

# Amélioration des sols

par **Jean-Pierre MAGNAN**

*Ingénieur des Ponts et Chaussées. Docteur ès Sciences  
Chef de la Division de Géotechnique - Mécanique des Sols 1  
au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)  
Professeur-adjoint à l'École Nationale des Ponts et Chaussées*

et **Georges PILOT**

*Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Délégué à l'Action Internationale au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)  
Professeur-adjoint à l'École Nationale des Ponts et Chaussées*

<b>1. Amélioration des sols fins</b> .....	C 255 - 2
1.1 Comportement des sols fins et problèmes typiques.....	— 2
1.2 Aménagement du projet.....	— 2
1.3 Méthodes d'amélioration des sols fins.....	— 3
1.3.1 Préchargement.....	— 3
1.3.2 Accélération de la consolidation .....	— 3
1.3.3 Renforcement par colonnes.....	— 4
1.3.4 Amélioration temporaire par congélation .....	— 5
1.4 Méthodes d'élaboration des projets .....	— 5
1.4.1 Préchargement.....	— 6
1.4.2 Drains verticaux ou tranchées drainantes .....	— 6
1.4.3 Renforcement par colonnes.....	— 6
1.5 Méthodes de contrôle de l'efficacité du traitement.....	— 6
1.6 Domaines d'application des méthodes .....	— 6
<b>2. Amélioration des sols grenus</b> .....	— 8
2.1 Comportement des sols grenus et problèmes typiques .....	— 8
2.2 Méthodes d'amélioration des sols grenus .....	— 8
2.2.1 Préchargement.....	— 9
2.2.2 Vibrocompactage.....	— 9
2.2.3 Pilonnage.....	— 9
2.2.4 Compactage statique en profondeur .....	— 9
2.2.5 Colonnes de sol traité.....	— 10
2.2.6 Micropieux .....	— 10
2.2.7 Amélioration temporaire par congélation .....	— 10
2.3 Méthodes d'élaboration des projets .....	— 10
2.3.1 Préchargement.....	— 10
2.3.2 Vibrocompactage.....	— 10
2.3.3 Pilonnage.....	— 10
2.3.4 Compactage statique en profondeur .....	— 11
2.3.5 Colonnes de sol traité.....	— 11
2.3.6 Micropieux .....	— 11
2.3.7 Congélation .....	— 11
2.4 Méthodes de contrôle de l'efficacité du traitement.....	— 11
2.5 Domaines d'application des méthodes .....	— 12
<b>3. Amélioration de sols particuliers</b> .....	— 13
3.1 Tourbe.....	— 13
3.2 Loess.....	— 13
3.3 Déchets industriels et urbains .....	— 13
<b>Références bibliographiques</b> .....	— 14

**L**es méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

Les méthodes d'amélioration des sols décrites dans le présent article ont été classées par type de sols à traiter : sols fins, sols grenus et sols particuliers. On passe en revue dans chaque cas les principaux types de problèmes que l'on rencontre en pratique, puis on décrit sommairement les méthodes d'amélioration les plus couramment utilisées, les méthodes de calcul et de contrôle correspondantes, ainsi que les domaines d'application de chaque méthode. Les méthodes de renforcement des sols par géotextiles ou par clouage, ainsi que les techniques d'injection ne sont pas décrites ici.

## 1. Amélioration des sols fins

### 1.1 Comportement des sols fins et problèmes typiques

Les dépôts de sols fins mous et compressibles (argiles, vases) sont fréquents dans les vallées et en bordure des côtes. Ces zones ont été longtemps considérées comme peu propices à la construction, mais on y construit maintenant fréquemment tous les types d'ouvrages (routes, bâtiments, réservoirs, piscines, usines, etc.), au prix d'un traitement préalable des sols de fondation [1] [2].

Ces sols fins ont trois caractéristiques essentielles :

- ils subissent des déformations importantes sous les charges qui leur sont appliquées ;
- leurs déformations ne sont pas instantanées, mais peuvent durer pendant des mois, voire des années ;
- leur capacité portante est souvent trop faible pour supporter les charges prévues dans les projets.

Les problèmes que l'on rencontre en pratique sont tous liés aux trois caractéristiques précédentes : tassements excessifs, tassements différentiels, déformations à long terme, instabilité de l'ouvrage. On peut citer, à titre d'exemples :

- le tassement des remblais d'accès à un pont, à l'entrée d'un bâtiment fondé sur pieux, avec formation d'une marche d'ampleur croissante et des effets parasites sur les fondations ;
- les tassements excessifs des fondations superficielles d'un bâtiment ;
- les ruptures d'ouvrages en cours de construction ou d'exploitation (remblais, silos, etc.).

### 1.2 Aménagement du projet

Si l'on peut considérer, à quelques exceptions près, que n'importe quel ouvrage peut être construit sur n'importe quel site, dans le cas où les propriétés géotechniques des sols sont trop mauvaises, cette réalisation peut se traduire soit par des coûts de fondations spéciales très élevés, soit par des coûts et délais très importants de traitement préalable des sols de fondation. Ce constat conduit à la conclusion qu'il vaut mieux, face à des conditions de construction très difficiles, étudier d'abord les aménagements possibles du

projet. Ces aménagements sont assez variés. Ils peuvent simplement concerner l'implantation de l'ouvrage et le choix de sa géométrie (nombre de travées d'un ouvrage d'art), impliquer un changement de conception des fondations (fondations compensées) ou une modification de la structure de l'ouvrage à construire (radier général sous un bâtiment, renforcement de la base d'un remblai au moyen de géotextiles, utilisation de matériaux légers), ou encore conduire à régler tout ou partie des problèmes en remplaçant les sols médiocres par des matériaux de meilleures caractéristiques.

Les formations de sols mous et compressibles sont assez souvent hétérogènes, tant par l'épaisseur des dépôts que par la nature des matériaux. Une reconnaissance assez large du site dévolu à la construction, avec des moyens relativement légers (photographies aériennes, reconnaissance pénétrométrique) permet de bien cerner ces deux facteurs, d'éviter les zones les moins favorables (sols très organiques, sols mous de très grande épaisseur) et de choisir celles que l'on pourra le plus facilement améliorer (zones à intercalations sableuses, par exemple).

Une solution intuitive pour éviter les problèmes de stabilité et de tassement posés par la fondation des ouvrages ou des bâtiments sur les sols mous est de réaliser un ouvrage dont le poids ne dépasse pas le poids du sol de fondation excavé pour recevoir cet ouvrage. Dans ce cas, la contrainte moyenne à la base de la fondation est simplement égale à la valeur de la contrainte totale régnant initialement au niveau de la fondation dans le massif de sol. Cette solution, appelée *fondation flottante* ou *fondation compensée*, s'applique essentiellement dans le cas de formations épaisses de sols mous de très faible résistance au cisaillement et de forte compressibilité.

