

Partie I I

Renforcement des sols d'assise

Les sols de mauvaise qualité ont toujours existé, mais la raréfaction des sols de bonne qualité pour développer les réseaux routiers, autoroutiers et ferroviaires ainsi que les zones industrielles entraîne la nécessité de mettre en œuvre des techniques de renforcement des sols.

Il existe différentes méthodes de renforcement des sols, plus ou moins anciennes et plus ou moins développées, qui permettent de réduire les tassements des remblais édifiés sur sols compressibles et de prévenir des risques sismiques, à savoir :

- Inclusions rigides ;
- Colonnes ballastées ;
- Compactage dynamique et puis ballastés ;
- Vibroflotation ;
- Injection solide (jet grouting, COL-MIX, etc..) ;

I.1. DEFINITION DU RENFORCEMENT PAR INCLUSIONS RIGIDES VERTICALES

Le renforcement par inclusions rigides verticales est envisagé pour des ouvrages de types remblais, dallages, silos... lorsque le sol est trop compressible pour supporter sans tassements importants l'ouvrage à construire.

On caractérise le renforcement par inclusions rigides verticales par la combinaison entre les inclusions qui assurent le renforcement et une plateforme de transfert de charge disposée entre le réseau d'inclusions et l'ouvrage ; cette plateforme assure la répartition de la charge entre les inclusions et le sol compressible (Figure.1). Les inclusions peuvent être de différentes natures et construites par différentes méthodes que nous détaillerons par la suite.

Ce type de fondation peut être défini par le fait que la charge s'applique simultanément aux têtes d'inclusions et au sol compressible, ce qui la différencie des méthodes de fondation traditionnelles. Le dimensionnement du réseau d'inclusions et de la plateforme de transfert de charge doit être tel que la part transmise aux inclusions soit beaucoup plus grande que celle transmise au sol.

Le rôle des inclusions est de transmettre la charge due au poids de l'ouvrage et les charges de service vers le substratum afin de réduire ou même annuler les tassements. Pour cela, les inclusions sont posées sur la couche dure ou légèrement ancrées dans celle-ci. Les inclusions peuvent aussi être coiffées par une tête plus large afin d'augmenter le taux de couverture et optimiser l'efficacité du dispositif.

La plateforme de transfert de charge a un rôle tout aussi important puisque les mécanismes assurant la répartition de la charge s'y développent. Cette plateforme peut être composée de matériaux granulaires traités ou non traités ; elle peut être renforcée ou non par une ou plusieurs nappes géosynthétiques ; sa hauteur et ses caractéristiques mécaniques sont des paramètres importants vis à vis du développement des mécanismes de transfert de charge.

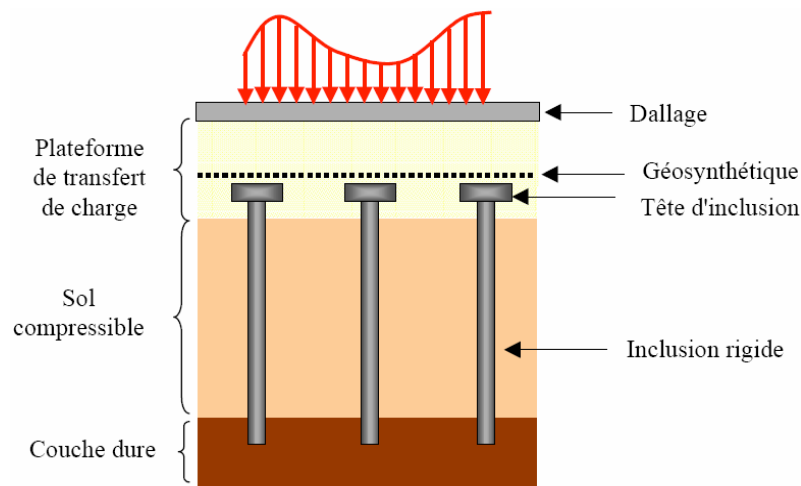


Figure. 1 - Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales

I.2. CATALOGUE DES TECHNIQUES DES INCLUSIONS

Parmi les différents types d'inclusions, on peut différencier les inclusions préfabriquées et celles fabriquées *in situ*. Les inclusions préfabriquées se différencient par leur nature : pieux bois, pieux métalliques ou encore pieux béton. Parmi les inclusions fabriquées *in situ*, on peut encore distinguer deux familles : les inclusions de type pieux et les inclusions fabriquées par mélange d'un liant avec le sol en place.

I.2.1. INCLUSIONS PREFABRIQUEES

Les principaux avantages et les désavantages des pieux préfabriqués sont :

Avantages :

- matériau des pieux peut être contrôlé avant l'insertion dans le sol,
- stabilité dans les sols compressibles,
- pas de dégâts engendrés sur le pieu par soulèvement du sol lors de l'insertion des pieux adjacents,
- procédure de mise en œuvre non affectée par le niveau de la nappe,
- de très grandes longueurs de pieux peuvent être mises en œuvre.

Désavantages :

- risque de casse lors de la mise en place occasionnant des délais supplémentaires pour le remplacement,
- peu économique si le choix et donc le coût des matériaux est guidé par les contraintes de mise en œuvre plutôt que par les contraintes en service,
- cause de nuisance et risque de dégâts par le bruit et les vibrations,
- impossibilité d'insérer de gros diamètres,
- risques de dégâts sur les structures adjacentes dus au déplacement du sol lors de la mise en œuvre.

I.2.2. INCLUSIONS CONSTRUITES IN SITU

Comme pour les pieux préfabriqués, on peut se référer aux avantages et désavantages des inclusions construites in-situ :

Avantages :

- variation de la longueur pour mieux s'adapter aux conditions du sol,
- insertion de gros diamètres,
- installation sans bruit ni vibrations notables,
- pas de risque de soulèvement de sol,
- possibilité d'obtenir dans l'argile des pieds d'inclusions deux à trois fois plus larges que le diamètre de la colonne.

Désavantages :

- risque de striction dans les sols compressibles,
- installation du béton non faite dans des conditions idéales,
- élargissement du pied de l'inclusion impossible dans un sol sans cohésion.

1.2.2.4. INCLUSIONS PAR MELANGE D'UN LIANT AVEC LE SOL

Les inclusions par mélange d'un liant avec le sol dites "inclusions par mixing" permettent de réaliser des colonnes de sols stabilisés qui, étant donné les performances mécaniques généralement obtenues, peuvent s'apparenter aux inclusions rigides. Ces techniques ont été développées d'une part pour le renforcement des sols compressibles et d'autre part pour leur stabilisation. Parmi les différentes méthodes de "mixing", qui peuvent être obtenues par différentes techniques : mécaniques, hydrauliques, avec ou sans air..., on trouve les dénominations suivantes :

- Jet Grouting,
- Soil Mixing,
- Deep Cement Mixing (DCM),
- Deep Soil Mixing (DSM),
- Lime Columns (LC) et Lime Cement Columns (LCC).

L'objectif des méthodes de traitement des sols par "mixing" est de modifier le sol afin d'améliorer ses caractéristiques mécaniques en réalisant des colonnes rigides ou semi-rigides.

Le module d'élasticité et la résistance à la compression simple sont typiquement 5 à 10 fois inférieurs à ceux du béton. Tous les sols peuvent être traités, cependant les sols contenant plus de 10 % de tourbe doivent être préalablement testés.

Le tableau .1 présente les caractéristiques de résistance et de perméabilité de différents sols traités.

Type de sol	Ciment incorporé	Résistance à la compression simple	Perméabilité
Vases, boues	240 à 400 kg/m ³	70 à 350 kPa	1.10 ⁻⁶ cm/s
Limons organiques et argiles	150 à 260 kg/m ³	350 à 1400 kPa	5.10 ⁻⁷ cm/s
Limons cohérents	120 à 240 kg/m ³	700 à 2100 kPa	5.10 ⁻⁷ cm/s
Sables limoneux et sables	120 à 240 kg/m ³	1400 à 3500 kPa	5.10 ⁻⁶ cm/s
Sables et graves	120 à 240 kg/m ³	3000 à 7000 kPa	1.10 ⁻⁵ cm/s

Tableau II.2 - Caractéristiques de résistance et de perméabilité de différents sols traités

A titre d'exemple, nous allons présenter trois méthodes de "mixing" :

- le Jet Grouting,
- le procédé COL MIX,
- les Lime Cement Columns.

1.2.2.4.1. Jet Grouting

La réalisation d'une colonne de Jet Grouting passe par trois étapes (Figure .10) :

- réalisation d'un forage par une colonne de tiges dotée d'une tête de perforation classique (tricône par exemple) et d'un dispositif de lançage,
- ouverture de la colonne de lançage, la colonne est équipée soit d'une buse (monojet), soit de deux ou trois buses d'injection (double ou triple jets),
- injection en remontant : dans la technique monojet, un coulis de ciment à haute pression est injecté, le coulis assure à la fois la déstructuration du terrain et la consolidation par introduction du ciment ; dans les techniques à double ou triple jets, le sol est d'abord déstructuré par une injection d'air ou d'un mélange air et eau avant d'être injecté séparément par du coulis à l'aide d'une buse située plus bas sur la colonne de forage.

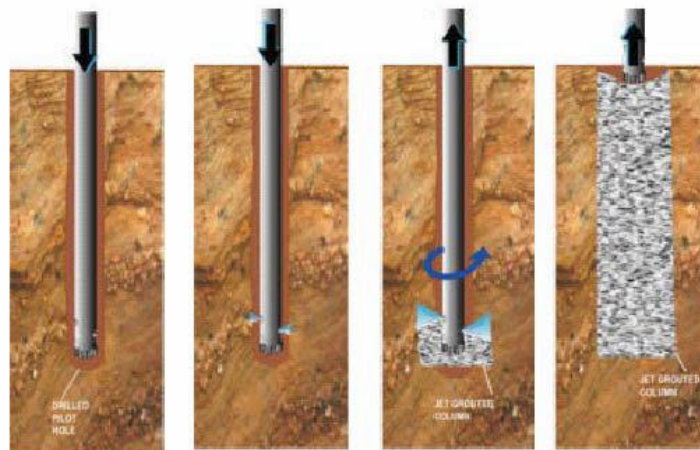


Figure .10 - Différentes étapes de la réalisation d'une colonne de Jet Grouting

Le diamètre de la colonne obtenue dépend de la nature du terrain, de la puissance du jet et des vitesses de remontée et de rotation ; il varie généralement entre 0,6 et 1,0 m. La résistance à la compression simple dépend de la qualité du ciment utilisé, du rapport C/E du coulis et de la nature du sol (Figure .11).

Au cours de la réalisation, les contrôles portent sur le coulis (pression, débit, consommation, composition) et sur la foreuse (enregistrement des paramètres). Le contrôle a posteriori consiste généralement à effectuer des carottages avec essais de densité et de compression simple. Des carottages soniques entre sondages ainsi que des essais de chargement peuvent compléter ce contrôle.

