

GUIDE AFPS/CFMS

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

Fondations sur sol amélioré dans la masse et renforcé par inclusions souples

Stéphane BRÛLÉ & Cyril PLOMTEUX
MENARD



Association régie par la loi
du 1.07.1901



SOMMAIRE

1. Liminaires
2. Fondations sur sol amélioré dans la masse et sol renforcé par inclusions souples dans le document AFPS
3. Impact sur la justification sous sollicitation sismique
4. Vérification des modes de rupture pour le traitement dans la masse
5. Vérification des modes de rupture pour le renforcement par inclusions souples
6. Dispositions constructives

1. LIMINAIRES

§ 1.2 Définition du renforcement et de l'amélioration de sol

« Le renforcement de sol regroupe plus particulièrement l'ensemble des techniques conduisant à inclure des éléments verticaux dans le sol (inclusions) afin d'en améliorer la tenue sous l'effet d'une charge statique ou dynamique apportée par un ouvrage (fondations superficielles ou remblai) ou sous l'action de la poussée des terres dans le cas des ouvrages de soutènement ou de stabilisation des talus naturels.

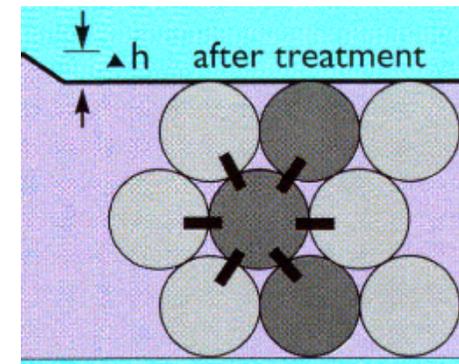
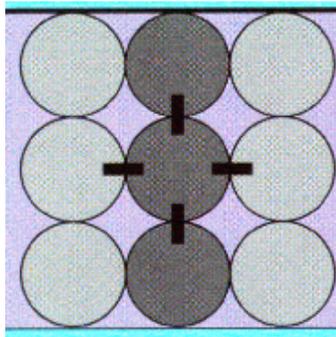
Le terme « inclusion » employé dans ce guide concerne des éléments verticaux regroupant :

- les inclusions « souples » telles que les colonnes ballastées et les plots ballastés ;
- les inclusions « rigides ».

1. LIMINAIRES

§ 1.2 Définition du renforcement et de l'amélioration de sol

« L'amélioration de sol peut se comprendre comme l'augmentation de certaines caractéristiques mécaniques avec ou sans ajout de matériaux en agissant sur la réduction de l'indice des vides : réarrangement des grains par action mécanique, consolidation, injection, vibration ou congélation.



Le terme « *amélioration des sols dans la masse* » est également employé pour désigner les techniques comme le pré-chargement avec ou sans drainage, le compactage dynamique, le vibrocompactage. »

2. DANS LE TEXTE

Méthode	Types de sol					
	Matériaux évolutifs TOURBE	Argiles très molles	Argiles – limons compressibles	Remblais fins	Sables / graviers	Cailloux Remblais à blocs
Amélioration de sols dans la masse	PRECHARGEMENT + DRAINAGE					
				VIBROCOMPACTAGE		
				COMPACTAGE DYNAMIQUE		
				INJECTION SOLIDE		
Renforcement des sols par inclusions souples	COLONNES BALLASTEES					
	PLOTS BALLASTEES PILONNES (épaisseur < 5 m)					
Renforcement des sols par inclusions et éléments rigides	.. DE TYPE PIEUX A REFOULEMENT / SANS REFOULEMENT et JET GROUTING					
	... DE TYPE COLONNE DEEP SOIL MIXING					

Figure 1- 1 : Domaine d'application des différentes techniques d'amélioration

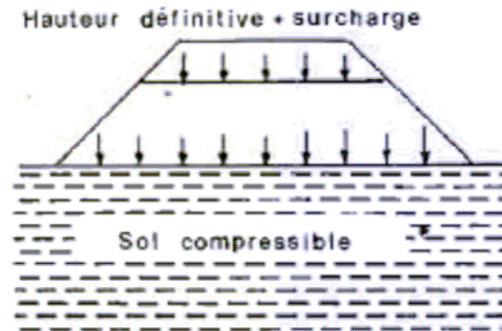
2. DANS LE TEXTE

Déformation verticale des sols par amélioration dans la masse : ordres de grandeur

Pré-chargement : tassement de quelques dizaines de centimètres.

Drainage vertical et consolidation atmosphérique : tassement métrique à plurimétrique (jusqu'à 4 à 5 m au maximum).

Compactage dynamique : tassement métrique à plurimétrique (1 à 2 m voire plus).



2. DANS LE TEXTE

Déformation verticale des sols par amélioration dans la masse : ordres de grandeur

Injection solide

→ *Éventuellement des réhausses de plate-forme*

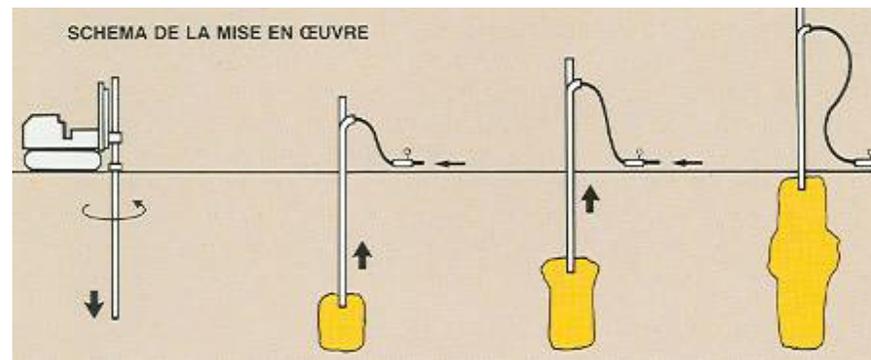
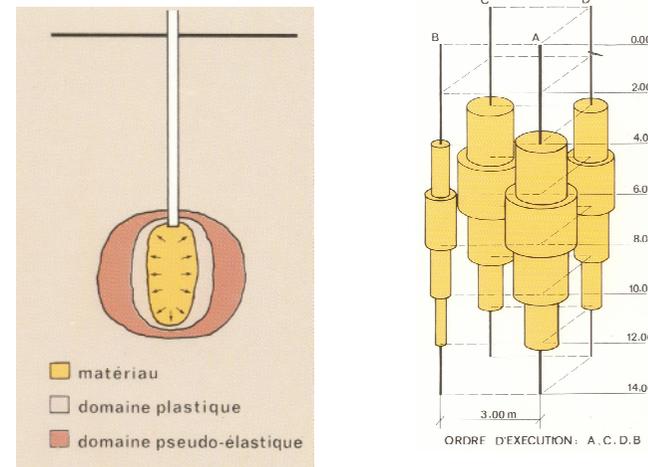


Figure B-16 : Schéma de mise en œuvre d'un traitement par injection solide

2. DANS LE TEXTE

Déformation verticale des sols par amélioration dans la masse : ordres de grandeur

Plots ballastés / Substitution dynamique



Colonnes ballastées



→ *Eventuellement des réhausses de plate-forme*

2. DANS LE TEXTE

Retour d'expérience (§2)

Annexe B –
Techniques
d'amélioration de sol
Descriptif

Techniques d'amélioration et de renforcement de sol (§3)
Amélioration dans la masse (§3.1) et renforcement de sol
par inclusions souples (§3.2)

Comportement dynamique des sols (§4.2)

Mesures des caractéristiques de sol après amélioration et
renforcement de sol (§4.2.4)

2. DANS LE TEXTE

Fondations sur sols renforcé sous actions sismiques (§5)