La substitution totale des sols de fondation est parfois décidée lorsque l'épaisseur des sols très mous est faible (jusqu'à 4 ou 5 m). Techniquement, cela est possible par l'un des procédés suivants :

- excavation mécanique, évacuation et substitution par remblaiement classique ;
- poinçonnement de la couche molle par le remblai construit à l'avancement ; dans certains cas, l'opération est facilitée par le tir de charges explosives placées à la base des sols mous, en avant du talus du remblai.

Les facteurs qui interviennent dans le choix entre cette solution et celle de l'amélioration du massif de fondation sont assez divers : coût de l'opération, disponibilité du matériau de substitution, possibilités de mise en dépôt du matériau extrait, coût de l'entretien à long terme de l'ouvrage à construire, etc. Lorsque les sols

mous sont très épais, la substitution totale devient exceptionnelle, mais une substitution partielle présente encore des avantages techniques appréciables : diminution des tassements et amélioration des conditions de stabilité. Ces gains ne peuvent s'apprécier qu'à la suite d'une étude géotechnique spécifique et d'une comparaison économique des solutions.

## 1.3 Méthodes d'amélioration des sols fins

### 1.3.1 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 1) :

- produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de compression secondaire ; on peut rendre ainsi le sol traité plus rapidement constructible, sans redouter à moyen ou à long terme des tassements absolus ou différentiels importants ;

- 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 2a) 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 2b) ; 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 disponibles ; cet obstacle est désormais levé et le recours à l'application du vide devrait se développer.

On peut aussi diminuer les pressions interstitielles, et donc précharger le sol, en rabattant la nappe dans la zone à consolider (figure 2c) ; 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

Dans les dépôts de sols fins, les vitesses de consolidation sont en général très faibles parce que l'eau interstitielle doit parcourir un long chemin pour sortir du massif de sol. Il s'ensuit que les tassements peuvent durer pendant de longues périodes (plusieurs mois, années ou dizaines d'années, suivant les sites), ce qui est souvent inacceptable, tant pour les ouvrages définitifs que pour les opérations de préchargement. 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 [3] [10].

La technique de drainage la plus fréquemment employée consiste à mettre en place un maillage régulier (maille triangulaire ou carrée) de drains verticaux (figure 3). 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 (figure 4) 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. Une structure unique peut aussi jouer à la fois le rôle de filtre et de canal. Les drains préfabriqués sont habituellement mis en place par fonçage à l'intérieur d'un mandrin tubulaire, de section toujours supérieure à celle du drain. La longueur des drains peut atteindre plusieurs dizaines de mètres.

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. Elle peut être partiellement remplacée par une ou plusieurs nappes de géotextiles.

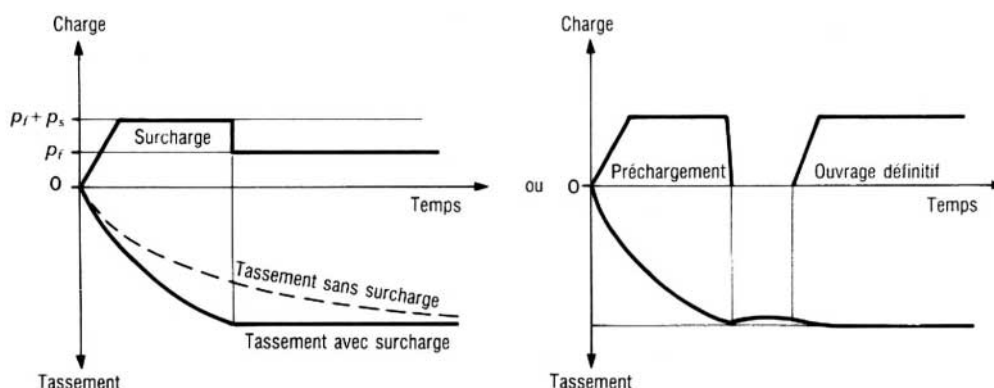


Figure 1 – Principe du préchargement pour le contrôle des tassements

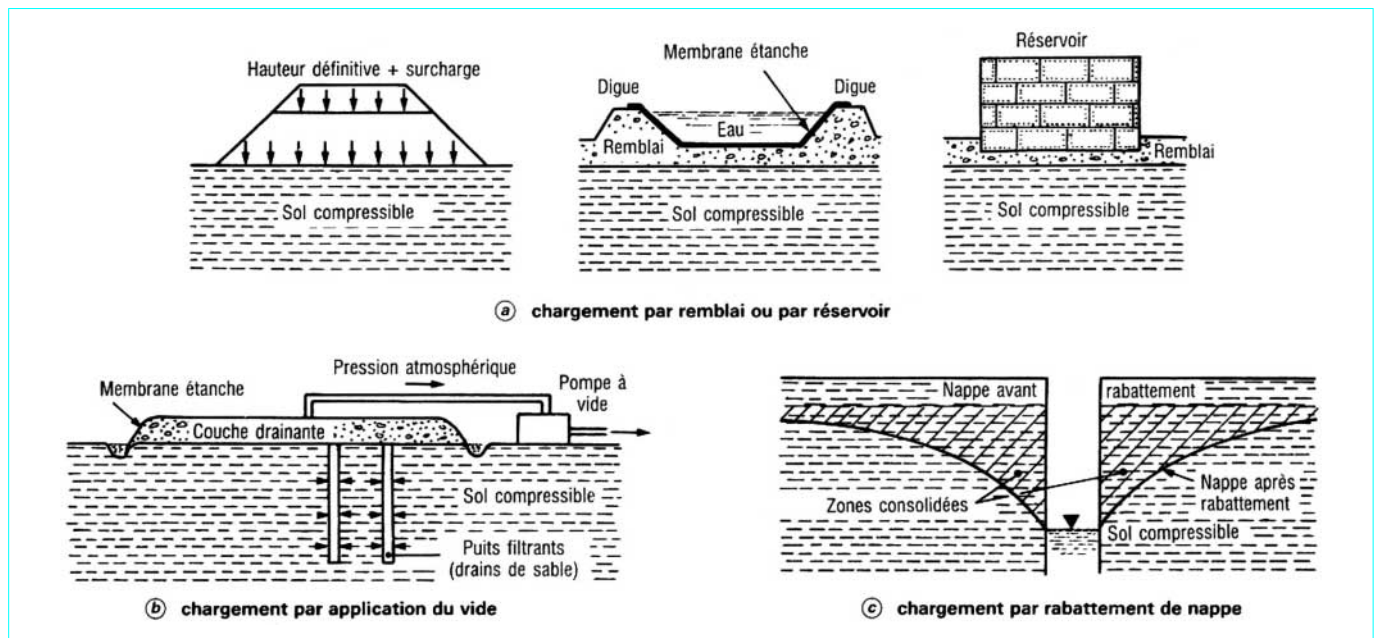


Figure 2 – Techniques de préchargement

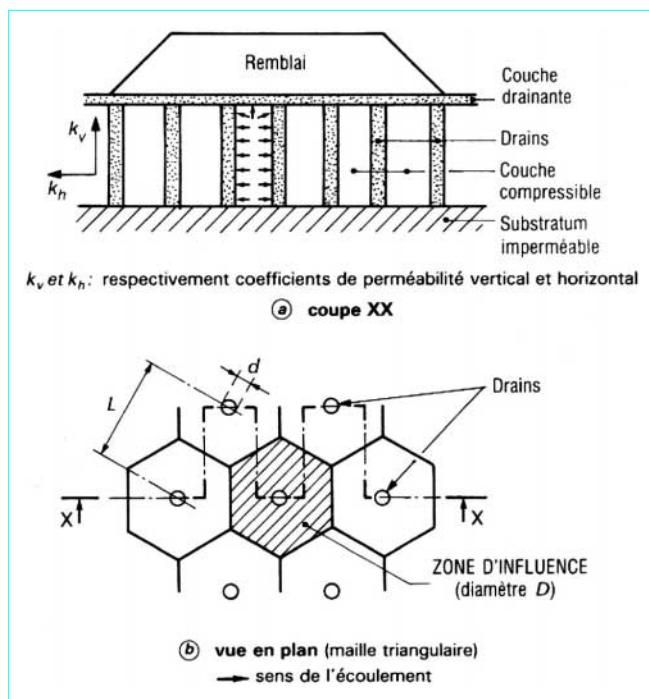


Figure 3 – Réseaux de drains verticaux

### 1.3.3 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

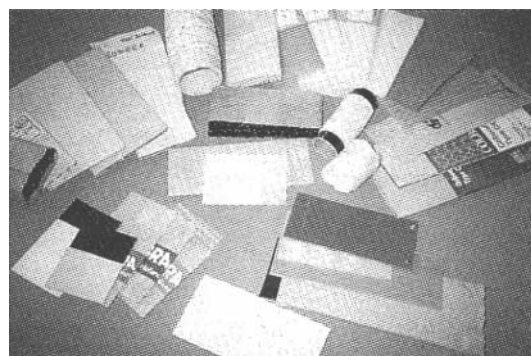


Figure 4 – Drains préfabriqués

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 [1] [5] [16].

#### 1.3.3.1 Colonnes ballastées

Leur exécution s'effectue en deux phases (figure 5) :

- 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 m<sup>2</sup>.



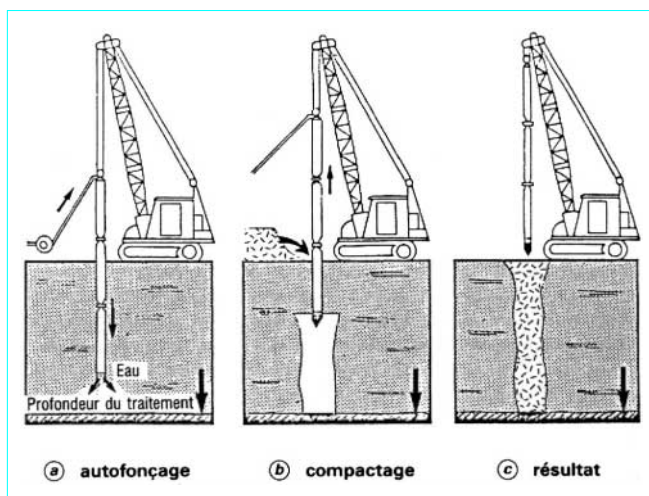


Figure 5 – Phases d'exécution des colonnes ballastées

En raison de leur coût assez élevé, 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 [12]). 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.

### 1.3.3.3 Colonnes de sol traité en place

Dans le cas des argiles molles peu consistantes et des limons, on peut réaliser des colonnes de sol traité en place [6]. La technique a été développée pour les argiles sensibles scandinaves, avec un traitement à la chaux. Le mélange de la chaux avec le sol en place se fait au moyen d'une machine de forage équipée d'une tarière spéciale. Les colonnes produites ont un diamètre de 50 cm et une longueur maximale de 15 m (figure 6). Les colonnes de sol traité à la chaux sont utilisées pour :

- renforcer les fondations argileuses supports de remblais ou de bâtiments légers ;
- conforter des glissements de versants naturels ;
- réaliser des ouvrages de soutènement.

Suivant les besoins, on peut utiliser aussi du ciment, dont la cinétique de prise est différente de celle de la chaux.

Une technique semblable a été développée au Japon, où elle est utilisée principalement pour les travaux de construction portuaire. On a réalisé des colonnes atteignant 1,75 m de diamètre et 60 m de profondeur.



Figure 6 – Colonne de sol traité à la chaux

Une variante de ces procédés, développée récemment en France, permet de réaliser des colonnes de matériau traité et compacté dotées de résistances élevées sans que l'on ait besoin de charger le massif de sol traité. Cette technique est utilisée, en particulier, pour le traitement des talus instables [19].

### 1.3.4 Amélioration temporaire par congélation

La méthode de renforcement temporaire des sols par congélation, développée principalement pour les matériaux grenus (sables, graviers, § 2.2.7), 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 [4] [5].

## 1.4 Méthodes d'élaboration des projets

Les méthodes de calcul utilisées pour définir la consistance des travaux d'amélioration des sols fins décrits au paragraphe 1.3 sont de deux types :

- pour le préchargement et l'accélération de la consolidation par drainage, on utilise les méthodes classiques de calcul des tassements et des vitesses de tassement (article *Compressibilité. Consolidation. Tassement* [C 214] dans cette rubrique), qui permettent de déterminer l'intensité de la charge à appliquer et la durée du chargement, ainsi que l'espacement des drains verticaux ou des tranchées drainantes ;
- pour le renforcement des sols par colonnes, on a développé des modèles de calcul particuliers pour déterminer la répartition des charges entre les colonnes et le sol, et les tassements correspondants.

Dans tous les cas, l'expérience prouve qu'il subsiste toujours une certaine incertitude sur la validité des prévisions de ces méthodes de calcul et il est recommandé de réaliser des chantiers d'essai pour tous les travaux d'une certaine importance, et à tout le moins de contrôler l'efficacité du traitement réalisé.

### 1.4.1 Préchargement

L'étude nécessite une reconnaissance géotechnique complète du sol à traiter et fait appel aux caractéristiques de compressibilité et de résistance au cisaillement du sol. Elle consiste à calculer la courbe de tassement, au cours du temps, de la couche compressible sous une charge donnée et à ajuster cette charge pour que, dans le temps disponible, le tassement de consolidation soit égal ou supérieur au tassement final sous l'ouvrage à construire (figure 1). On vérifie simultanément que la stabilité du massif de sol est assurée sous la charge prévue [2].

### 1.4.2 Drains verticaux ou tranchées drainantes

Dans le cas des drains verticaux, on utilise la théorie de la consolidation radiale (article *Compressibilité. Consolidation. Tassement* [C 214]) pour déterminer l'espacement des drains qui permettra d'obtenir un degré de consolidation donné dans le temps fixé. Le résultat dépend de la perméabilité horizontale du sol, qu'il est indispensable d'évaluer de façon précise, et de la géométrie des drains. Pour les drains de sable, on utilise normalement le diamètre nominal du drain. Pour les drains plats préfabriqués de 10 cm de largeur, on utilise un diamètre équivalent de 5 cm [2] [3] [10].

Dans le cas des tranchées drainantes, on peut utiliser la théorie de la consolidation unidimensionnelle dans le sens vertical et dans le sens horizontal, en combinant les degrés de consolidation correspondants  $U_v$  et  $U_h$  au moyen de la formule :

$$U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h)$$

Dans les cas plus complexes, notamment pour les sols multicouches ou les drains qui ne traversent pas la couche compressible, il est recommandé d'utiliser un programme de calcul numérique.

### 1.4.3 Renforcement par colonnes

L'étude d'un renforcement par colonnes ballastées comporte plusieurs aspects [8] [16] [17] :

- d'une part, l'étude de la capacité portante de la colonne : détermination du rapport entre la section de la colonne et celle de sa zone d'influence, choix des dimensions des colonnes, choix du matériau ; ce calcul s'opère le plus souvent dans l'hypothèse d'une colonne isolée ou dans l'hypothèse d'un réseau infini de colonnes, suivant le problème étudié ; le cas intermédiaire des petits groupes de colonnes ne dispose pas encore de méthode de calcul spécifique ; la charge admissible d'une colonne ballastée est généralement comprise entre 100 et 300 kN ;

- d'autre part, le calcul du tassement du massif de sol renforcé ; on analyse pour cela la répartition des charges entre le sol et la colonne, en admettant que le tassement de la surface du massif renforcé est uniforme.

Un calcul de stabilité d'ensemble (rupture par grand glissement) doit être réalisé lorsqu'il existe un risque de rupture par glissement latéral (remblai construit sur massif d'argile renforcé, par exemple). Dans ce cas, on considère que les colonnes participent à la résistance au cisaillement.

Si les colonnes doivent exercer un rôle de drains, un calcul de consolidation radiale (§ 1.4.2) sera aussi réalisé.

Les colonnes de sol traité sont dimensionnées en suivant une démarche analogue [16].

## 1.5 Méthodes de contrôle de l'efficacité du traitement

Les facteurs qui déterminent le comportement réel des massifs de sols traités sont rarement connus de façon fiable, de sorte que les prévisions des calculs ne sont pas toujours conformes à la réalité. Ces incertitudes portent notamment sur les variations des propriétés du sol sur le site, sur les valeurs réelles des perméabilités et sur les caractéristiques des drains ou des colonnes effectivement réalisés. Il est, pour cette raison, toujours indispensable de contrôler les effets du traitement effectué.

Le contrôle de l'efficacité d'un préchargement ou d'un système de drainage s'effectue principalement par mesure des tassements et des pressions interstitielles à différents niveaux et en différents points du site traité. Les tassements et les surpressions interstitielles peuvent être utilisés pour vérifier que leur évolution calculée n'était pas trop différente de la réalité ; il suffit pour cela de les reporter sur les courbes de tassement et de consolidation calculées lors de l'élaboration du projet. On peut aussi analyser les résultats des mesures pour en déduire les valeurs réelles des paramètres géotechniques du sol : des méthodes d'interprétation récentes, de mise en œuvre simple (méthode d'Asaoka), permettent d'évaluer, à partir des observations de chantier, le tassement final ainsi que le coefficient de consolidation réel moyen du sol. Leur usage peut être recommandé [7] [9].

Le contrôle des colonnes réalisées pour renforcer les sols fins s'opère selon des principes différents. Il porte d'abord, dès la construction, sur les quantités des matériaux mis en œuvre (ballast, chaux, ciment) et la continuité des colonnes. Pour les colonnes ballastées, le document technique unifié DTU 13.2 [22] prévoit un contrôle des propriétés mécaniques d'au moins une colonne sur trente, avec un minimum de trois par ouvrage, ainsi qu'un essai de chargement pour les chantiers importants. Le contrôle des colonnes s'effectue au moyen d'essais en place (pénétromètre, pressiomètre). La mesure des tassements du sol et des colonnes, des pressions interstitielles entre les colonnes, ainsi que des contraintes totales verticales en tête des colonnes et à la surface du sol entre les colonnes complète le dispositif de contrôle [1].

## 1.6 Domaines d'application des méthodes

Lors de l'étude de faisabilité d'un projet, le recours aux méthodes de traitement des sols implique la connaissance de leurs performances et limites respectives. Le tableau 1 regroupe quelques caractéristiques des méthodes de traitement décrites dans le paragraphe 1. Des fuseaux granulométriques représentatifs des domaines d'application de ces méthodes ont aussi été proposés (figure 2). Toutefois, il faut insister sur le fait que ces fuseaux granulométriques ne sauraient remplacer l'étude complète du sol sur chaque site, de nombreux autres facteurs influençant l'efficacité de chaque méthode. Par ailleurs, les domaines d'application de certaines méthodes récentes évoluent encore avec le progrès des techniques.

Tableau 1 – Comparaison des méthodes de traitement des sols fins

Méthodes	Qualification des entreprises	Délais		Effet sur l'environnement	Dépenses d'énergie	Coût relatif
		d'exécution	d'action			
Préchargement :						
— seul.....	★	★ à ★★	★ ★ à ★★ ★★	★	★ à ★★	★
— avec drains.....	★ ★	★ ★	★ ★	★	★ ★	★ ★
— avec tranchées drainantes.....	★ à ★★	★ ★	★ ★	★	★ ★	★ ★
Colonnes ballastées.....	★ ★ ★	★ à ★★	★	★ ★	★ ★	★ ★ à ★★ ★
Colonnes de sol traité à la chaux.....	★ ★ ★	★ à ★★	★ ★	★ ★	★ ★	★ ★ ★
Congélation.....	★ ★ ★	★ ★ à ★★ ★	★	★ à ★★	★ ★ ★	★ ★ ★
Substitution.....	★	★ ★	★	★ ★	★ ★	★ ★

★ faible ★★ moyen ★★ ★ important.

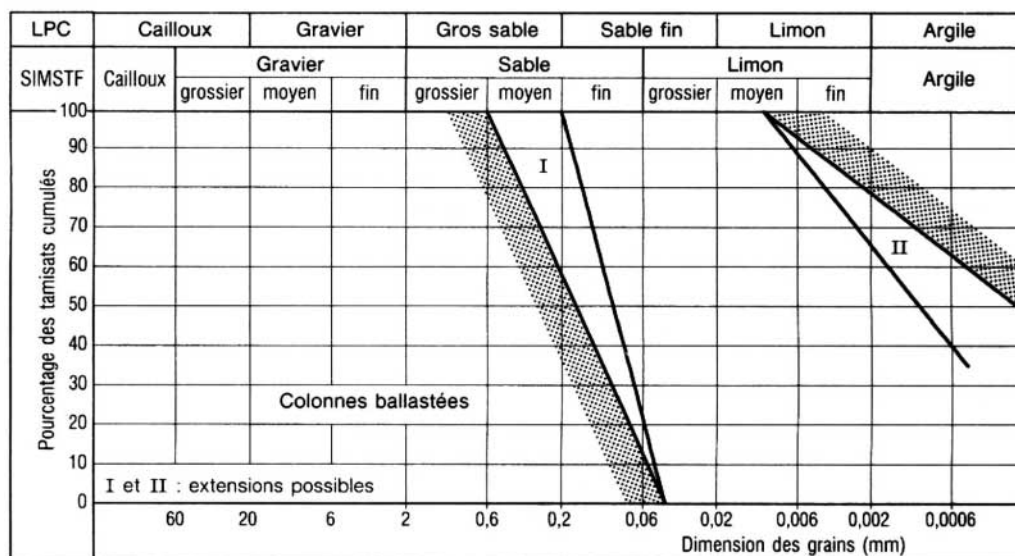
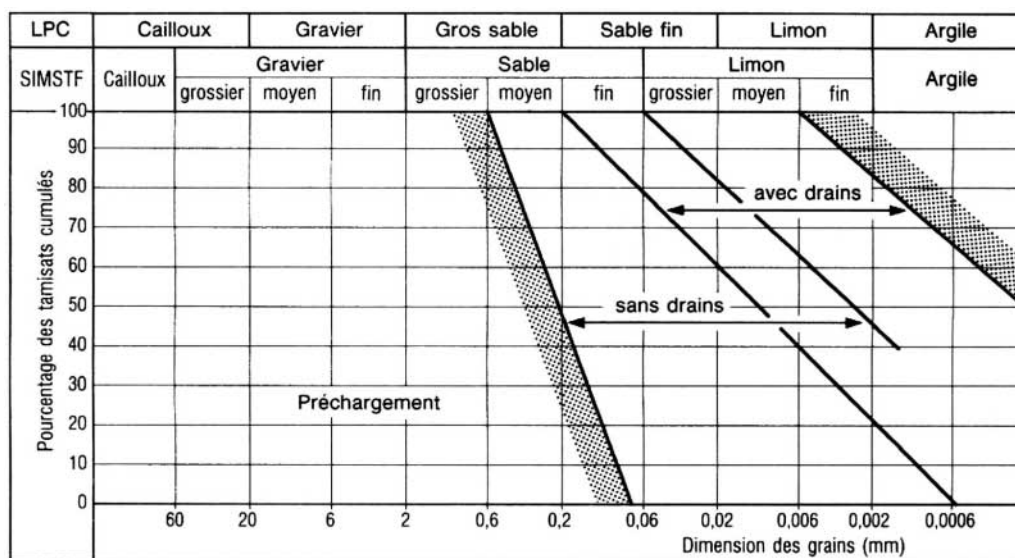


Figure 7 – Domaines d'application des méthodes de traitement des sols fins (fuseaux granulométriques)

LPC Laboratoires des Ponts et Chaussées  
SIMSTF Société Internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations

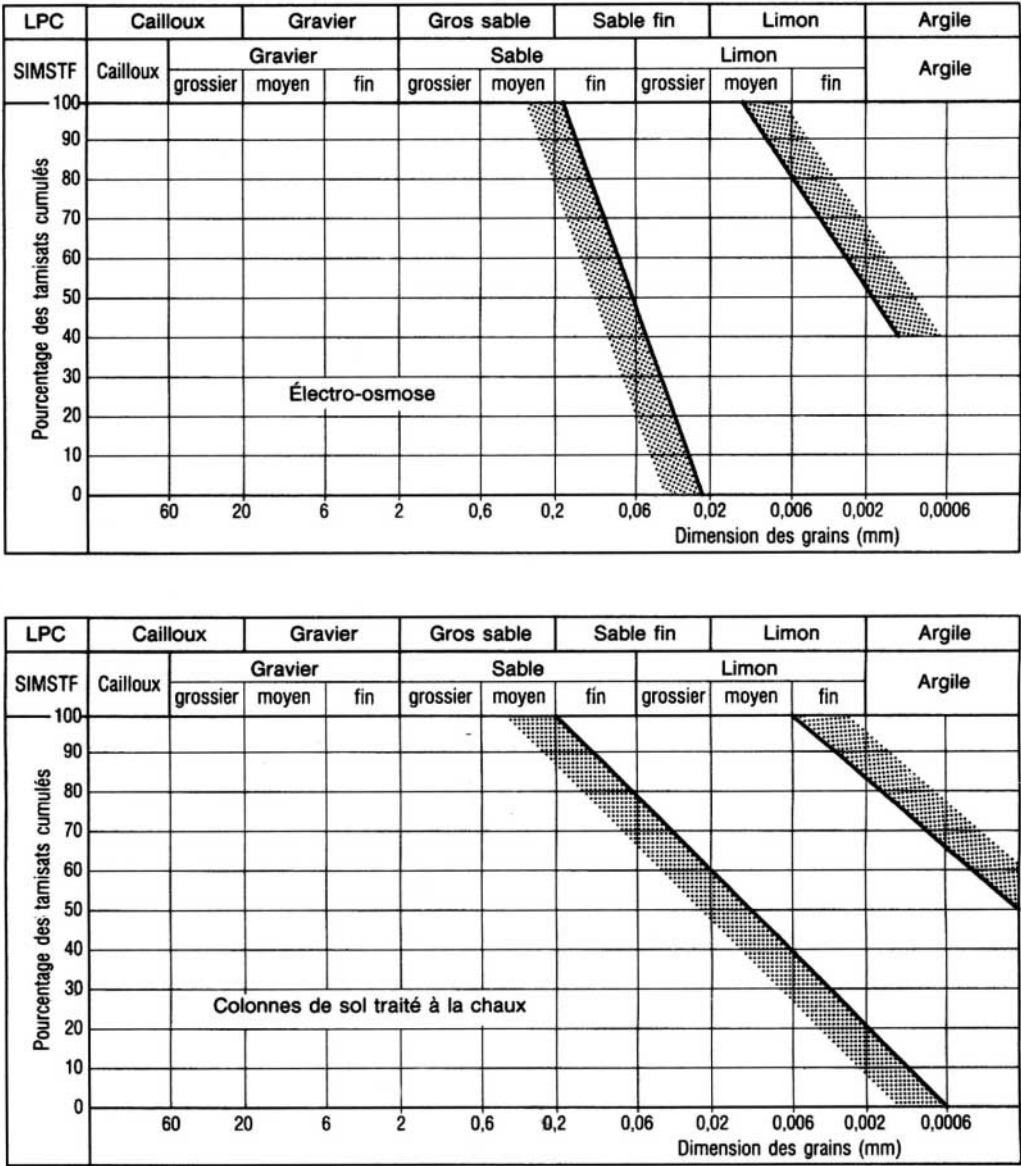


Figure 7 – Domaines d'application des méthodes de traitement des sols fins (fuseaux granulométriques) (suite)

2. Amélioration des sols grenus

2.1 Comportement des sols grenus et problèmes typiques

Contrairement à ce qui se passe dans le cas des sols fins, la perméabilité élevée des sols grenus fait que l'on n'observe d'augmentation des pressions interstitielles dans ces sols que dans le cas de la liquéfaction, généralement provoquée par des sollicitations sismiques. Les problèmes de sols grenus sont donc essentiellement des problèmes d'amplitudes de tassement, ainsi que des

problèmes de résistance à la liquéfaction ; ces problèmes se posent pour l'essentiel dans le cas des sables lâches.

2.2 Méthodes d'amélioration 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.

Comme dans le cas des sols fins, seules les méthodes les plus couramment utilisées seront décrites dans ce paragraphe : préchargement, vibrocompactage, pilonnage, compactage statique en profondeur, colonnes de sol traité, etc. Les techniques d'injection de la masse du sol ne sont pas décrites dans cet article. Une description plus détaillée des différentes méthodes d'amélioration des sols grenus peut être trouvée dans les références [1] [2] [4] [5] [6].

### 2.2.1 Préchargement

Le préchargement des sols grenus s'opère selon les mêmes principes que dans le cas des sols fins (§ 1.3.1). 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.

### 2.2.2 Vibrocompactage

Cette technique est utilisée depuis les années trente. Elle consiste à provoquer une vibration entretenue dans le sol au moyen d'une aiguille vibrante (figure 8). 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 (§ 1.3.3.1). 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, par exemple.

### 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 9). 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



Figure 8 – Chantier de vibrocompactage



Figure 9 – Chantier de pilonnage

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.

Les impacts du pilon induisent des vibrations dont l'effet sur l'environnement doit être pris en compte.

### 2.2.4 Compactage statique en profondeur

L'introduction en force de mortier ou de béton spécial (micro-béton) dans un massif de sol meuble, à partir de forages, permet de provoquer la densification du sol naturel sans détruire sa structure ni l'imprégner (figure 10). Outre la densification de la masse du sol entre les forages, on obtient en plus des colonnes de matériau plus résistant, qui reprennent une partie des charges appliquées au massif de sol. L'injection s'effectue à partir de forages primaires, secondaires et éventuellement tertiaires, selon un maillage adapté au problème à résoudre. Le tube d'injection est descendu dans un forage de diamètre voisin de 10 cm [16].

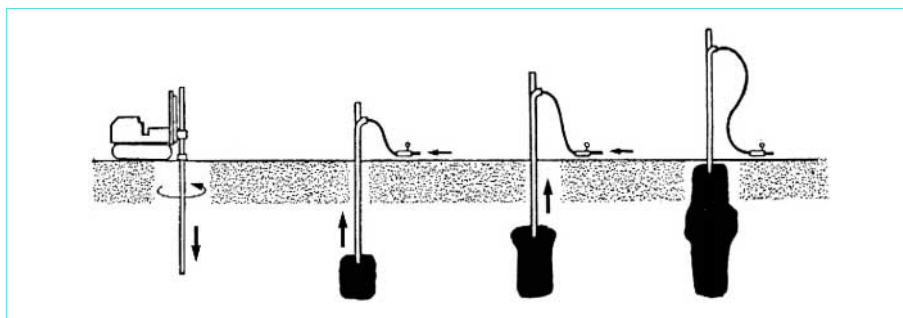


Figure 10 – Principe du compactage statique en profondeur

### 2.2.5 Colonnes de sol traité

Différentes techniques permettent de constituer dans le sol des colonnes de sol traité, en général au ciment. Dans le cas des sols grenus, les techniques de mélange hydrodynamique, souvent appelées *jet grouting*, sont les plus répandues, pour une gamme de sols allant des limons argileux aux alluvions grossières. Dans les applications courantes, on réalise ainsi des colonnes ou des parois de sol-ciment [16].

La technique de réalisation de colonnes de sol traité par mélange hydrodynamique fait appel, séparément ou en combinaison, à trois phénomènes : déstructuration du terrain sous l'effet dynamique d'un jet de fluide à très grande vitesse, extraction d'une partie du terrain qui remonte en surface avec le fluide, incorporation d'un matériau liant extérieur qui se mélange avec le sol. Différentes méthodes de mise en œuvre ont été développées (injection simple, injection double et injection triple), avec des performances adaptées aux problèmes à traiter en pratique. On peut réaliser, par ce procédé, des colonnes de plusieurs mètres de diamètre et de plusieurs dizaines de mètres de longueur.

### 2.2.6 Micropieux

La réalisation de réseaux de micropieux dans un massif de sols lâches offre une alternative aux autres méthodes de renforcement des sols de ce type, notamment quand les conditions d'exécution des travaux sont contraignantes et ne permettent pas d'utiliser des matériels encombrants ou des techniques perturbant l'environnement du chantier. Les micropieux sont réalisés dans des forages de petit diamètre. Ils sont souvent associés à une injection du massif de sol [12].

### 2.2.7 Amélioration temporaire par congélation

La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé [4] [5].

La congélation est réalisée par circulation de saumure ou d'un gaz réfrigérant (azote liquide, habituellement) dans des tubes mis en place dans le sol à traiter. L'utilisation d'azote liquide permet une progression rapide du front de gel et une plus grande souplesse dans le maintien de la zone gelée.

L'augmentation de volume de l'eau lors de sa transformation en glace peut provoquer des désordres dans le voisinage de la zone traitée et doit être prise en compte lors de l'élaboration du projet de traitement.

## 2.3 Méthodes d'élaboration des projets

Face à la complexité des phénomènes mis en jeu, les méthodes de calcul de l'amélioration des sols grenus ont un support essentiellement expérimental ou empirique, et un ajustement doit toujours intervenir sur le site lors de la réalisation des plots d'essai.

### 2.3.1 Préchargement

Comme dans le cas des sols fins, la définition du préchargement nécessaire pour limiter les tassements de l'ouvrage à construire repose sur l'analyse des tassements sous cet ouvrage et sous la charge appliquée au préalable. Ces calculs se font en utilisant les méthodes classiques décrites dans l'article *Compressibilité. Consolidation. Tassement* [C 214]. La partie irréversible du tassement du massif de sol sous la charge préalable vient en déduction du tassement calculé sous l'ouvrage définitif [2].

### 2.3.2 Vibrocompactage

Compte tenu du nombre et de la complexité des paramètres à prendre en compte (granulométrie, indice des vides initial, degré de saturation, perméabilité, intensité de la vibration), il n'existe pas de méthode de calcul fiable de l'énergie de vibration à mettre en œuvre pour obtenir un degré de compactage donné. L'étude préalable s'effectue sur une base qualitative, d'après l'épaisseur du sol à traiter et ses caractéristiques physiques et mécaniques (densité, granulométrie, caractéristiques pressiométriques ou pénétrométriques). La réalisation d'une planche d'essai au début des travaux permet de préciser les paramètres du traitement (maillage et ordre d'exécution du compactage, énergie de vibration) [4] [5] [6].

### 2.3.3 Pilonnage

Les méthodes d'étude sont encore largement empiriques et dépendent de l'expérience acquise sur chaque chantier. La compilation des observations faites sur de nombreux chantiers a permis d'établir que la profondeur d'action du traitement  $D$  est liée à la hauteur de chute du pilon  $H$  et à la masse du pilon  $M$  par la formule approchée :

$$D = \frac{1}{2} \sqrt{MH}$$

avec  $D$  et  $H$  en mètres,  $M$  en tonnes.

Les impacts sont couramment distribués selon des mailles de 5 à 8 m de côté.

Le maillage, l'énergie utilisée (liée au nombre d'impacts par empreinte), le temps de repos entre phases et le nombre de phases sont ajustés au début du chantier sur des zones d'essai où l'on mesure l'évolution des tassements du sol autour des empreintes, la dissipation des pressions interstitielles, l'évolution des caractéristiques mécaniques du sol traité et éventuellement les vibrations provoquées par les impacts [12].

### 2.3.4 Compactage statique en profondeur

Comme beaucoup d'autres techniques d'origine récente, le compactage statique en profondeur par injection de mortier ne dispose pas à proprement parler de méthode de dimensionnement. Deux éléments essentiels doivent être déterminés pour les travaux :

- la composition du mortier qui sera injecté, et qui doit être pompable, sans claquer le terrain ni bloquer prématurément l'expansion de la masse injectée ;
- le critère de fin d'injection (pression maximale, déplacement du sol à proximité du forage d'injection ou quantité prédéterminée de mortier injecté).

Ces paramètres du traitement peuvent être estimés à l'avance d'après les caractéristiques pressiométriques ou pénétrométriques des sols ; des essais en laboratoire permettent de définir la composition du mortier qui sera injecté. La réalisation d'une planche d'essai au début des travaux permet de préciser les paramètres de l'injection. Comme pour tous les travaux d'injection, le suivi permanent du déroulement de l'opération dans chaque forage, avec enregistrement des quantités injectées et des pressions d'injection, permet d'adapter le traitement aux caractéristiques réelles des sols en chaque point [16].

### 2.3.5 Colonnes de sol traité

Le diamètre de la colonne et les propriétés mécaniques du mélange de sol et de coulis sont les principaux paramètres de conception pour les colonnes de sol traité par mélange hydrodynamique. La nature des sols rencontrés et la technologie choisie ont une influence très importante sur le diamètre de l'inclusion. Ainsi, l'injection triple permet d'obtenir des diamètres deux fois plus grands que l'injection simple. Il semble que les propriétés mécaniques du sol traité soient assez homogènes à l'intérieur de la masse solidifiée. Les propriétés du mélange de sol et de coulis peuvent être étudiées en laboratoire, mais les caractéristiques réelles des colonnes obtenues sur chaque site doivent être vérifiées sur une planche d'essai au début de chaque chantier. De plus, le contrôle du déroulement des travaux doit être assuré en permanence, pour pouvoir réagir aux anomalies éventuellement constatées. Dans ces conditions, les calculs de dimensionnement réalisés lors de l'élaboration des projets ne peuvent être qu'approximatifs. La densité du traitement (dimensions et espacement des colonnes) est déterminée essentiellement par les reports de charge calculés entre les colonnes et le sol qui les entoure, et par la résistance au cisaillement supplémentaire du sol traité, en cas de glissement [16].

### 2.3.6 Micropieux

Le dimensionnement des micropieux qui permettent d'obtenir un massif de sol renforcé, de caractéristiques mécaniques données, est une opération complexe, notamment parce qu'on doit prendre en compte les effets de groupe des micropieux. On peut procéder en deux étapes [20] en étudiant séparément le comportement du mas-

sif, puis le comportement de chaque micropieu. Néanmoins, le dimensionnement des renforcements par micropieux repose encore pour beaucoup sur l'expérience antérieure [21].

### 2.3.7 Congélation

La définition des paramètres des chantiers de congélation est centrée sur le calcul des transferts d'énergie entre le sol et les circuits de refroidissement lors du passage de l'eau à l'état de glace. Ce calcul s'effectue par des méthodes numériques, en s'appuyant sur l'expérience acquise sur les chantiers antérieurs [4] [5].

## 2.4 Méthodes de contrôle de l'efficacité du traitement

Comme on l'a noté plusieurs fois dans ce qui précède, les techniques d'amélioration des sols grenus ne possèdent pas encore de méthodes de dimensionnement réellement fiables et la vérification sur chaque site de l'efficacité du traitement prévu est une composante essentielle des travaux. Les méthodes de contrôle de l'efficacité du traitement ont donc une importance particulière.

Les observations faites sur les chantiers d'amélioration des sols grenus sont de deux types :

- pendant la réalisation des travaux, certaines mesures permettent d'adapter les paramètres du traitement au comportement réel des sols ;
- après la fin du traitement, d'autres mesures permettent de contrôler l'efficacité du traitement effectué.

Le contrôle de l'amélioration du sol est réalisé en général au moyen d'essais au pénétromètre ou au pressiomètre régulièrement répartis sur le site, et comparés à des essais réalisés avant traitement dans les mêmes zones. On peut aussi contrôler l'augmentation de la densité du sol en réalisant des diagraphies (articles *Géophysique appliquée au génie civil* [C 224] et *Diagraphies et géophysique de forage* [C 225] dans ce traité).

Les contrôles en cours de travaux sont spécifiques à chaque technique :

- pour le **vibrocompactage**, la régularité et l'homogénéité du compactage sont contrôlées en enregistrant en continu l'énergie électrique consommée par le vibreur ; la mesure des tassements et des volumes de matériaux ajoutés permet d'évaluer la variation de l'indice des vides ;
- pour le **pilonnage**, les contrôles comportent des mesures topographiques autour et en fond d'empreinte pour mesurer les déplacements verticaux et évaluer la diminution du volume du sol, et des mesures de pressions interstitielles pour contrôler le délai de repos entre les phases du traitement ;
- pour le **compactage statique en profondeur**, l'enregistrement des paramètres de perforation (vitesse de perforation, pression sur l'outil, etc.) et des paramètres d'injection (débit, pression, quantité), et la surveillance continue des mouvements de la surface du sol permettent de contrôler le bon déroulement des travaux ;
- pour les **colonnes de sol traité par mélange hydrodynamique**, le contrôle s'appuie sur la comparaison du volume de coulis injecté et du volume de mélange de coulis et de sol qui remonte à la surface ;
- pour la **congélation**, le contrôle porte essentiellement sur le champ des températures de la zone congelée, ainsi que sur les déplacements de cette zone, car les sols gelés sont sujets à des déformations de fluage qui dépendent de la température.

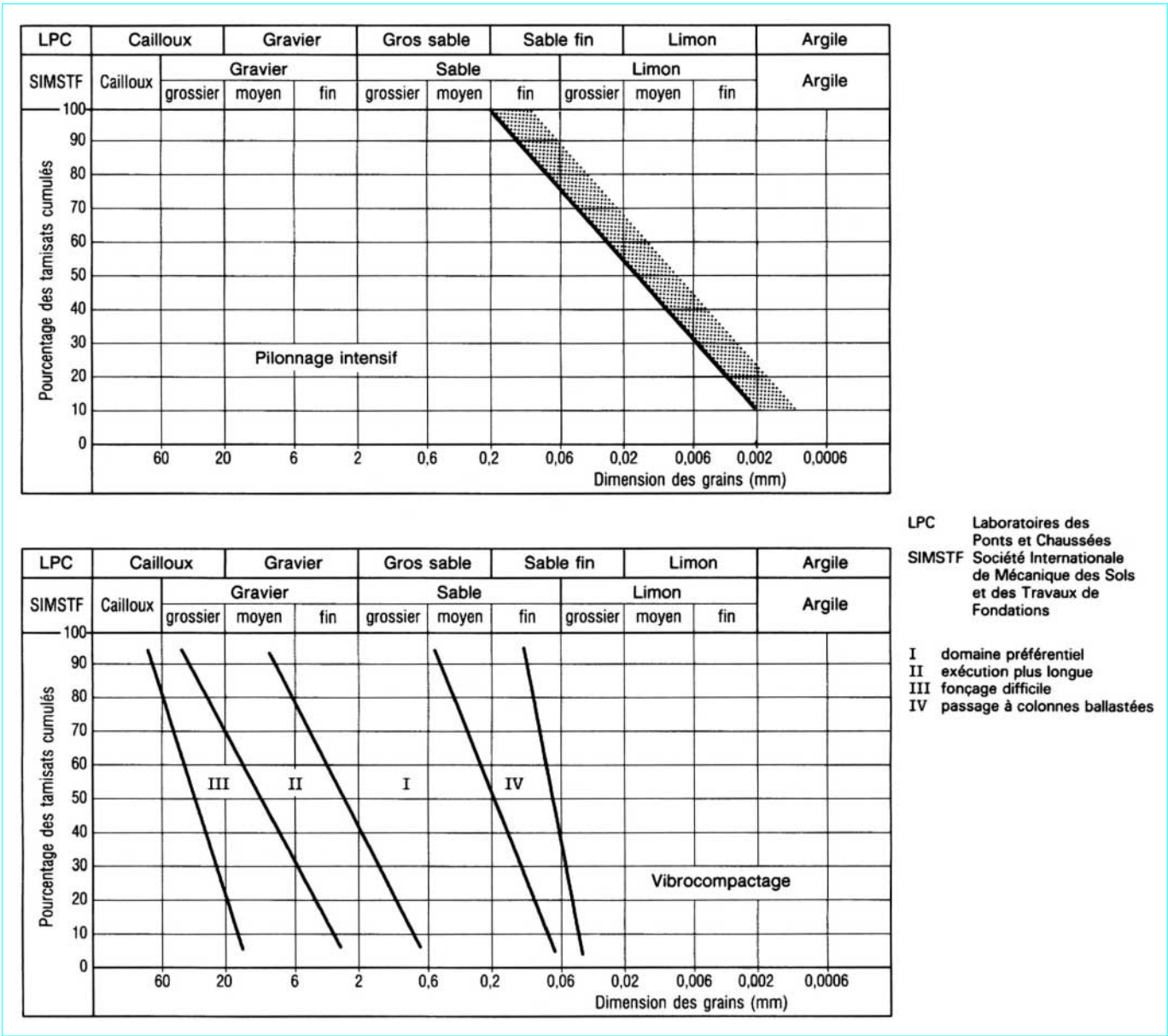


Figure 11 – Domaines d'application du pilonnage et du vibrocompactage pour les sols grenus (fuseaux granulométriques)

2.5 Domaines d'application des méthodes

Comme pour les méthodes d'amélioration des sols fins, on peut donner une idée de l'aptitude de certaines méthodes de traitement des sols grenus à améliorer un sol donné au moyen de fuseaux granulométriques (figure 11). Il faut toutefois garder à l'esprit que

d'autres facteurs (par exemple, l'indice de densité et les propriétés mécaniques du sol) sont à prendre en compte dans la définition précise du traitement de chaque cas concret. Le tableau 2 compare les principales caractéristiques des méthodes d'amélioration des sols grenus [1].



Tableau 2 – Comparaison des méthodes de traitement des sols grenus

Méthodes	Qualification des entreprises	Délais		Effet sur l'environnement	Dépenses d'énergie	Coût relatif
		d'exécution	d'action			
Préchargement .....	★	★ à ★★	★★ à ★★★	★	★ à ★★	★
Vibrocompactage .....	★★★	★ à ★★	★	★★	★★	★★ à ★★★
Pilonnage .....	★★	★	★	★★ à ★★★	★★	★★
Compactage statique en profondeur, colonnes de sol traité .....	★★★	★ à ★★	★	★★	★★	★★ à ★★★
Congélation .....	★★★	★★ à ★★★	★	★ à ★★	★★★	★★★

★ faible ★★ moyen ★★★ important.

### 3. Amélioration de sols particuliers

Les particularités du comportement mécanique de certains sols de fondation naturels (tourbe, loess, etc.) ou artificiels (déchets industriels ou urbains) rendent nécessaires certaines modifications des méthodes d'amélioration des sols décrites dans les paragraphes précédents, tandis que d'autres méthodes deviennent inopérantes. Les méthodes utilisables en pratique dans ces sols particuliers sont brièvement décrites dans ce qui suit.

#### 3.1 Tourbe

Le mot *tourbe* peut représenter des matériaux organiques extrêmement divers : tourbe fibreuse, partiellement humifiée ou amorphe, tourbe très humide et compressible des dépôts de surface ou tourbe décomposée et déjà compacte des couches profondes recouvertes par d'autres sols quaternaires plus récents. