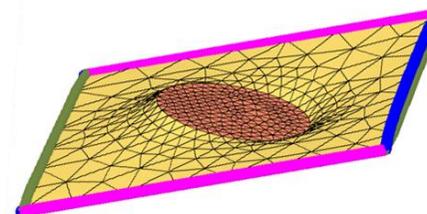
Action favorable



2) De l'autre coté, non homogénéité des déformations au sein du massif renforcé:

$$\gamma_{<sol>} > \gamma_{hom}$$

Action défavorable



Comment calculer un coefficient de sécurité ?

ACTION 3: diminution des sollicitations

Méthode simplifiée proposée par l'AFPS pour les cas élémentaires

Les étapes sont les suivantes:

1) Calcul du module de cisaillement du sol renforcé homogénéisé G_L équivalent du massif renforcé

2) Calcul du coefficient $kg = \frac{\gamma_{\text{hom}}}{\gamma_s} = \sqrt{\frac{G_L}{G_s}}$ (cf. Guéguin et al. 2012)

3) un coefficient sécurité final:

$$F_s \text{ final} = F_s \text{ initial} / kg$$

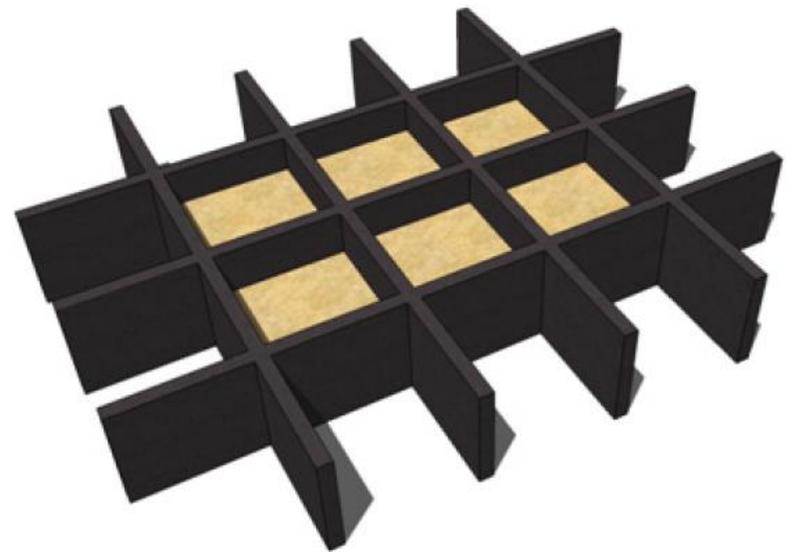
ACTION 4 : en confinant le sol

Confinement du sol

Confinement vertical



Confinement latéral

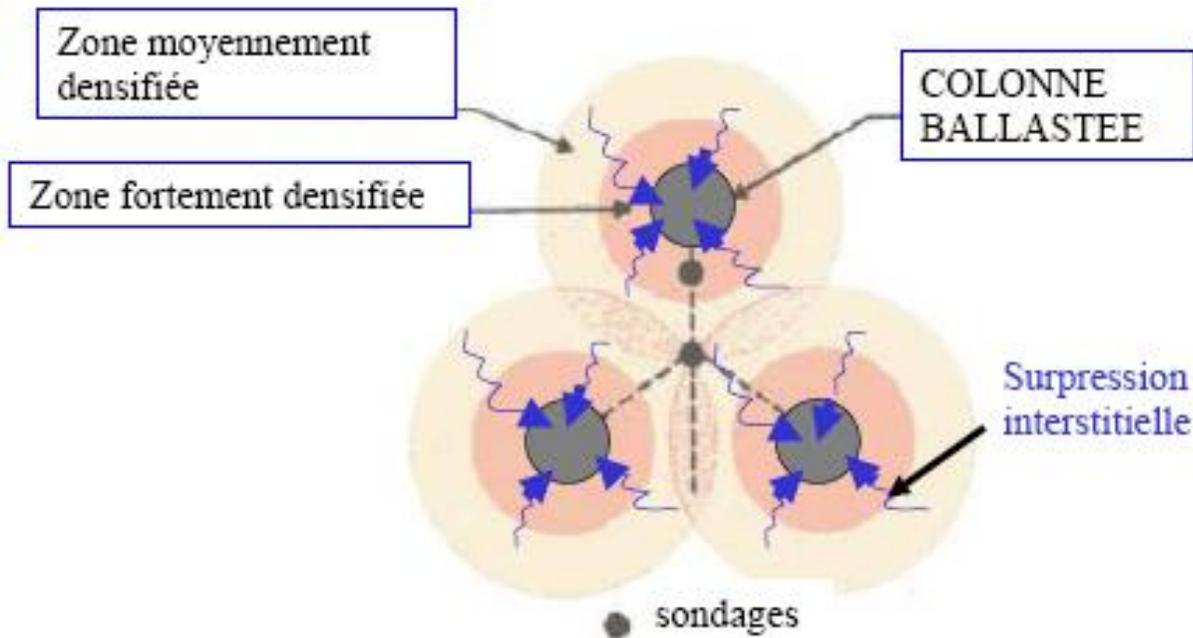


Justification des traitements anti-liquéfaction

- Inclusions souples
- Inclusions rigides
- Confinement

Inclusions souples granulaire (colonnes ou plots ballastés)

Elles jouent sur une combinaison des actions:

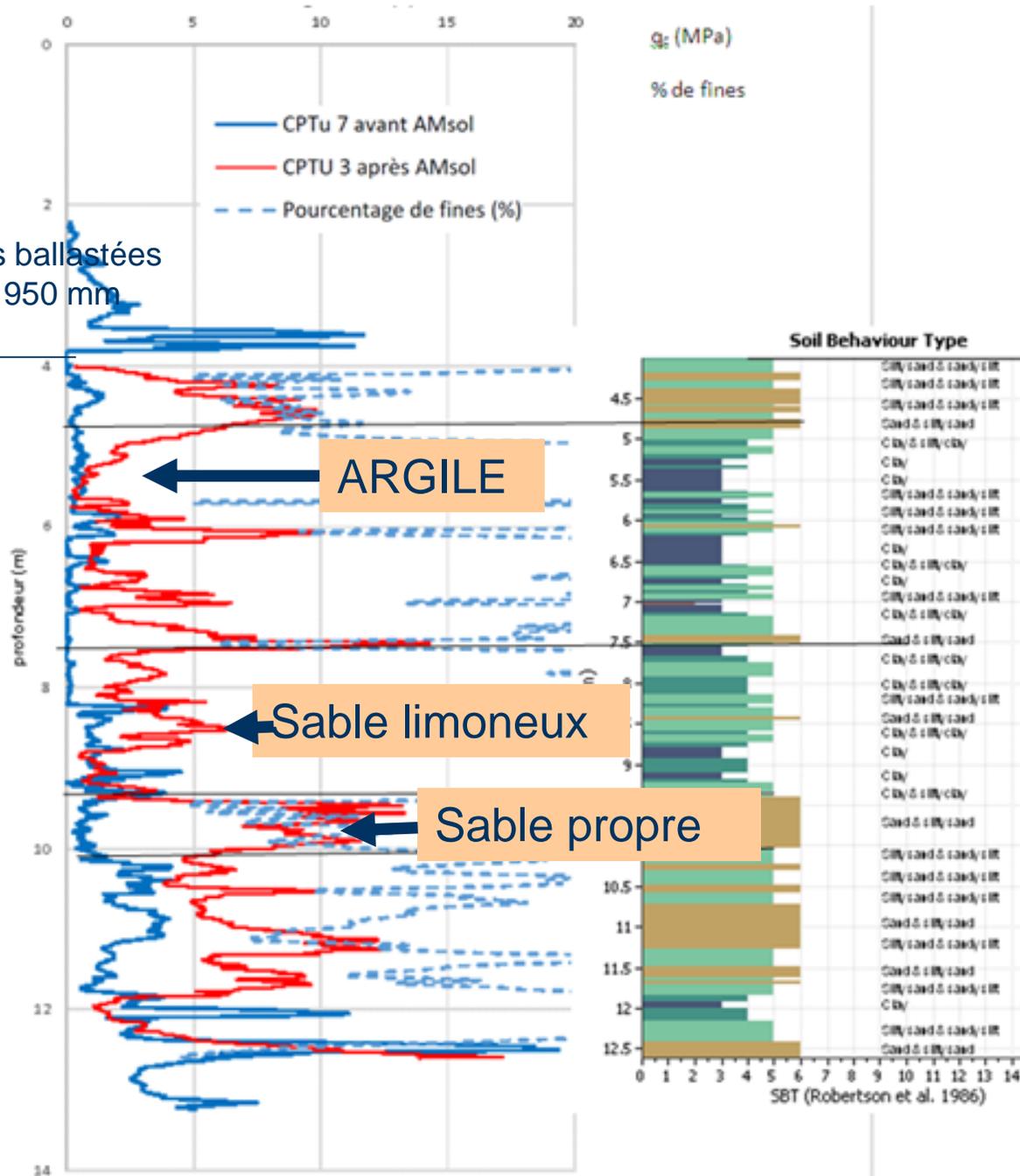


- 1) amélioration de la compacité par les modes de mise en œuvre (vibration, incorporation avec refoulement),
- 2) Caractère drainant des colonnes (Madhav MR, et Arlekar JN 2000, Seed et Booker 1977) qui peut contrôler les augmentations transitoires de pression interstitielle dans les conditions sismiques considérées
- 3) Diminution des sollicitations dans le sol

EXEMPLE COLONNES BALLASTÉES

QUAIS DES AVISOS MARTINIQUE

Colonnes ballastées
diamètre 950 mm



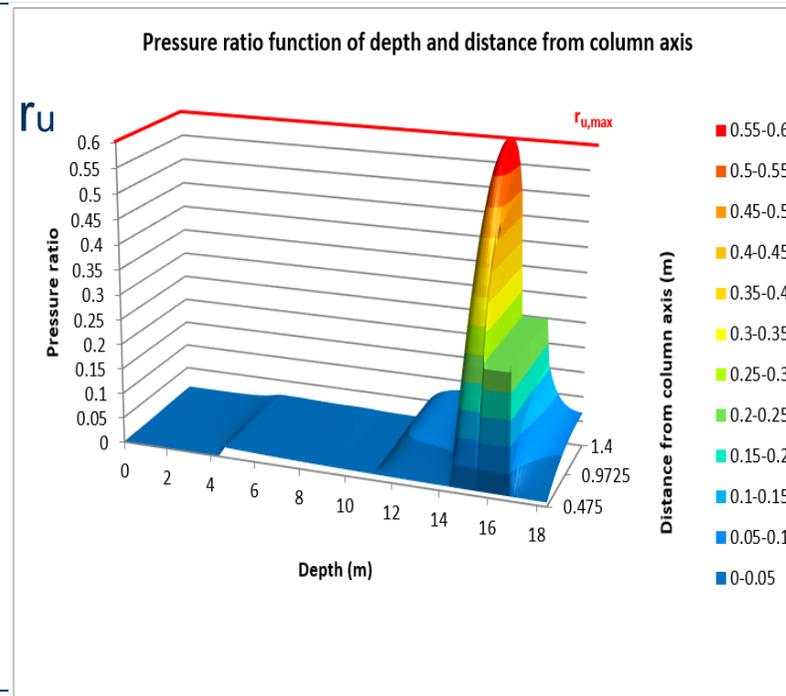
EXEMPLE COLONNES BALLASTÉES

QUAIS DES AVISOS MARTINIQUE

Dans les sables propres potentiellement liquéfiables: amélioration importante de la compacité qui permet de supprimer le risque de liquéfaction,

Dans les sables limoneux liquéfiables: amélioration pas suffisante. Justification en tenant compte également:

- de la diminution des sollicitations au sein du massif de sol
- du drainage selon Seed et Booker (1977)



Maille 2,8 x 2,8 m
Diamètre 0,95 m

Dans les argiles: aucun problème de liquéfaction,

Inclusions rigides

Pour les inclusions rigides, pas de possibilité de drainer et pas de diminution notable des sollicitations sismiques sur le sol pour des faibles taux de substitution

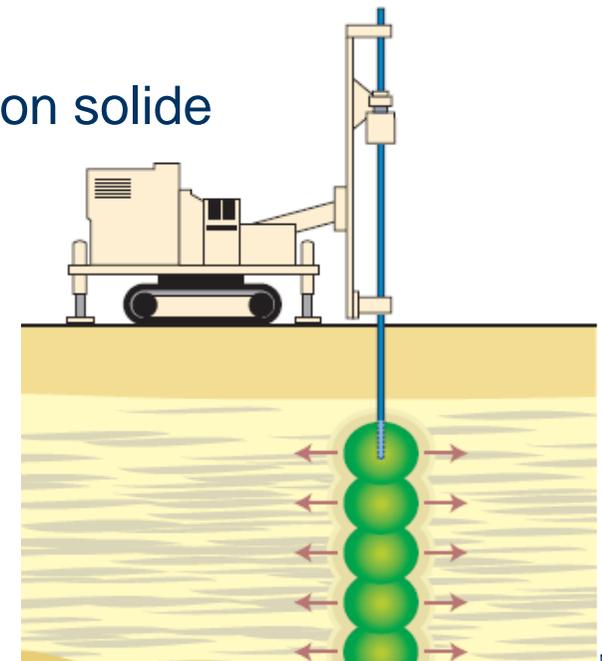
donc la seule possibilité :

Augmentation de la compacité des sols par refoulement ou vibration,

Colonne vibro-bétonnée
(Colonne Eliterre)



Injection solide

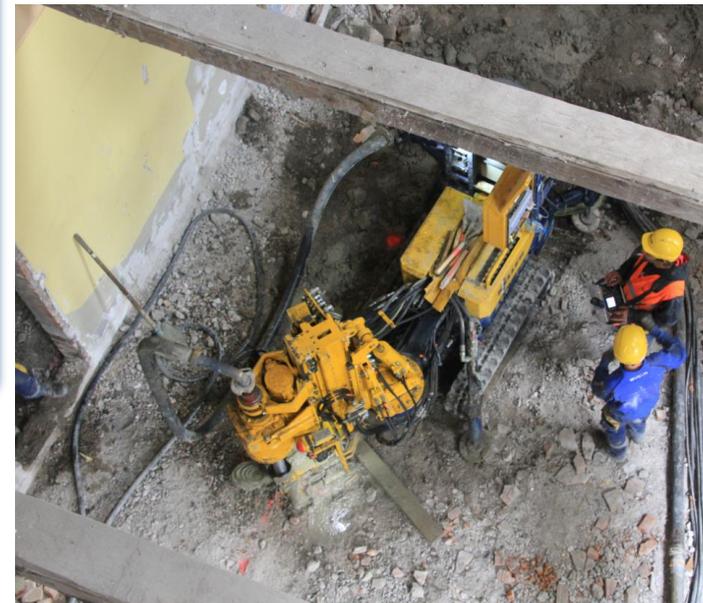
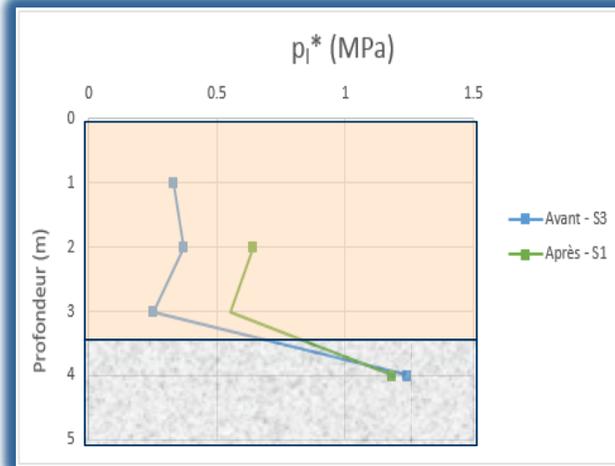
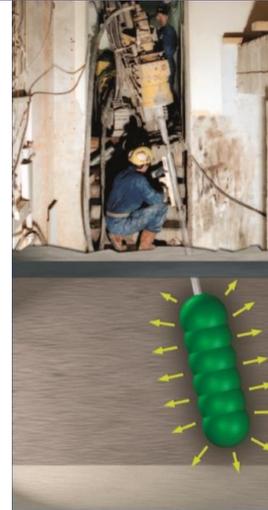
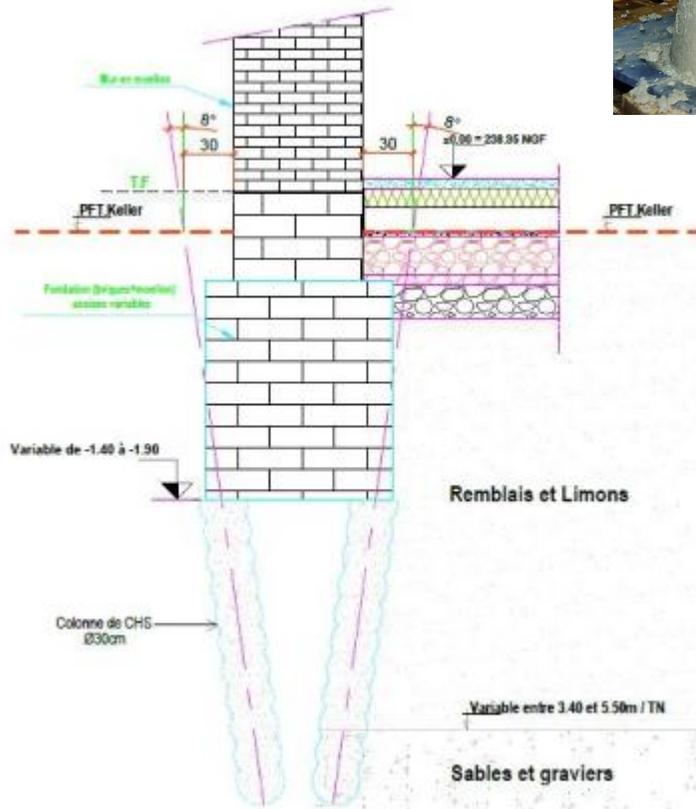


EXEMPLE INJECTION SOLIDE

Réhabilitation d'une école à Mulhouse

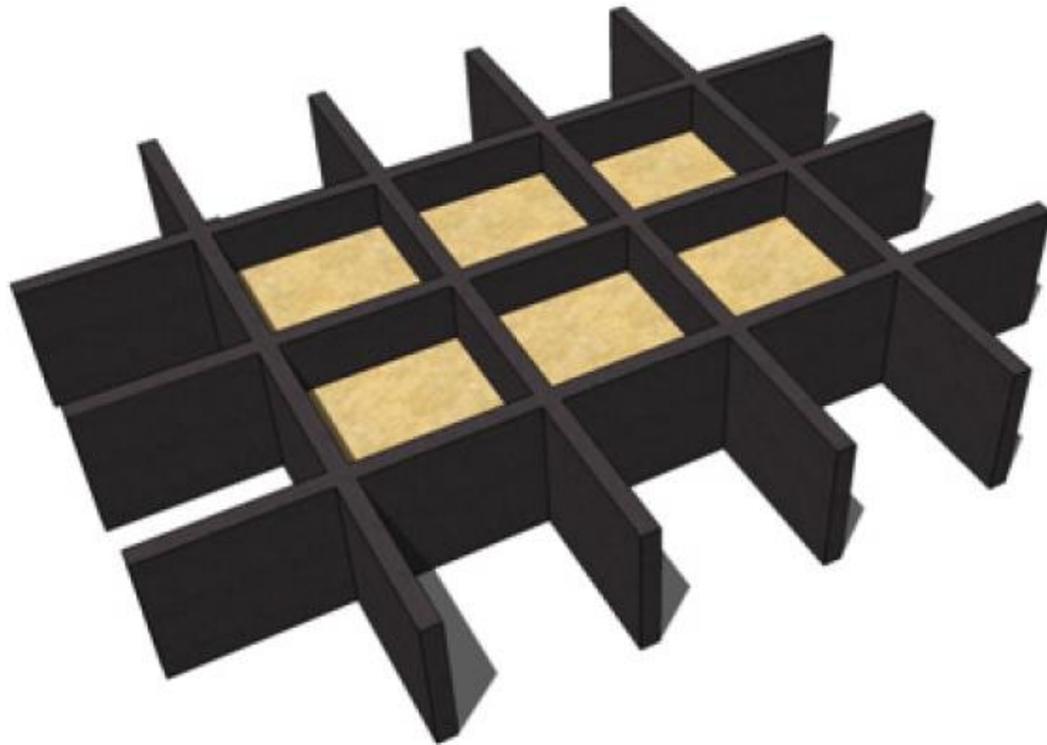
Coupe type sur fondations (Murs existants)

ECHELLE 1/25



Confinement

Principe : confiner le sol entre des parois formant des cellules de dimensions équivalentes dans les 2 directions



Avantages:

- **Augmente le module** de cisaillement équivalent du sol,
- **réduit les contraintes** et les déformations transmises au sol confiné, (si esp. Faible),
- permet d'éviter un éventuel glissement latéral (**lateral spreading**)

Recherche KELLER – Université de Californie

N'Guyen T.V., Rayamajhi D., Boulanger R.W., Ashford S.A., Lu J., Elgamal A., and Shao L. (2012). Effect of DSM grids on shear stress distribution in liquefiable soil. Geotronics 2012. p.1948-1957.

À partir de la méthode simplifiée de Seed et Idriss (1971) pour la détermination du CSR, N'Guyen et al. 2012 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 :

$$F_{s\text{-final}} = \frac{F_{s,\text{initial}}}{R_{CSR}}$$

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

C_G : facteur équivalent de cisaillement de l'élément de renforcement de sol qui dépend de sa géométrie ($C_G = 1 - 0,5\sqrt{1 - A_r}$),

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

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

γ_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, $\gamma_r = 1 - (1 - A_r)^2 \left(\frac{G_r - 1}{240} \right)^{0,4}$. γ_r est égale à 1 si le sol et les caissons se déforment de la même façon en cisaillement pur.

Exemple de confinement

Construction 2 bâtiments diesel de secours ultime (DUS) à CHOOZ (08).

Maille: 5,35 x 5,0 m

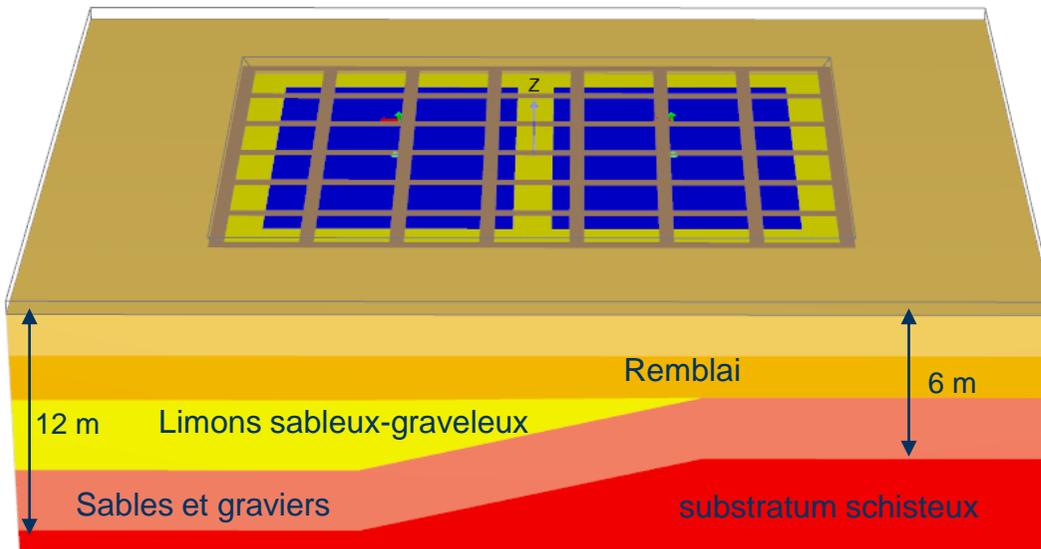
Diamètre colonne de jet-grouting: 1 m

Taux de substitution: 31 %

Type de fondation: radier

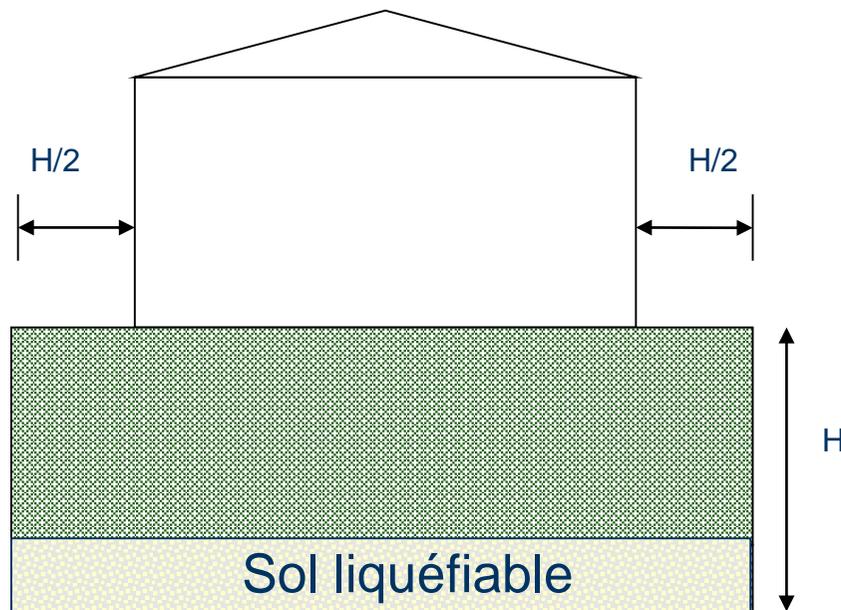
Surcharge aux ELS: 100 kPa

Problème de liquéfaction: $F_s = 1 < 1,25$



Dispositions constructives

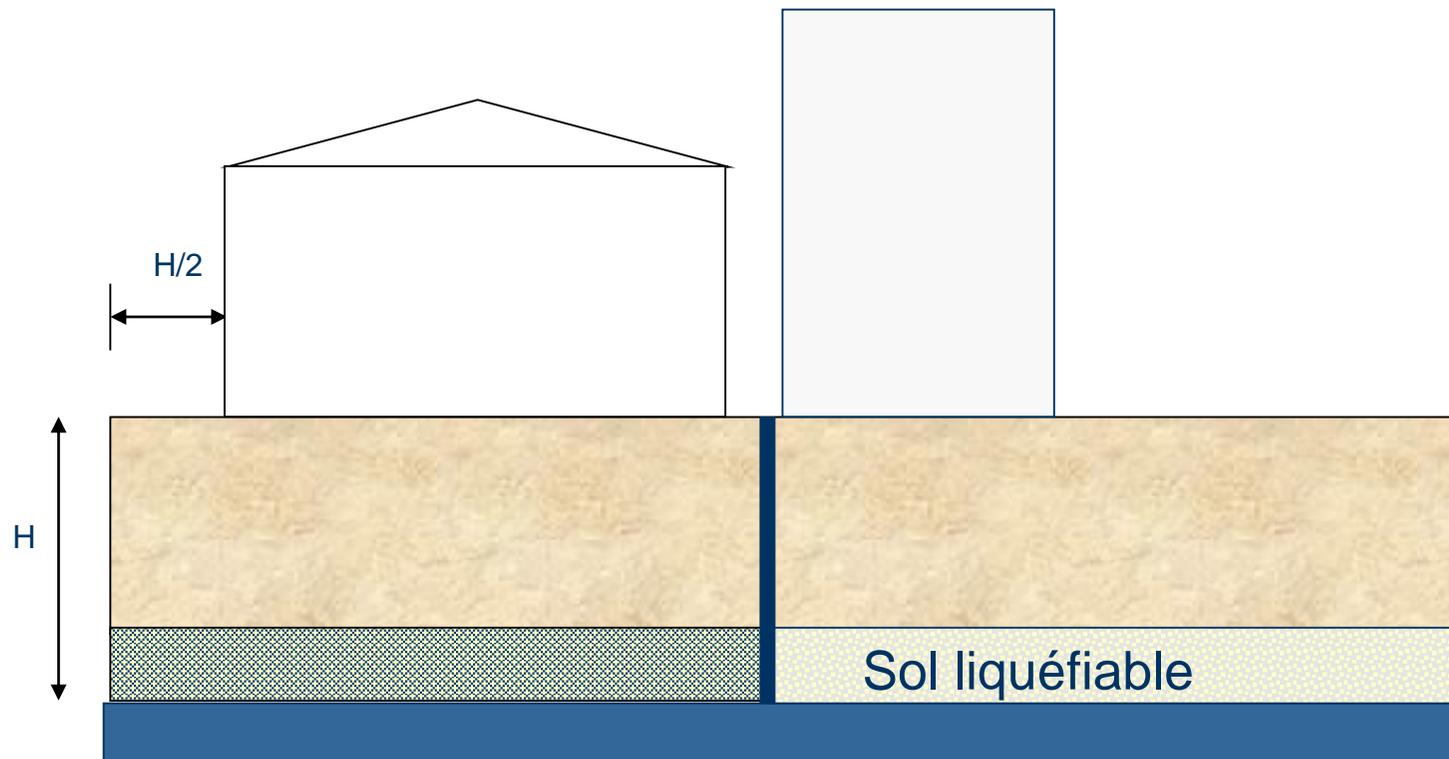
- largeur du débord = moitié de la profondeur de la base de la couche liquéfiable ;
- une étude particulière peut dans certains cas permettre d'ajuster cette largeur de débord



Dispositions constructives

Dans certains cas, la limite de propriété ou la présence d'existants ne permet pas ou ne permet que partiellement la réalisation de débord.

Dans ce cas, une étude détaillée devra vérifier la stabilité et estimer les déformations liées à cette liquéfaction pour définir ensuite les dispositions constructives à envisager.



Vérification du degré d'amélioration (augmentation de densité) apporté au terrain, ainsi que l'homogénéisation qui en résulte.

Type de sondages:

pénétrromètre statique (CPT), SPT, pressiomètre, mesures des vitesses de propagations d'ondes, Cross Hole, MASW, bruit de fond ...

Nombre:

- un minimum de 3 par chantier ;
- un tous les 500 m² jusqu'à 3 000 m², un tous les 1 500 m² jusqu'à 10 000 m², un tous les 5 000 m² au delà.

CONCLUSIONS

| | Augmentation du CRR | Diminution des sollicitations | Drainage |
|--|---|-------------------------------|----------|
| <ul style="list-style-type: none"> - Vibrocompactage - Compactage dyn. - Injection solide | X | | |
| Confinement | | X | |
| Inclusions souples | X | x | X |
| Inclusions rigides Classique (petit diamètre) | Effet négligeable | Effet négligeable | |
| Inclusions rigides Procédés particuliers (permettant une augmentation des caractéristiques de sol) | X | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> - Par vibration (vibreux de profondeur) - Par refoulement (injection solide) | | |

MERCI BEAUCOUP POUR VOTRE ATTENTION