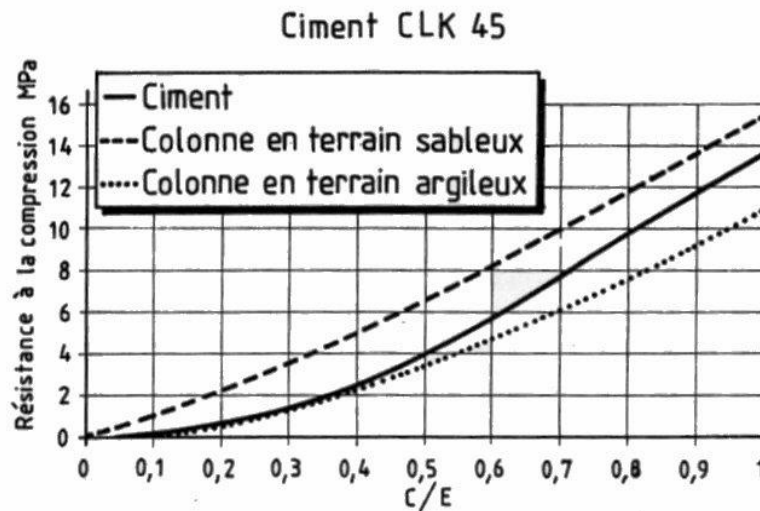


Figure .11 - Résistance d'une colonne de Jet Grouting
– Documents Solétanche-Bachy

1.2.2.4.2. Soil Mixing

Pour illustrer cette méthode, nous présenterons le procédé COL MIX développé par l'entreprise Solétanche-Bachy. Cette technique a pour objectif de réaliser des colonnes plus ou moins rigides en mélangeant, *in situ*, un liant avec le terrain en place.

Le malaxage se fait à l'aide de tarières creuses couplées et tournant en sens inverse. La réalisation d'une colonne de COL MIX passe par deux étapes : le forage et la remontée.

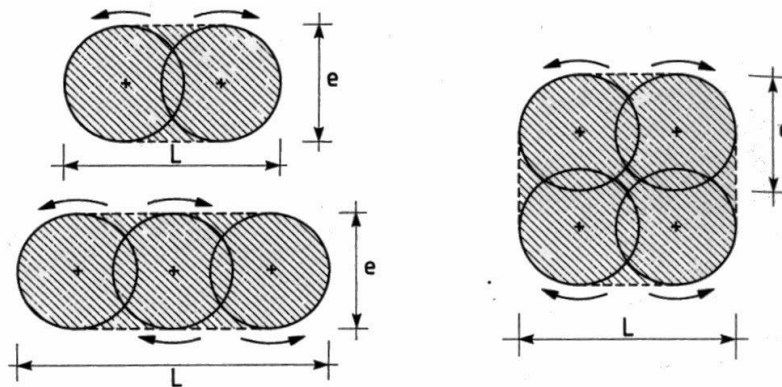


Figure .12 - Forme d'une colonne COL MIX

La phase de forage permet la déstructuration du terrain et l'incorporation du liant par les tiges creuses. Cette opération est réalisée pendant la descente du train de tarières. La rotation provoque un mouvement ascendant qui favorise le malaxage et l'homogénéisation du mélange.

Au cours de la phase de remontée, le sens de rotation est inversé, provoquant la circulation descendante des matériaux, qui, avec l'application simultanée d'une poussée verticale à l'aide de la machine de forage, assure un compactage du mélange.

L'association de 2, 3 ou 4 tarières permet de réaliser des colonnes de forme oblongue ou carrée (Figure .12). Les valeurs de e varient entre 230 et 875 mm et celles de L entre 410 et 1250 mm.

La résistance à la compression simple dépend du liant utilisé : il s'agit généralement d'un mélange de chaux et de ciment. Avec un tel mélange, les caractéristiques obtenues couramment sont les suivantes :

- résistance à la compression simple $R_c = 2$ à 8 MPa,
- module d'élasticité $E = 50$ à 300 MPa.

En cours de réalisation, les contrôles portent sur le dosage du liant et sur la foreuse (enregistrement des paramètres). Les contrôles *a posteriori* sont les mêmes que pour le Jet Grouting.

1.2.2.4.3. Lime Cement Columns ou Deep Cement Mixing

Les colonnes de sol traitées à la chaux et au ciment (Lime Cement Columns) sont couramment utilisées dans les pays scandinaves. Une conférence internationale portant uniquement sur ce sujet a même eu lieu à Stockholm en 1999. Une présentation complète de cette méthode a été faite par Broms B.B. (2001). Une technique similaire, dénommée Deep soil Mixing (Deep Cement Mixing ou Deep Lime Mixing) a été développée au Japon.

La réalisation d'une colonne de sol traitée à la chaux et au ciment passe par deux étapes :

- l'instrument de malaxage (Figure .13a) est tout d'abord vissé dans le sol jusqu'à une profondeur correspondant à la longueur désirée des colonnes ; la longueur maximale est de l'ordre de 15 m,
- ensuite l'instrument est lentement retiré (avec une vitesse inférieure à 2,5 cm/tr) et la chaux vive et le ciment sont incorporés au sol par des trous localisés juste au-dessus de l'instrument.

La figure .13b présente une photographie d'une colonne excavée.



Figure .13a



Figure .13b

Figure .13 - Instrument de malaxage utilisé pour les Lime Cement Columns et colonne excavée

Les deux courbes de la figure .14 illustrent d'une part l'efficacité des LCC en terme de tassement sous un remblai : le tassement total est réduit de 2/3 ou plus, et d'autre part en terme de gain de temps pour stabiliser l'ensemble puisque le temps de tassement complet est divisé par un facteur 4.

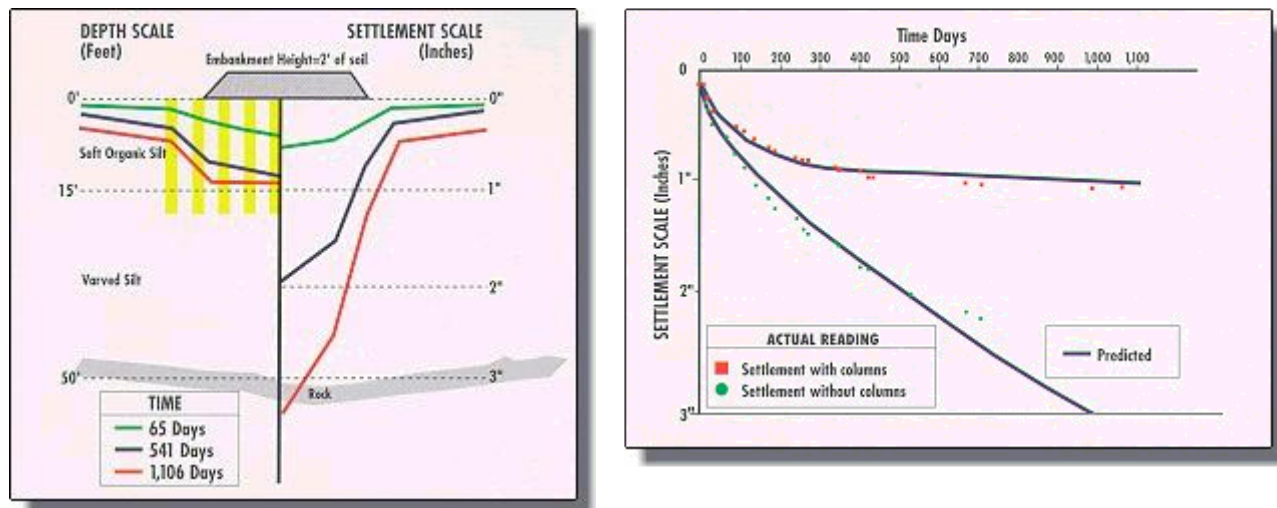


Figure II.14 - Exemple de tassement sous remblais : comparaison avec et sans colonnes

I.2.3. RECAPITULATIF DES METHODES

Le tableau .3 présente quelques caractéristiques des principaux types d'inclusions répertoriés. Ces caractéristiques sont d'ordre techniques (vibrations, bruit, déblais) ou mécanique (module).

Types d'inclusion			Vibrations	Bruit	Déblais	E (MPa)
Pieux prés fabriqués	Pieux bois		oui	oui	non	14000
	Pieux métalliques		oui	oui	non	200 000
	Pieux béton		oui	oui	non	10 000-20 000 ¹
Inclusions fabriqués in-situ	Pieux battus et forés	Battus	oui	oui	non	Mortier : 2000 7400 Béton B15: 9000 Béton B25:10 815
		Forés simples	non	non	oui	
		Forés tubes	non	non	oui	
		A la tarrière	non	non	oui	
		Starsol	non	non	oui	
	VCC		non	non	non	10 000
	CMC		non	non	non	500 - 20 000 ²
	Par mixing	COLMIX	non	non	non	50 - 300 ³
		Jet grouting	non	non	non	
		LCC	non	non	non	20 - 200 ³

¹ fonction de la nature du béton et du renforcement

² fonction de la nature du coulis

³ fonctions de la nature du liant et du sol

Tableau. 3- Quelques caractéristiques des principaux types d'inclusions répertoriés

I.3. METHODES D'AMELIORATION DES SOLS FINS

I.3.1. Préchargement

Cette technique consiste à placer sur le terrain une charge égale à la charge définitive P_f augmentée éventuellement d'une surcharge P_s qui assure tout ou partie des effets suivants (figure 15) :

- produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de compression secondaire ;
- augmenter la résistance au cisaillement et la capacité portante du massif de sol, ce qui peut être utilisé pour une construction par étapes. Pratiquement, deux techniques sont utilisées pour appliquer au sol la contrainte de préchargement :
- la méthode la plus courante (figure 16a) consiste à édifier sur le site un remblai (une solution alternative est de remplir des réservoirs d'eau) ; on augmente ainsi la contrainte totale appliquée à la surface de la couche compressible ; en fin de consolidation, quand les surpressions interstitielles créées par la charge sont dissipées, la charge apportée par le remblai est supportée par le squelette du sol, qui se déforme sur toute son épaisseur ;
- une autre méthode consiste à utiliser la pression atmosphérique, en appliquant un vide partiel sous une membrane étanche posée à la surface du sol (figure 16b) ; on diminue dans ce cas la distribution d'équilibre des pressions interstitielles dans le massif de sol, à contraintes totales constantes ; l'utilisation de cette technique a été limitée pendant longtemps par la mauvaise qualité des membranes.

On peut aussi diminuer les pressions interstitielles, et donc précharger le sol, en rabattant la nappe dans la zone à consolider (figure 16c) ; les effets de cet abaissement de la nappe sur le voisinage doivent être soigneusement étudiés dans ce cas.

1.3.2. Accélération de la consolidation

La mise en place de réseaux drainants dans le massif de sol (drains verticaux ou tranchées drainantes) réduit la distance que l'eau doit parcourir pour atteindre une surface drainante et sortir du sol fin, ce qui a un effet très bénéfique sur les temps de consolidation.

La technique de drainage la plus fréquemment employée consiste à mettre en place un maillage régulier (maille triangulaire ou carrée) de drains verticaux (figure 17). Jusqu'au début des années 80, les drains verticaux étaient en général des drains de sable, réalisés par diverses techniques : battage, vibrofonçage ou lançage d'un tube fermé ou d'un tube ouvert, forage à la tarière pleine ou creuse. Pour

Un diamètre nominal donné, les drains réalisés par lançage ou par forage à la tarière creuse sont considérés comme les plus efficaces.

À partir des années 80, la part des drains préfabriqués en forme de bandes de 10 cm de largeur et quelques millimètres d'épaisseur a augmenté de façon très rapide. Ces drains comportent, en général, une partie centrale (l'âme) assurant la circulation de l'eau le long du drain et une gaine filtrante en géotextile ou en papier.

Le drainage peut être également réalisé par des tranchées de quelques dizaines de centimètres de largeur et de quelques mètres de profondeur remplies de matériau perméable. Cette technique est plus rarement utilisée.

Les sols traités par des réseaux drainants sont toujours recouverts d'une couche drainante de 0,5 à 1 m d'épaisseur. Cette couche est souvent mise en place avant les drains, pour permettre la circulation des engins sur le chantier.

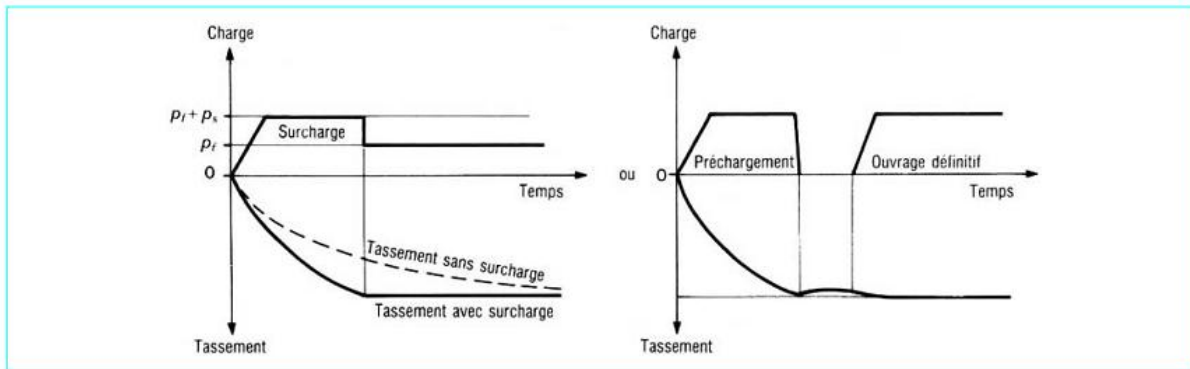


Fig. 15 : Principe de préchargement pour le contrôle du tassement

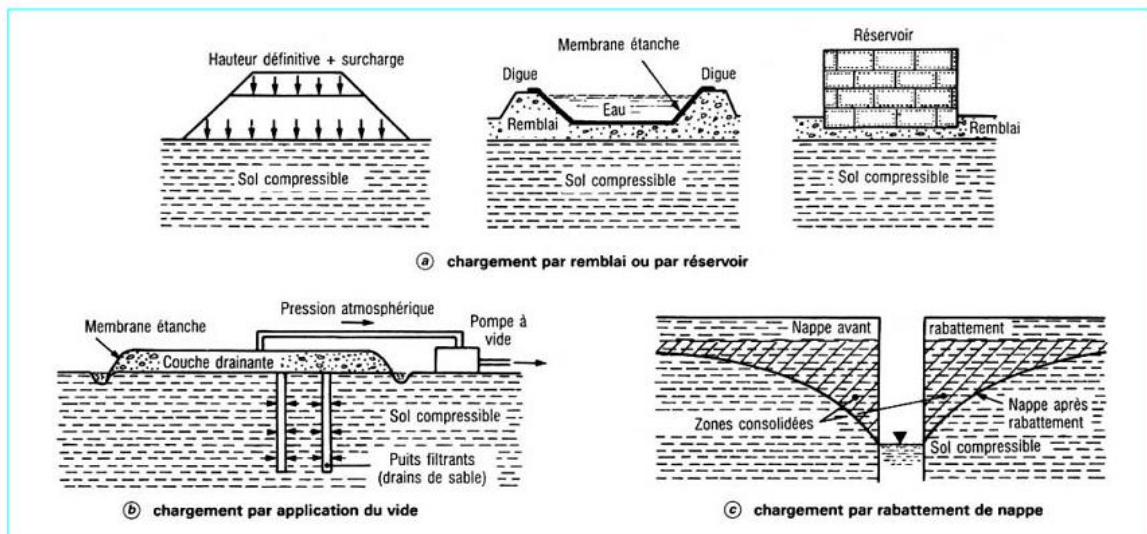


Fig. 16 : Technique de préchargement

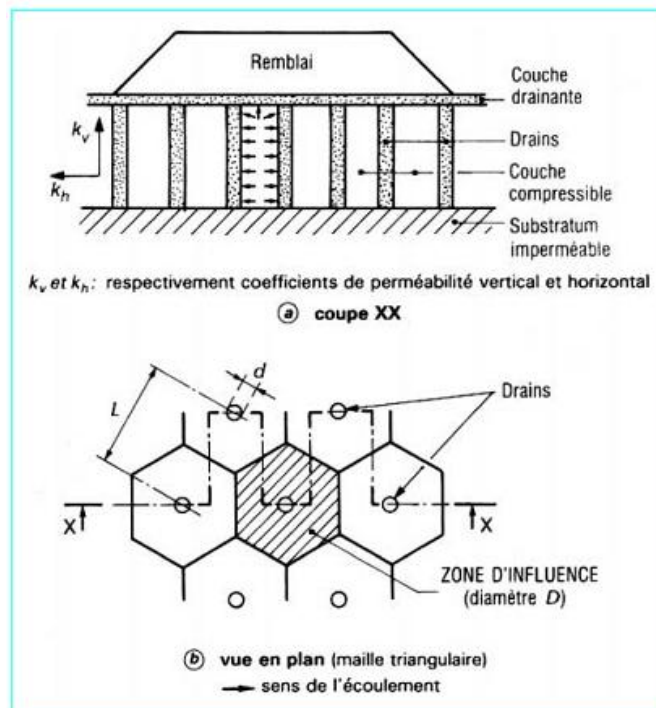


Fig. 17 : Réseaux de drains verticaux

I.3.3. Renforcement par colonnes

On peut aussi réduire les tassements et augmenter la stabilité des massifs de sols mous en utilisant différentes techniques de réalisation de colonnes de matériau plus résistant à l'intérieur du sol. Ces colonnes supportent une part importante de la charge appliquée à la surface du sol, ce qui augmente la capacité portante et diminue les tassements. Quand les colonnes sont constituées de matériau drainant, elles jouent également le rôle de drain.

I.3.3.1. Colonnes ballastées

Leur exécution s'effectue en deux phases (figure 18) :

- on réalise d'abord un forage jusqu'à la profondeur désirée (10 ou 20 m au maximum) au moyen d'une aiguille vibrante, corps cylindrique de 30 à 40 cm de diamètre et de quelques mètres de longueur comportant un vibreur ; cette aiguille vibrante pénètre dans le sol sous l'action de son propre poids, conjuguée à un lançage en pointe ; le lançage peut être réalisé à l'eau ou à l'air ;
- le forage est ensuite rempli de matériaux grenus à fort angle de frottement interne et la colonne ainsi constituée est compactée grâce au vibreur ; le diamètre de la colonne obtenue dépend de la consistance du terrain qui l'entoure. Il atteint couramment 0,6 à 1 m.

La densité des colonnes est adaptée à l'amélioration souhaitée du sol. On dispose en général les colonnes ballastées à raison d'une tous les 1 à 5 m².

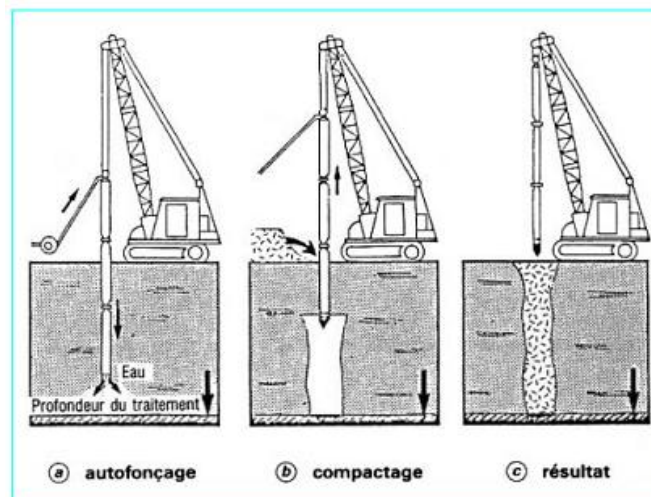


Figure 18 : Phases d'exécution des colonnes ballastées



Figure 19 : Colonne de sol traité à la chaux

Les colonnes ballastées sont destinées à des traitements localisés : fondations d'ouvrage d'art ou de bâtiment, remblais d'accès à des ouvrages d'art, sols supports de réservoirs, etc.

Une autre méthode de réalisation de colonnes de matériaux frottants dans des sols mous, tout en compactant le sol à l'entour, consiste à poinçonner le sol avec un pilon de masse élevée et de géométrie adaptée, à remplir l'empreinte de ballast, puis à recommencer le pilonnage, jusqu'à ce que l'on obtienne la colonne désirée (puits ballasté). Dans la pratique, cette technique permet de réaliser des colonnes de 5 à 7 m de profondeur, mais de diamètre plus grand que les colonnes ballastées classiques (de l'ordre de 2,5 m).

1.3.3.2. Colonnes pilonnées

On peut réaliser des pieux de ballast compacté par la technique des colonnes pilonnées. On enfonce dans le sol un tube creux, que l'on remplit de matériau grenu. Le matériau est compacté à la base du tube au moyen d'un pilon que l'on lâche dans le tube. Cette technique permet aussi de réaliser des pieux de sable.

1.3.4. Amélioration temporaire par congélation

La méthode de renforcement temporaire des sols par congélation, développée principalement pour les matériaux grenus (sables, graviers), peut être appliquée aux argiles molles et aux limons, lorsqu'aucune autre solution n'est possible. L'effet de la congélation dépend de la température (il augmente quand la température diminue). Par ailleurs, il faut réaliser la congélation le plus rapidement possible pour limiter le gonflement du sol et il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel.

Les techniques de refroidissement utilisées reposent, comme pour les sables et les graviers, sur la circulation d'un fluide froid (azote liquide, habituellement) dans des tubes enfoncés dans le massif de sol.

1.2.2 METHODES D'AMELIORATION DES SOLS GRENUS

Les méthodes d'amélioration des sols grenus font appel à des processus très divers :

- densification par augmentation statique de la contrainte à la surface du sol (préchargement) ou en profondeur (compactage par injection solide) ;
- remplissage des vides (injection) ;
- dislocation de la structure du sol, puis restructuration par des actions externes au massif (chocs du pilonnage intensif) ou internes au massif (vibrations, explosions) ;
- mélange avec un liant pour constituer des colonnes plus résistantes (colonnes de sol traité). Elles sont, de façon générale, de mise en œuvre rapide et relativement facile.

1.2.2.1 Préchargement

Le préchargement des sols grenus s'opère selon les mêmes principes que dans le cas des sols fins. Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs.

1.2.2.2 Vibrocompactage

Elle consiste à provoquer une vibration entretenue dans le sol au moyen d'une aiguille vibrante (figure 20). Cette vibration provoque une densification du matériau qui se traduit par l'affaissement du sol autour du vibreur.

Les vibreurs actuellement utilisés comportent, à l'intérieur de l'aiguille vibrante, un ou plusieurs balourds entraînés par un moteur hydraulique ou électrique. Leur puissance est de l'ordre de 75 à

150 kW. L'appareil est suspendu à un engin de levage et s'introduit dans le sol sous l'effet de son propre poids et de la vibration, avec éventuellement un lançage à l'air ou à l'eau, comme dans le cas des colonnes ballastées.

L'aiguille vibrante est descendue jusqu'à la base du sol à traiter, puis le vibreur est remonté lentement par une succession de mouvements verticaux. Le compactage est suivi en observant l'énergie consommée par le vibreur. L'opérateur peut modifier la fréquence des vibrations afin d'améliorer l'efficacité du compactage. On peut, dans certains cas, faire un apport de matériaux grenus, notamment pour jouer le rôle de drains en cas de séisme et lutter contre la liquéfaction des sables lâches. En fin de traitement, une finition de surface doit être réalisée, par réglage et compactage superficiel.

Des techniques voisines sont quelquefois employées : vibration de palplanches ou de profilés métalliques divers.



Figure 20 – Chantier de vibrocompactage

I.2.2.3. Pilonnage

L'application de chocs à la surface d'un massif de sol grenu est un moyen efficace de compactage. Avant le pilonnage, le sol est recouvert d'une couche de matériaux grossiers d'un mètre d'épaisseur au minimum, destinée à éviter un enfoncement trop important du pilon. Le pilon est lâché d'une grue, plusieurs impacts étant réalisés au même endroit. Cette opération est répétée sur toute la surface à traiter, selon un maillage défini au préalable (figure 21).



Figure 21 – Chantier de pilonnage

Entre les phases de pilonnage, un temps de repos permet la dissipation des surpressions interstitielles créées par les chocs. En fin de chantier, une dernière phase, dite de tapotage, est réalisée pour compacter la surface du sol, désorganisée par les chocs. Les traitements courants sont réalisés avec des pilons de 10 à 20 t tombant de 15 à 20 m de hauteur. On a utilisé sur des chantiers exceptionnels des pilons de 40 t lâchés de 40 m et de 200 t lâchés de 20 m.

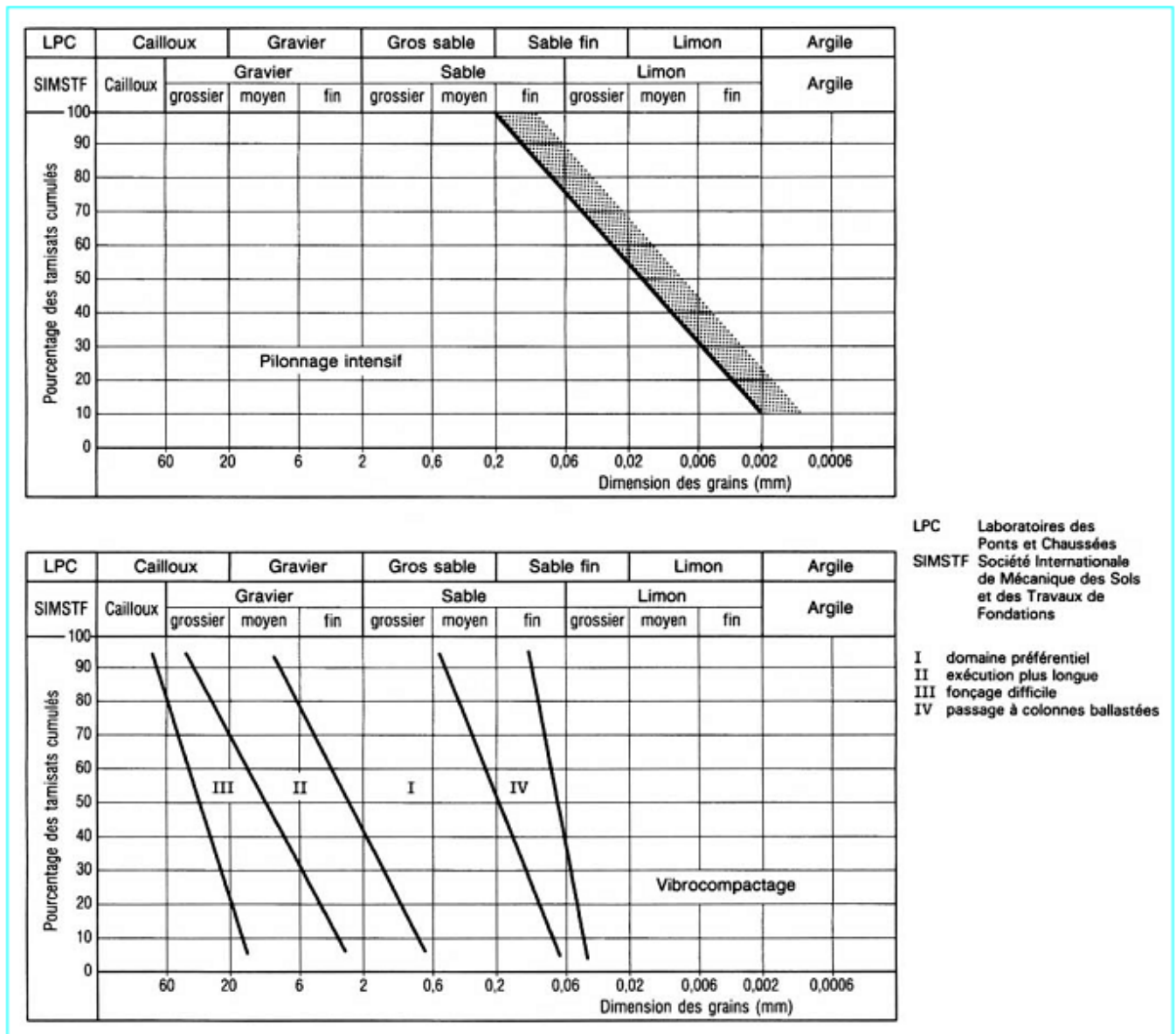


Figure 22 – Domaines d'application du pilonnage et du vibrocompactage pour les sols grenus (fuseaux granulométriques)

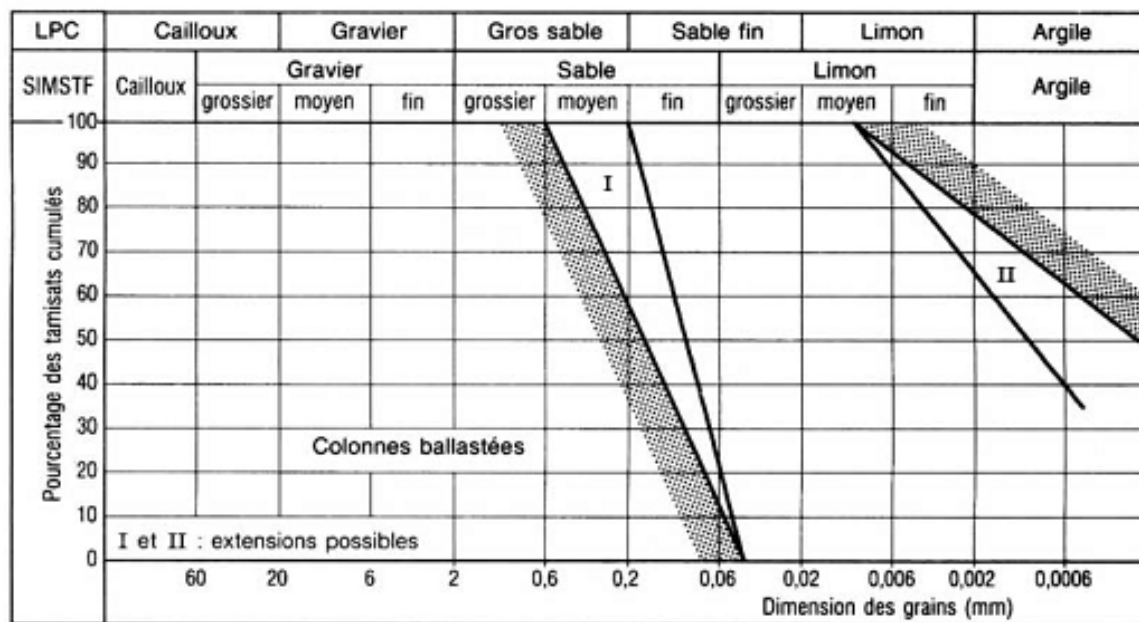
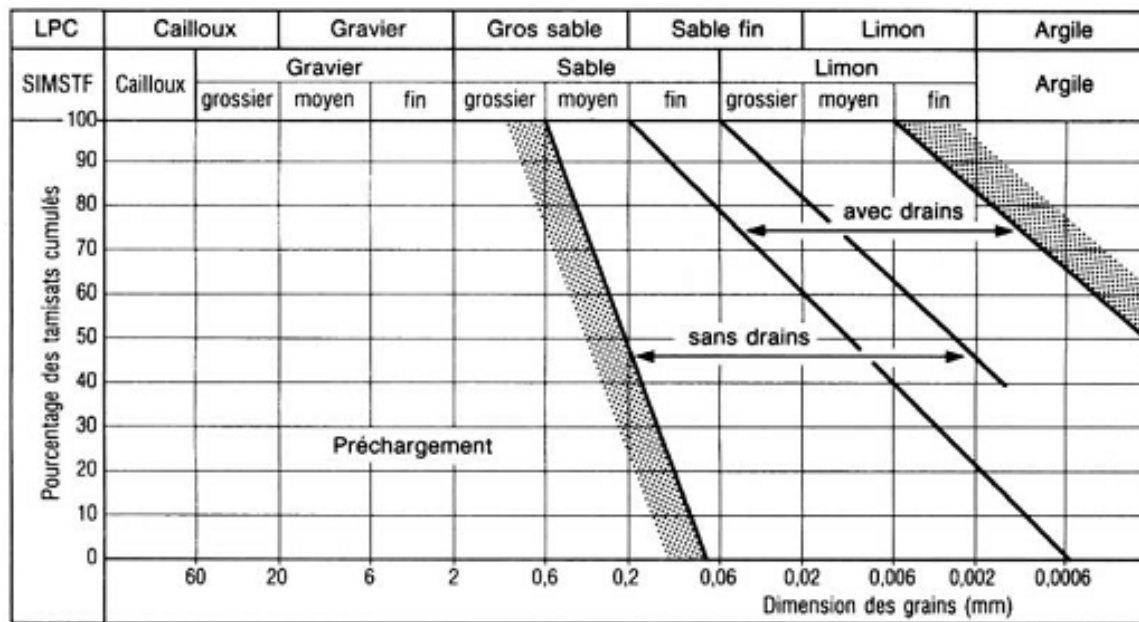


Figure 23 – Domaines d'application des méthodes de traitement des sols fins (fuseaux granulométriques)