- Impact du traitement de sol sur l'action sismique (§5.2)
- Interaction sol renforcé-structure (§5.3)
- Vérification des modes de rupture (§5.4)
 - rupture par glissement, perte de capacité portante
 - liquéfaction
- Justification du traitement contre la liquéfaction (§5.5)
 - augmentation de la compacité
 - drainage
 - diminution de la contrainte dans le sol

Annexe C –
Capacité
portante sismique
des fondations
superficielles

Annexe D –
Compression non
centrée

Annexe E –
Liquéfaction

2. DANS LE TEXTE

Traitement dans la masse (§5.6)

- Précision sur les justifications (§5.6.2)
- Dispositions constructives (§5.6.3)
- Planches d'essais (5.6.4) et contrôle a posteriori (§5.6.5)

Annexe B – Techniques d'amélioration de sol

***Reconnaitances,
planches d'essai, contrôles***

Inclusions souples (§5.7)

- Comportement d'une colonne ballastée isolée (§5.7.3)
ou d'un groupe de colonnes sous une semelle filante
ou un radier (§5.7.4).
- Vérification des modes de rupture (§5.7.5)
- Dispositions constructives (§5.7.6)
- Contrôles (§5.7.7)

Annexe C – Capacité portante sismique des fondations superficielles

Annexe D – Compression non centrée

Annexe E – Liquéfaction

3. IMPACT SUR LES JUSTIFICATIONS SOUS SOLlicitATIONS SISMiques

Justifications générales (§5.1)

« En zone sismique, les fondations superficielles doivent être vérifiées aux états limites ultimes, afin d'éviter la rupture par glissement et la rupture par perte de capacité portante, et de prévenir les dommages consécutifs à une liquéfaction potentielle. »

« Dans le cadre d'une amélioration des sols en masse, on peut faire des corrélations à partir des essais in situ après traitement.

Pour les renforcements de sols avec des matériaux composites, hors mesures spécifiques in-situ après traitement, on ne considère pas de modifications et donc pas de changement de classes de site. »

3. IMPACT SUR LES JUSTIFICATIONS SOUS SOLLICITATIONS SISMIQUES

Impact du traitement de sol sur le comportement sismique (§5.2)

«Lorsque le sol est amélioré, le dimensionnement sismique d'un ouvrage est effectué à partir de l'impédance dynamique du sol renforcé dans le mode vertical et horizontal. »

« Les modules dynamiques E_{\max} et G_{\max} du sol renforcé peuvent être déterminés par des **méthodes d'homogénéisation** consistant à établir des moyennes de modules entre les inclusions et le sol ou de calculer un module à partir des déformées du sol renforcé obtenu par la modélisation.

Dans le mode horizontal, la participation des inclusions à la rigidité globale peut être négligeable lorsque le renforcement de sol est localisé et que le taux de substitution est faible : par exemple lorsqu'il concerne uniquement les fondations superficielles isolées ou filantes.

Dans ce cas, le module de cisaillement G équivalent du sol traité est donc considéré égal au module G du sol non traité. »

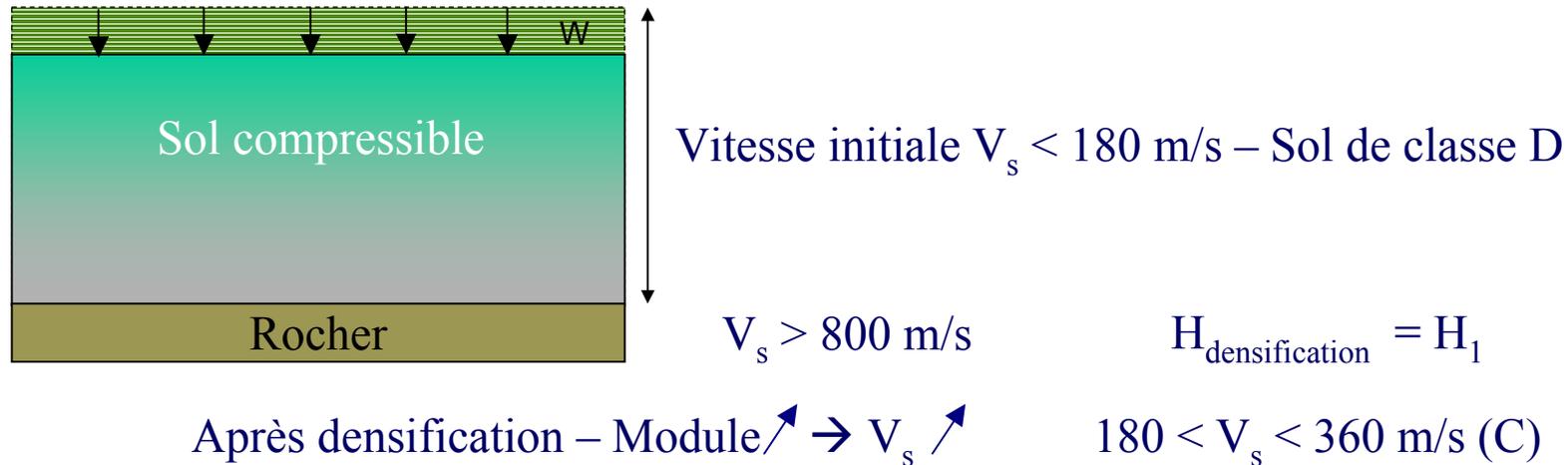
3. IMPACT SUR LES JUSTIFICATIONS SOUS SOLLICITATIONS SISMIQUES

Impact du traitement de sol sur le comportement sismique (§5.2)

« Pour des taux de substitution plus importants obtenus par un traitement général (par exemple sur toute l'emprise de l'ouvrage), le module G équivalent du sol amélioré pourra être déterminé par le calcul. »

3. IMPACT SUR LES JUSTIFICATIONS SOUS SOLLICITATIONS SISMIQUES

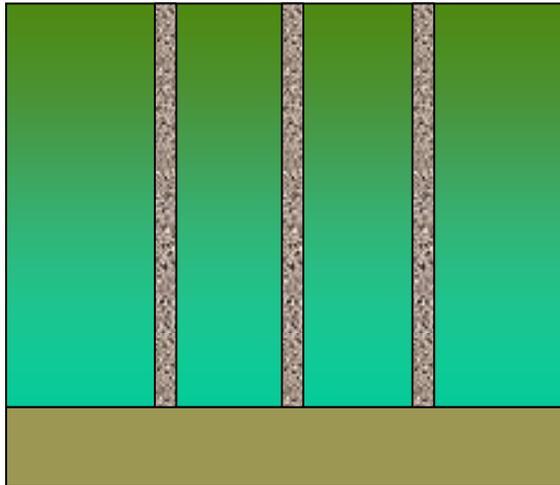
Amélioration dans la masse



$$\text{Vitesse des ondes de cisaillement : } V_s = (G / \rho)^{1/2}$$

3. IMPACT SUR LES JUSTIFICATIONS SOUS SOLlicitATIONS SISMiques

Renforcement par inclusions souples



L'évaluation du module de cisaillement longitudinal G_L est donnée par Hashin (1983) :

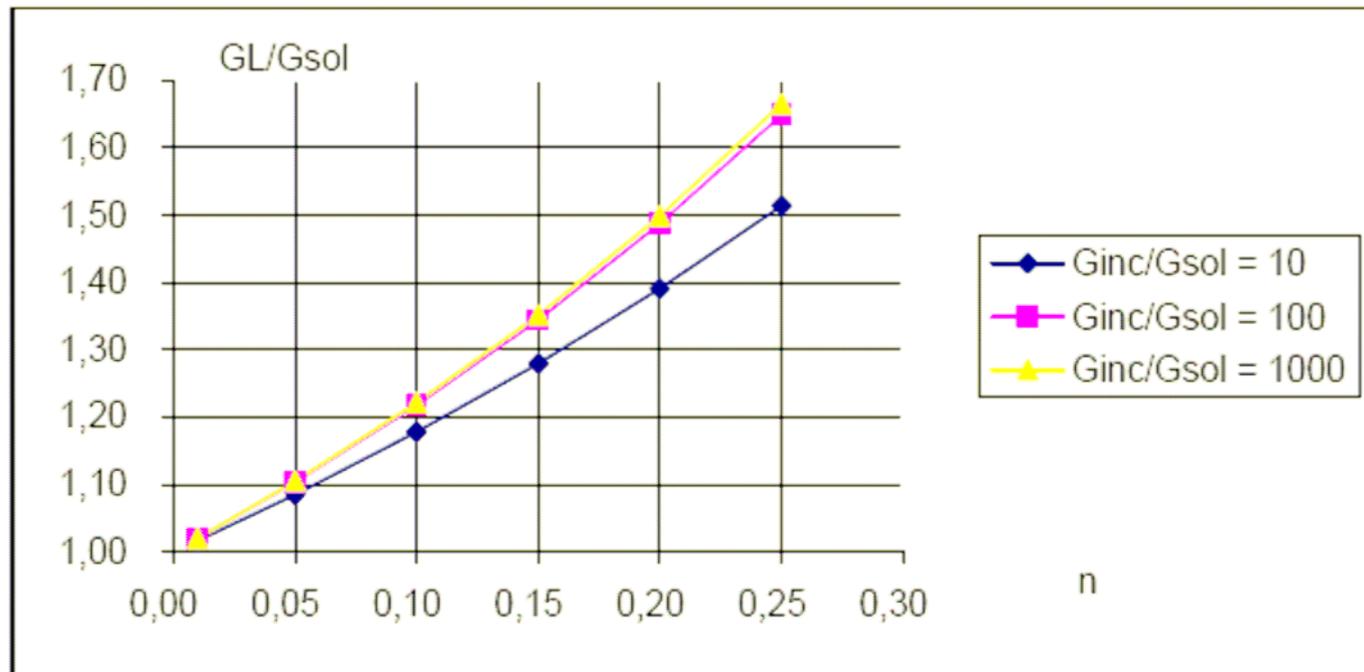
$$G_L \cong G_s + \frac{\eta}{(1-\eta)/(2G_s) + 1/(G_c - G_s)}$$

Avec :

- η le facteur de substitution ;
- G_s le module de cisaillement du sol ;
- G_c le module de cisaillement l'inclusion.

3. IMPACT SUR LES JUSTIFICATIONS SOUS SOLLICITATIONS SISMIQUES

Renforcement par inclusions souples



Exemple : colonnes ballastées de diamètre 60 cm en maille 2 x 2 m

$\eta = 0.07$, $G_c/G_{sol} = 10 \rightarrow$ environ 10% d'amélioration du G_{sol} avant renforcement

Influence non nulle sur le module de cisaillement mais faible pour les inclusions souples en taux de substitution fréquent.

4. VERIFICATION DES MODES DE RUPTURE POUR LES TRAITEMENTS DANS LA MASSE

Rupture par glissement

Vérification à l'ELU_{acc} : $H_{ELU} < Q_{min} \cdot F_s / \gamma_M$,

Commentaire : On pourra considérer $F_s = \text{tg } \delta$ où δ est l'angle de frottement entre la semelle et le sol qu'on assimile à l'angle de frottement interne φ du sol à l'état critique, et où γ_M est le coefficient partiel de matériau valant 1,25 et où Q_{min} est le minimum de compression transmis au sol par la semelle.

Rupture par perte de capacité portante des fondations superficielles

La capacité portante est calculée selon les méthodes proposées dans la Norme d'Application Nationale de l'Eurocode 7 ou dans l'Eurocode 8.

Justification de la réduction du potentiel de liquéfaction

Afin de vérifier que l'objectif fixé vis-à-vis du risque de liquéfaction a été atteint, on réévalue ce risque en utilisant les paramètres du sol amélioré. Ces derniers seront déduits des essais de contrôle.

5. VERIFICATION DES MODES DE RUPTURE POUR RENFORCEMENTS PAR INCLUSIONS SOUPLES

Le comportement du sol renforcé doit être vérifié en portance et éventuellement en déformation sous les sollicitations sismiques de l'ouvrage. Le dimensionnement sera établi pour atteindre les objectifs fixés par le maître d'ouvrage et/ou ses représentants.

Ce chapitre vient en complément des Recommandations du CFMS « Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles au tassement ».

5. VERIFICATION DES MODES DE RUPTURE POUR RENFORCEMENTS PAR INCLUSIONS SOUPLES

Le renforcement de sol par colonnes ballastées, par exemple, se caractérise par les paramètres caractéristiques usuels suivants :

- le taux d'incorporation variable en fonction des caractéristiques du sol ;
- la mise en œuvre par refoulement de gravier ;
- les caractéristiques mécaniques du matériau de type granulaire.

Ce renforcement permet d'augmenter les caractéristiques équivalentes du massif du sol traité (résistance au cisaillement horizontal, angle de frottement, module de déformation) et conjugue les actions suivantes dont une seule ou plusieurs peuvent être recherchées :

- amélioration de la portance ;
- réduction des tassements par une concentration des contraintes sur les colonnes plus raides que le sol ;
- réduction du risque potentiel de liquéfaction.

5. VERIFICATION DES MODES DE RUPTURE POUR RENFORCEMENTS PAR INCLUSIONS SOUPLES

Cas de la rupture par perte de capacité portante

Selon les Recommandations CFMS on rappelle que, en prédimensionnement, le calcul de q_{ref} prend en compte une majoration du moment tel que décrit dans ces Recommandations.

Les dispositions relatives au calcul de capacité portante d'une semelle sur colonnes ballastées en compression non centrée sont rappelées en Annexe D.

Une approche alternative consiste à se ramener à la vérification de l'EN 1998-5 § 5.4 dans laquelle on a retiré à N_{Ed} , à V_{Ed} et à M_{Ed} les réactions calculées R_{iEd} et V_{iEd} (sous réserve qu'elles soient sous la zone comprimée de la semelle, et qu'elles restent admissibles concernant le matelas, le matériau de l'inclusion et la portance vis-à-vis du sol) en tête des inclusions pondérées par des coefficients de sécurité partiels γ_N et γ_T .

5. VERIFICATION DES MODES DE RUPTURE POUR RENFORCEMENTS PAR INCLUSIONS SOUPLES

Cas de la rupture par perte de capacité portante

$$\frac{(1 - e\bar{F})^{c_T} (\beta\bar{V})^{c_T}}{(\bar{N})^a \left[(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{c'_M} (\gamma\bar{M})^{c_M}}{(\bar{N})^c \left[(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^d} - 1 \leq 0$$

Approche 1	γ_N	γ_T
Sismique	1,1	1,1

- γ_N : coefficient de sécurité partiel sur l'effort normal ;
- γ_T : coefficient de sécurité partiel sur l'effort tranchant.

6. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES POUR LE TRAITEMENT DANS LA MASSE

Le débord de traitement doit permettre d'assurer une homogénéité des caractéristiques mécaniques et du comportement du sol en limite d'ouvrage, ainsi que la stabilité de l'ouvrage.

Sans étude particulière, les débords suivants sont préconisés :

→ sol ne présentant pas de risque de liquéfaction

- a priori une maille élémentaire,
- une étude particulière peut dans certains cas permettre de justifier l'absence de débord.

→ sol présentant un risque de liquéfaction

- 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.

CONCLUSIONS

Merci pour votre attention