

GUIDE AFPS/CFMS

« Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques »

Justification des traitements anti-liquéfaction

Serge LAMBERT – Keller Fondations Spéciales



Association régie par la loi
du 1.07.1901

Journée Technique AFPS-CFMS du 14 NOVEMBRE 2012

Guide technique : Procédés d'amélioration et de renforcement de sol sous actions sismiques

SOMMAIRE

Introduction

Principes de justification des traitements anti-liquéfaction

- Action 1: augmentation de la compacité
- Action 2 : drainage
- Action 3 : diminution des sollicitations
- Action 4 : confinement

Justification des traitements anti-liquéfaction

- Inclusions souples
- Inclusions rigides
- Confinement

Dispositions constructives

Contrôles

CONCLUSION

La liquéfaction du sol est la source majeure des désordres observés 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 $r_u = u/\sigma'_v \leq 0,6$

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

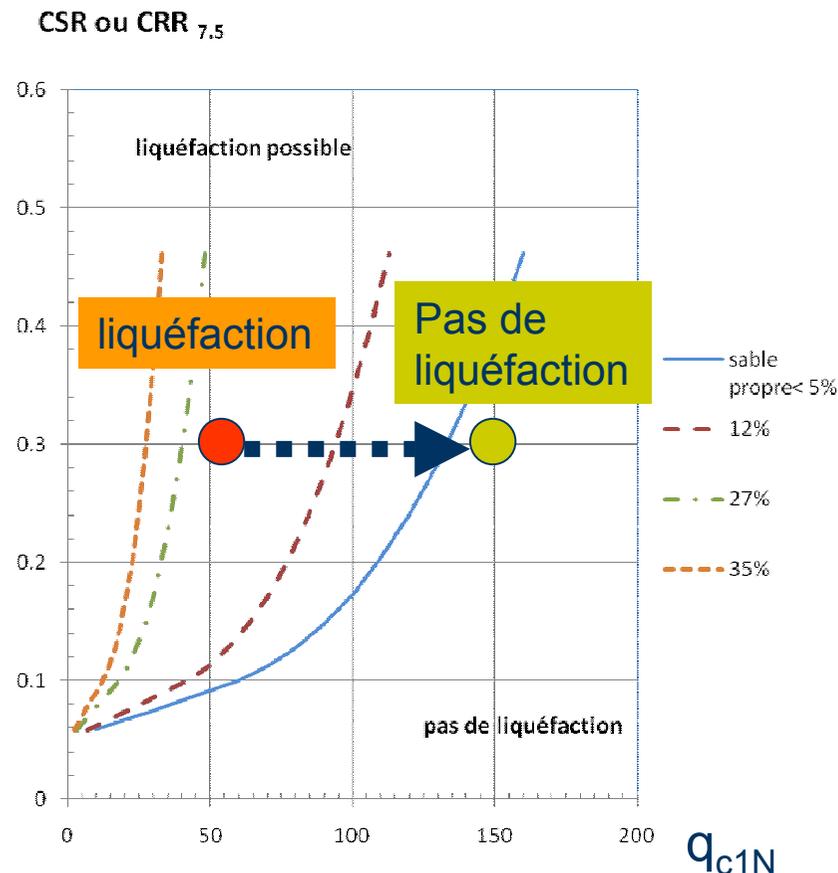
Action 3 : en diminuant les sollicitations dans le sol ce qui se traduira par une réduction du cisaillement et de la distorsion dans le sol

Action 4: en confinant le sol liquéfiable

en combinant certaines des actions précédentes.

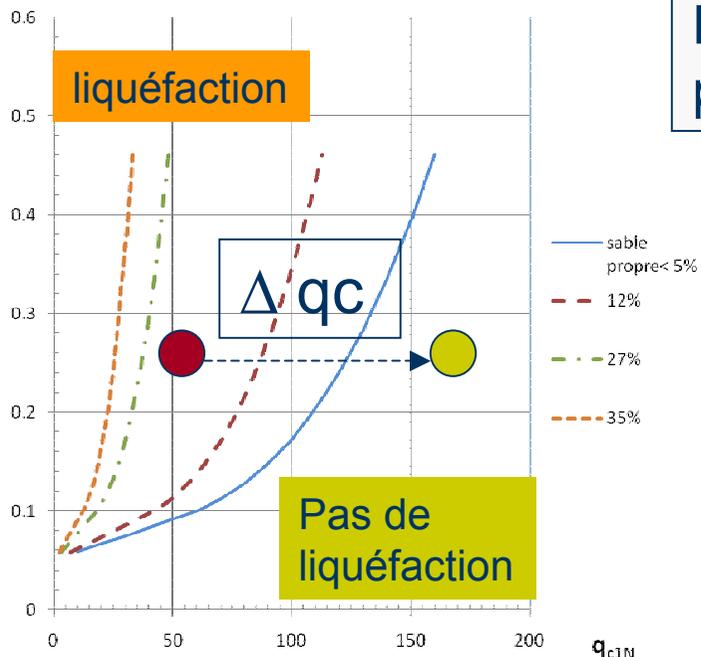
ACTION 1: augmentation du CRR

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

CSR ou CRR _{7,5}



Estimation des volumes de matériaux à incorporer pour compenser la diminution des vides

Pour un sable propre :

$$e_{\min} = 0,4 \quad e_{\max} = 1,$$

Δqc



qc de 5 à 10 MPa

Dr de 40 à 70 %

e de 0,76 à 0,58

$$\Delta Dr = \varepsilon_v \cdot D_{ro} \left(\frac{1 + e_0}{e_{\max} - e_0} \right)$$

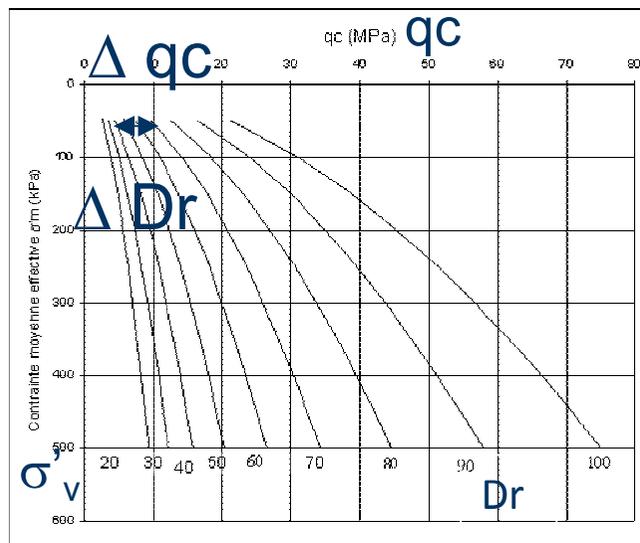


$$\varepsilon_v = \frac{ef - ei}{1 + ei}$$

$$\varepsilon_v = 10\%$$

Att. estimation très approximative des volumes

(e_{\min} et e_{\max} par essais labo)



Corrélation de Robertson pour des sables propres,

Robertson et Cabal 2009]

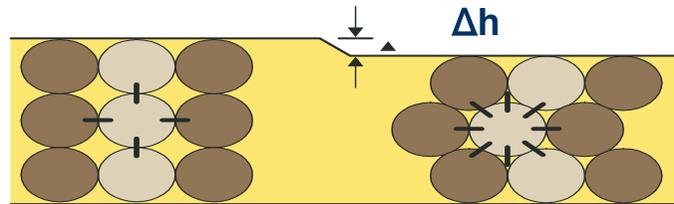


ACTION 1: augmentation du CRR

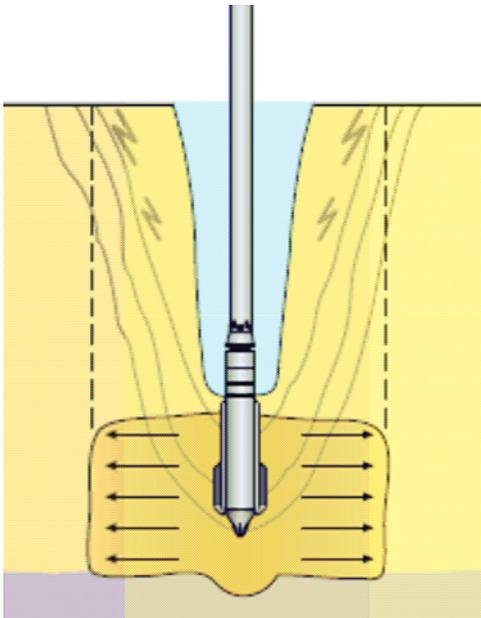
COMMENT choisir la méthode d'amélioration la plus appropriée ?

ACTION 1: augmentation du CRR

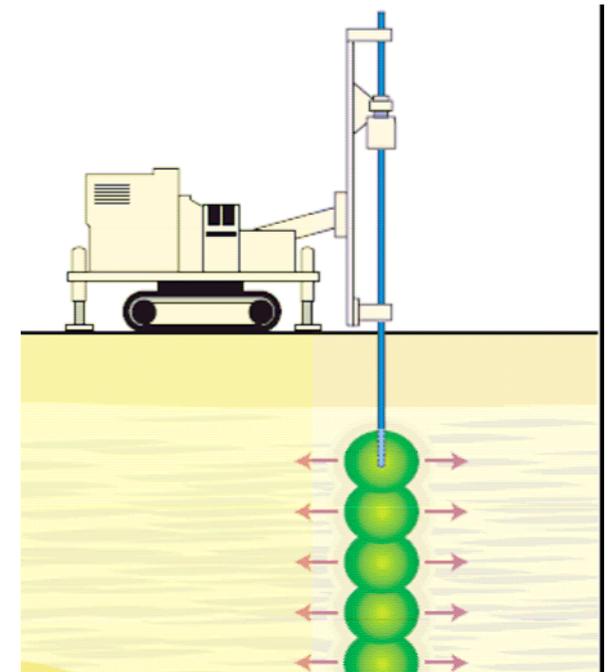
2 manières de réduire l'indice des vides d'un sol:



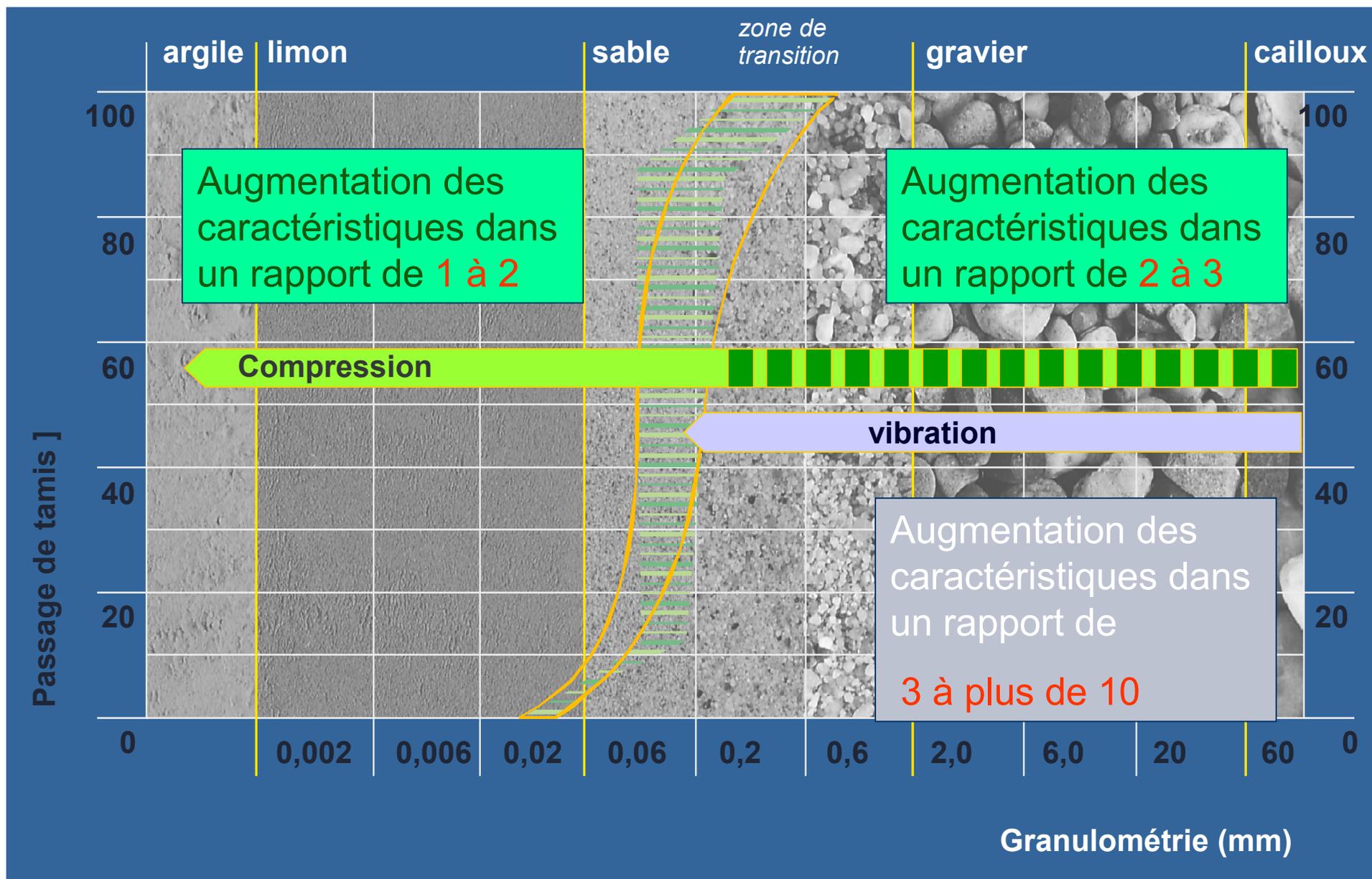
Par vibration



Par compression



ACTION 1: augmentation du CRR

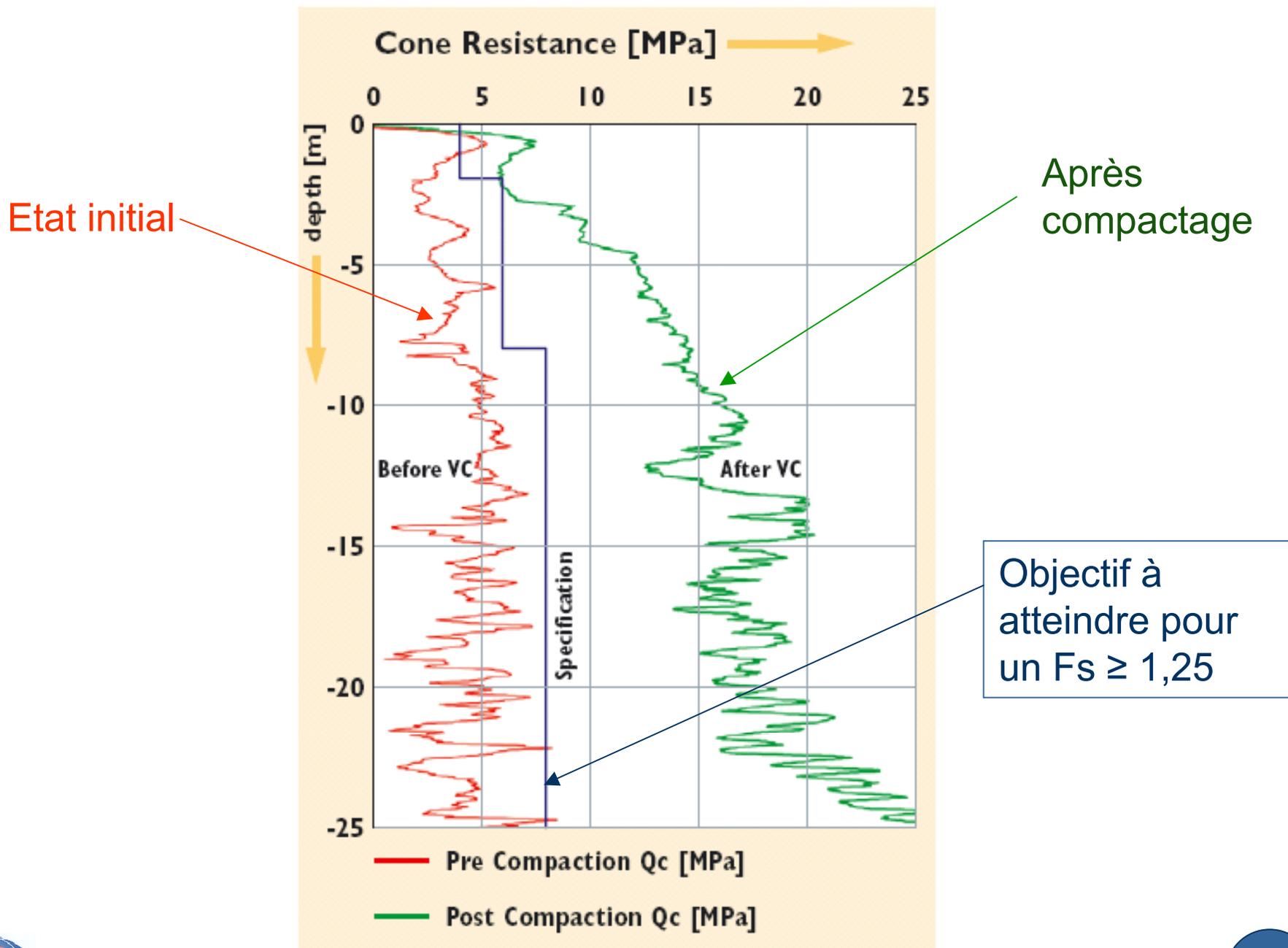


ACTION 1: augmentation du CRR

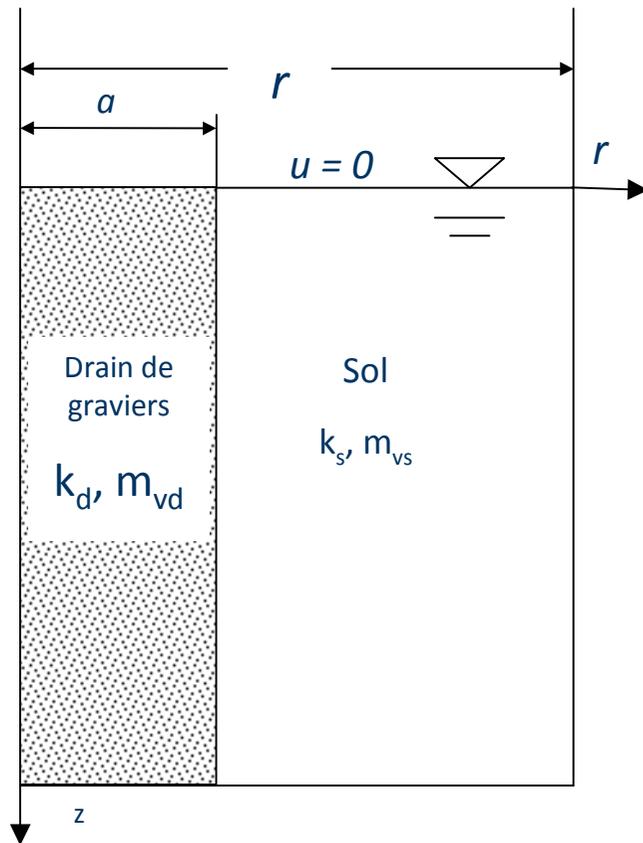
Procédés utilisés

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	Colonnes ballastées
Injection solide	Compactage dynamique		Plots ballastés
Compactage dynamique			Colonnes de béton vibré (VCC)

ACTION 1: augmentation du CRR



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:

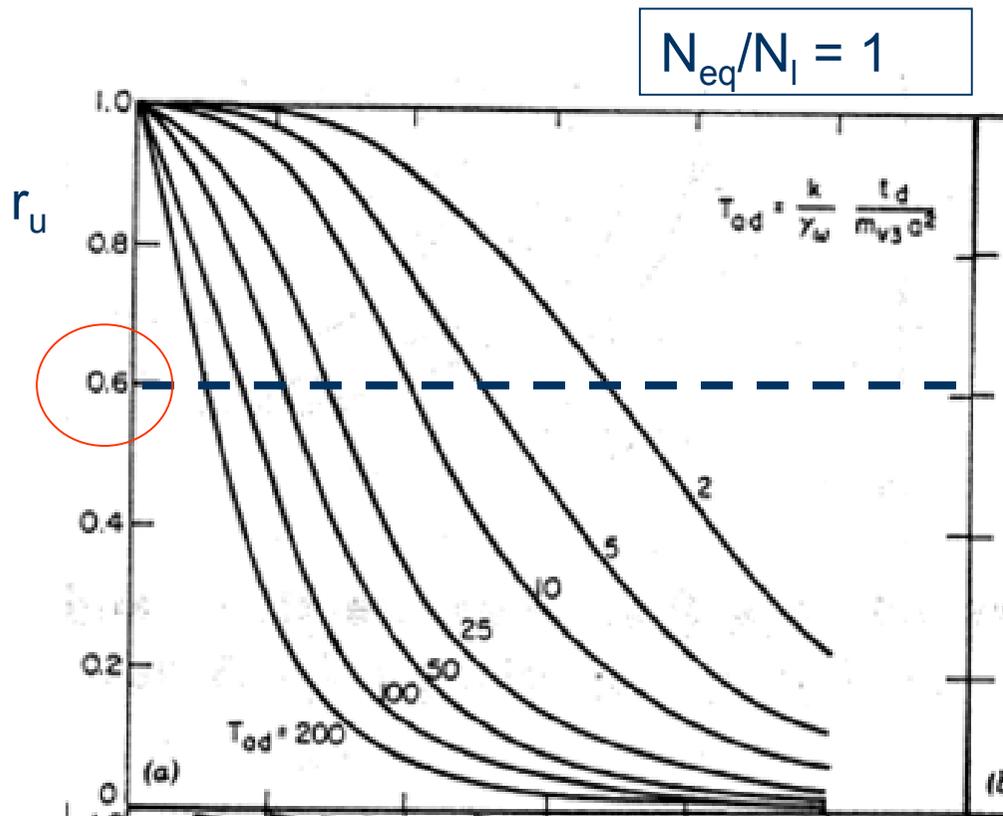
- drains de sables,
- drains de graviers,
- ou des drains tubulaires spécifiquement conçus pour cette application.

On exclut les drains plats préfabriqués.

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

ACTION 2 : drainage

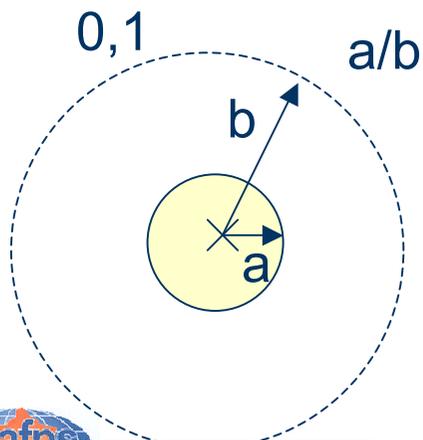
Méthode Seed et Booker (1977)



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 / 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)

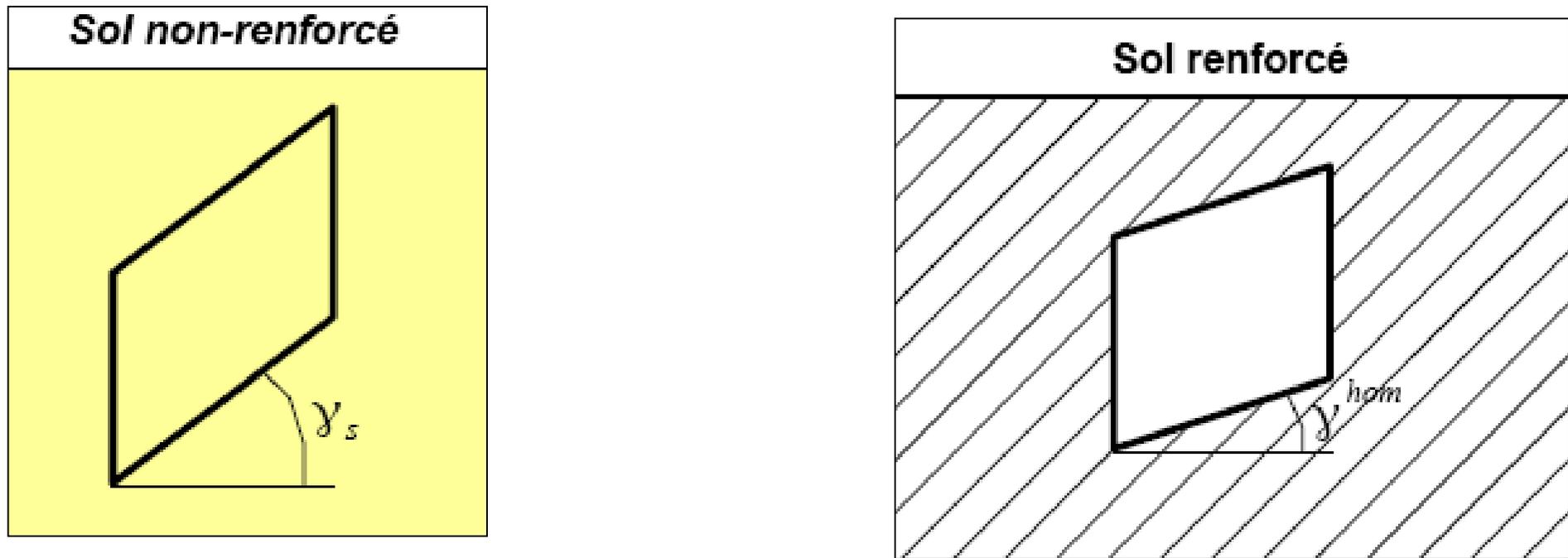


Figure 1-40 :sol renforcé et non renforcé (d'après de Buhan 2012)

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 :

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

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

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

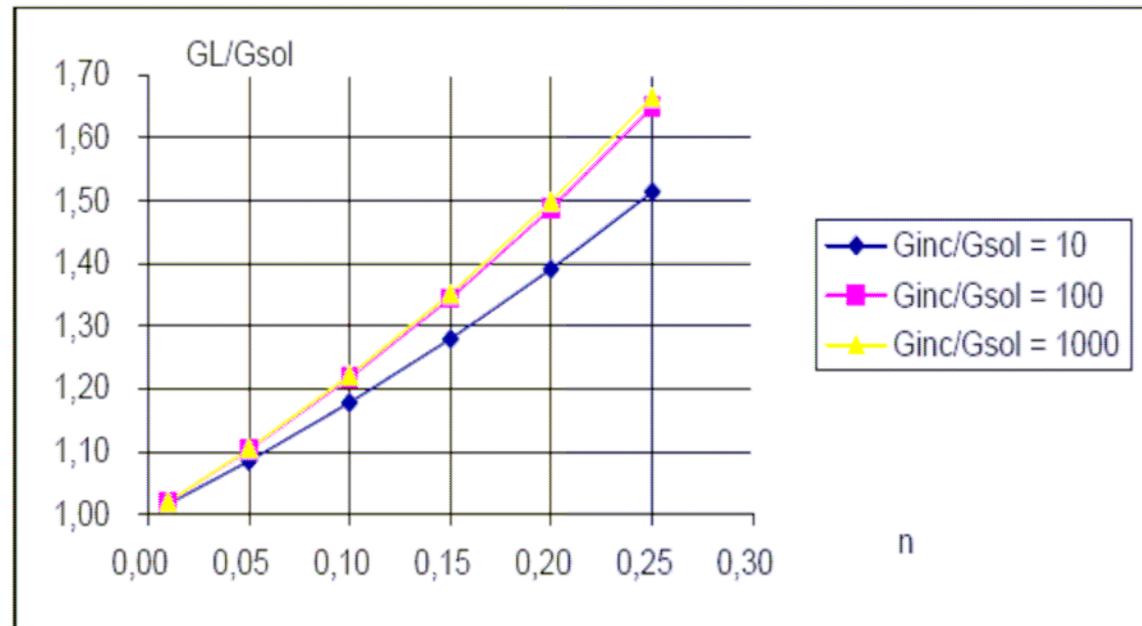
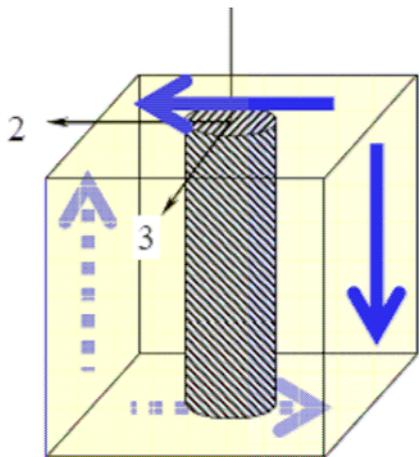
$$1,05 \leq G_L/G_s \leq 5,95$$

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:

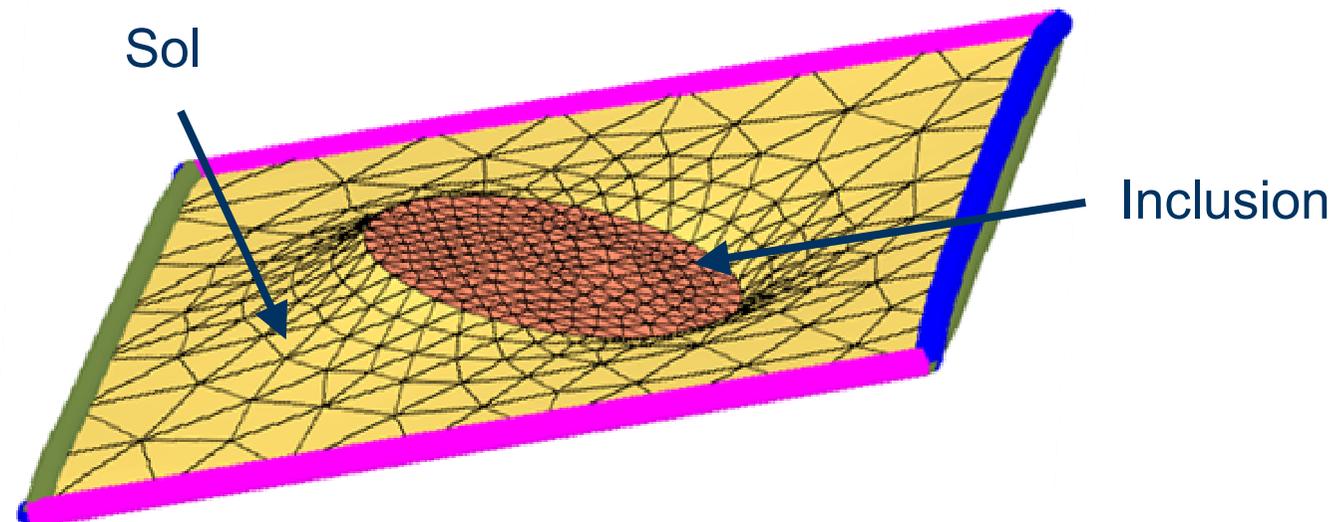
Hashin ne s'applique pas pour des lentilles de faible épaisseur.

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

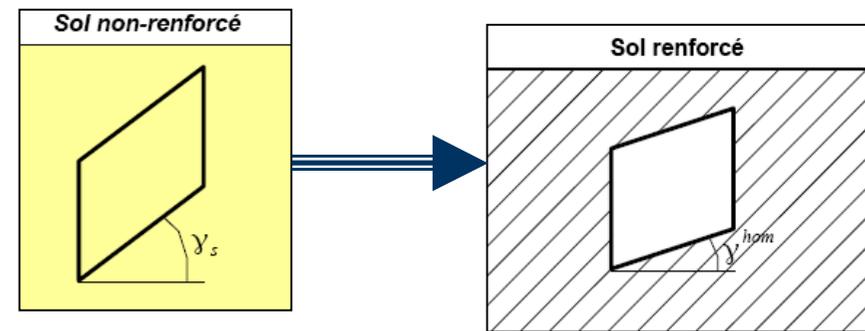
Le risque de liquéfaction est directement relié à la distorsion
Le risque est d'autant plus important que la distorsion est élevée

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

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

diminution de la distorsion du massif γ_{hom}

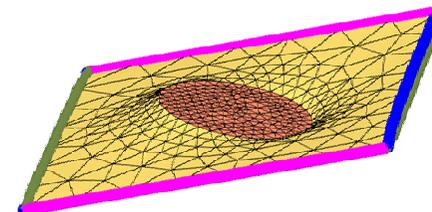
Action favorable



2) De l'autre côté, 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

DEUX METHODES SONT PROPOSEES DANS LE GUIDE :

1) METHODE simplifiée pour les cas élémentaires: $F_s = F_{s \text{ initial}} \cdot \frac{\gamma_{\text{hom}}}{\gamma_s}$

Ce critère de proportionnalité pourra être retenu en première approche pour des cas simples indiqués dans le tableau:

Catégorie d'importance des ouvrages	ZONE DE SISMICITE				
	1	2	3	4	5
II	Pas d'analyse requise		Acceptable	Acceptable	
III				non recommandée	
IV					



Méthode simplifiée non recommandée mais acceptable en ébauche dimensionnelle

2) METHODE numérique pour les autres cas

ACTION 3: diminution des sollicitations

Méthode simplifiée pour les cas élémentaires

Les étapes sont les suivantes:

1) Calcul du module de cisaillement du sol renforcé homogénéisé G_L équivalent de la cellule, (modèle d'une cellule élémentaire avec adhérence parfaite entre sol et inclusion, en élasticité linéaire isotrope)

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

3) Dans le cadre de ce guide on propose de retenir une approche s'écartant de Guéguin et al., en prenant un coefficient sécurité final:

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

ACTION 3: diminution des sollicitations

Méthodes numériques modèle 1 : estimation de Δu

Méthode: éléments finis ou différences finies.

Objectif: calcul des surpressions interstitielles sous sollicitations sismiques.

Modèle: ensemble du massif de sol comportant les éléments de renforcement, (+ interfaces entre les différents constituants), et modèle sans renforcement pour estimer l'efficacité du renforcement.

Charge: sollicitations sismiques *conforme à la norme NF EN 1998-1* (§3.2.3.1.2. et §3.2.3.1.3.)

Exploitation des résultats:

selon le modèle établi, on calcule le rapport $r_u = \Delta u / \sigma'_{v0}$

Le rapport r_u doit être inférieur à 0,6.

ACTION 3: diminution des sollicitations

Méthodes numériques modèle 2: analyse des contraintes

A défaut, pour une analyse en contraintes totales, la méthode de calcul doit suivre les étapes suivantes:

- 1) modélisation d'une cellule élémentaire par une méthode aux EF ou DF soumise à une sollicitation sismique avec et sans renforcement,
- 2) détermination en tout point du taux de cisaillement efficace τ / σ'_v déterminé à partir de 65 % de la valeur maximale de cisaillement calculée τ_{\max} / σ'_v pour les modèles avec et sans renforcement,
- 3) comparaison des valeurs τ / σ'_v à la valeur de CRR pour estimer le coefficient de sécurité sans et avec renforcement de sol.

Commentaire : la sollicitation sismique du modèle sera conforme à la norme NF EN 1998-1 (§3.2.3.1.2. et §3.2.3.1.3.)

L'utilisation de cette méthode numérique peut s'envisager dans les zones de sismicité 3, 4 et 5 et pour les ouvrages de catégorie d'importance II, III et IV.

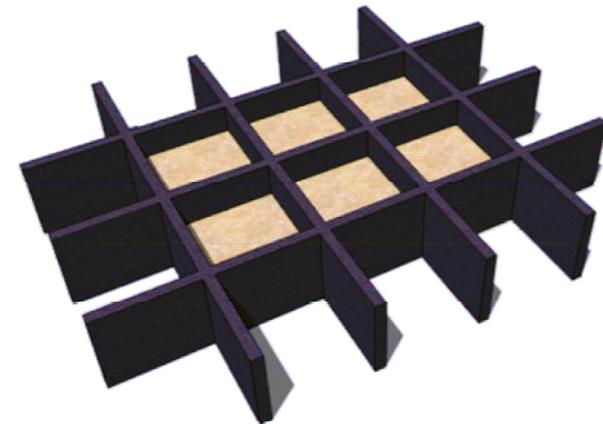
ACTION 4 : en confinant le sol

Confinement du sol

Confinement vertical



Confinement latéral



Justification des traitements anti-liquéfaction

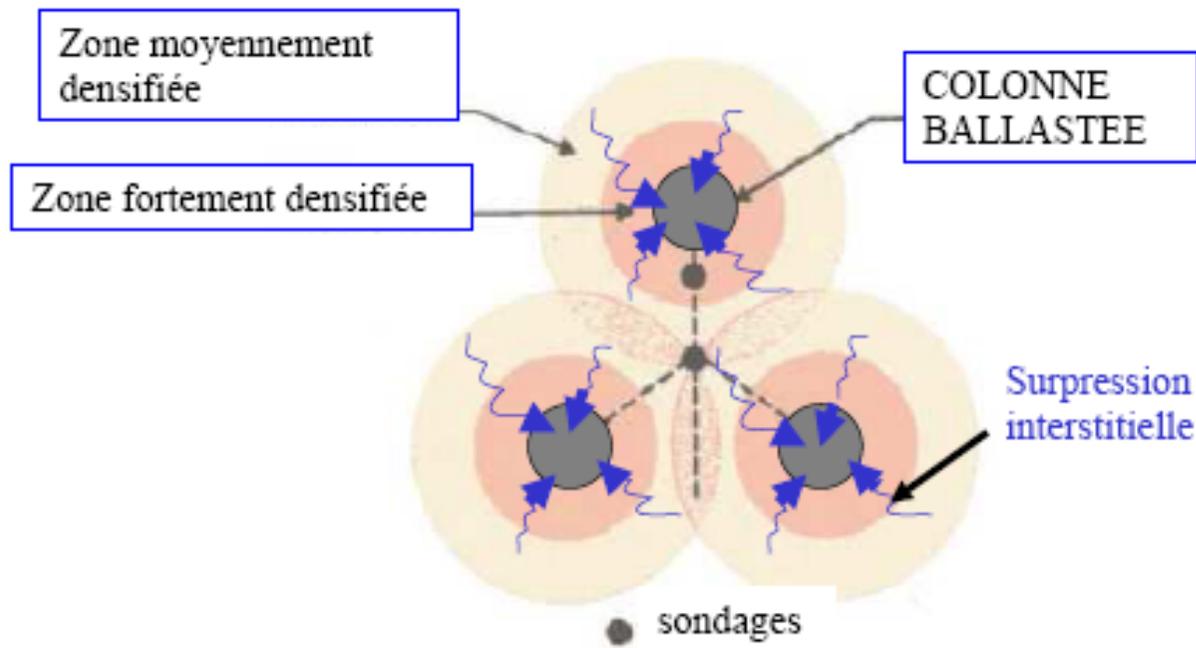
- Inclusions souples
- Inclusions rigides
- Confinement

Dispositions constructives

Contrôles

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

Diminution des sollicitations dans le sol : pas d'effet notable pour des taux de substitution faibles.

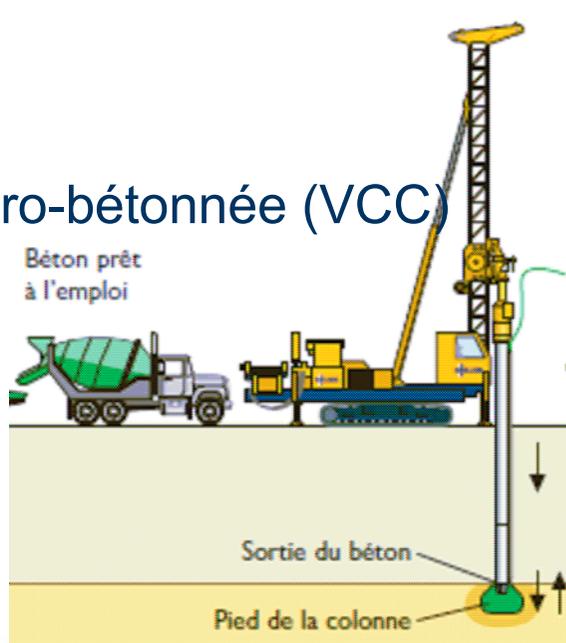
Inclusions rigides

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

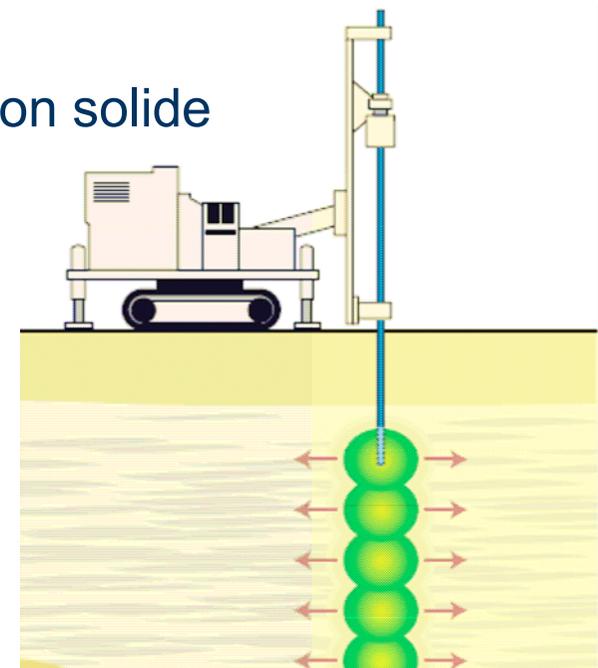
donc la seule possibilité :

Augmentation de la compacité des sols par refoulement ou vibration,

Colonne vibro-bétonnée (VCC)

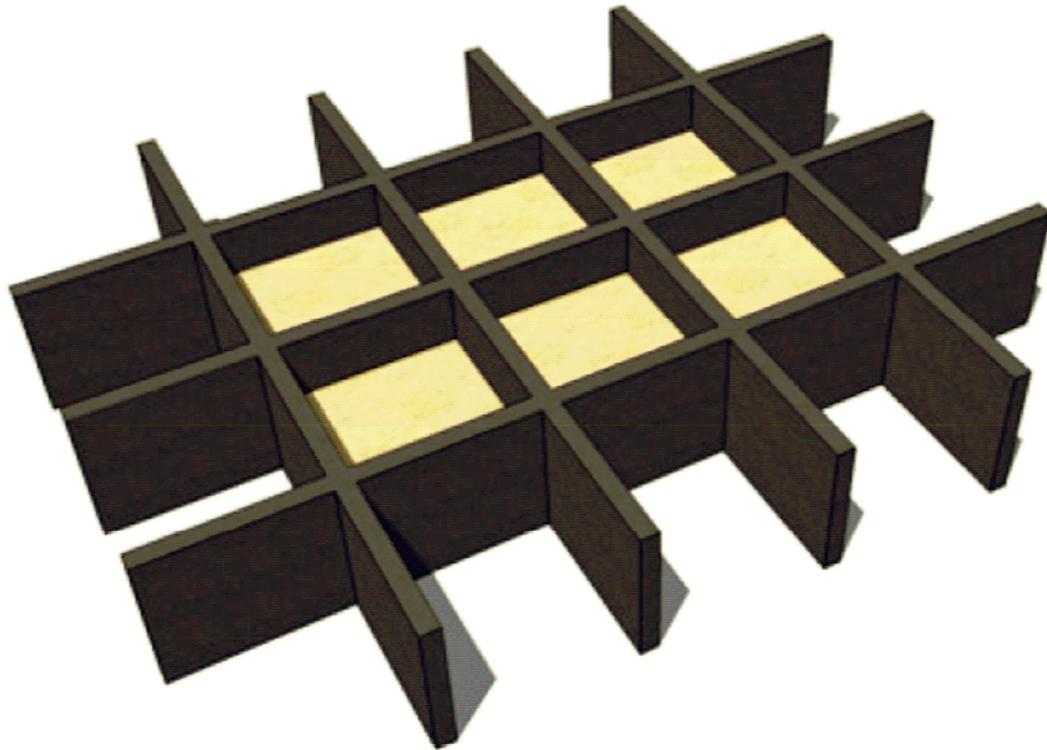


Injection solide



Confinement

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

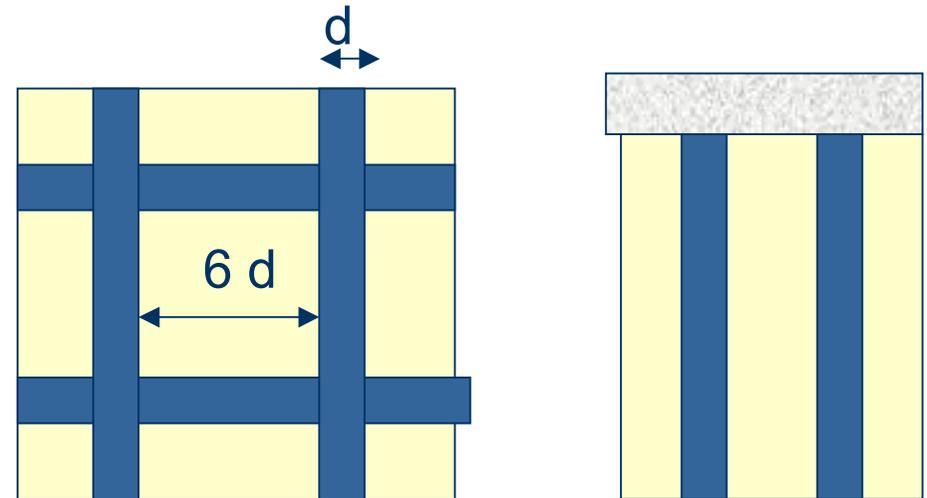


Avantages:

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

Confinement

Pression interstitielle limitée jusqu'à $3d$ (essais à la table vibrante Yasuda et al, 1992).

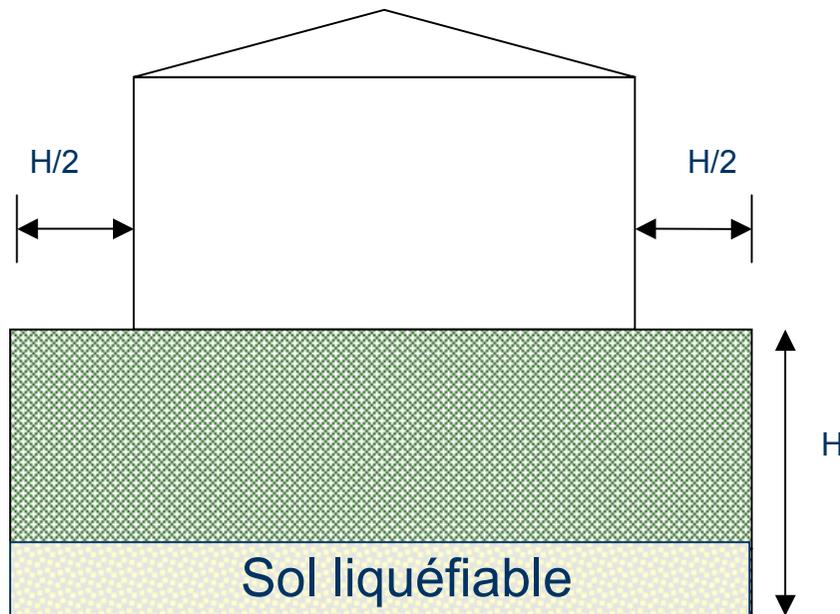


Les paramètres clés sont :

- la raideur en cisaillement
- l'inertie dépendant de la géométrie (espacement, profondeur et épaisseur) du réseau ;
- la résistance du matériau ;
- l'ancrage.

Dispositions constructives

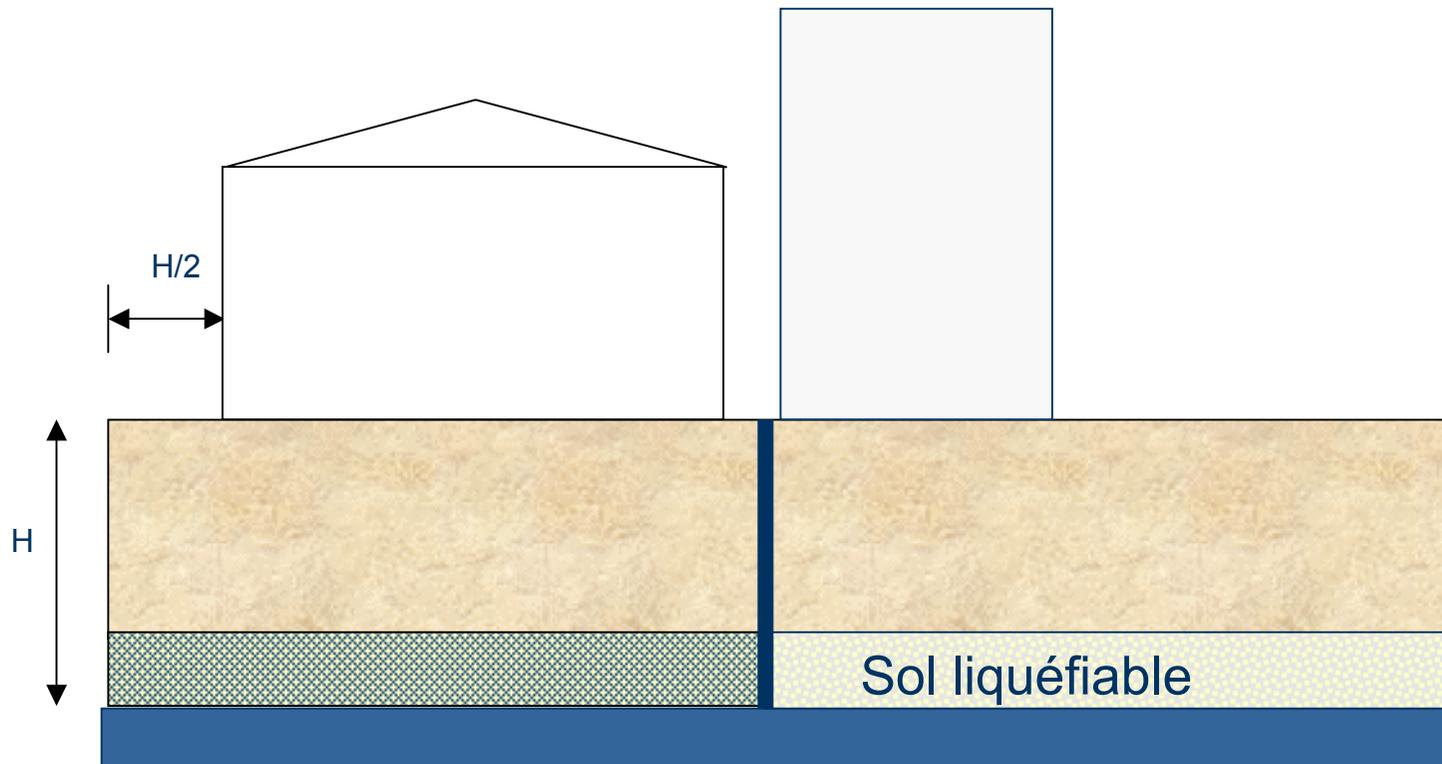
- largeur du débord = moitié de la profondeur de la base de la couche liquéfiable ;
- une étude particulière peut dans certains cas permettre d'ajuster cette largeur de débord avec un minimum d'une maille ou une rangée d'inclusions.



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:

pénétromètre 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 petit diamètre	Effet négligeable	Effet négligeable	
Inclusions rigides (Procédés particuliers)	X <ul style="list-style-type: none"> - Par vibration (vibreur de profondeur) - Par refoulement (injection solide) 	x En général, pour des taux de substitution élevés : <ul style="list-style-type: none"> - Jet-Grouting - DSM 	

MERCI BEAUCOUP POUR VOTRE ATTENTION

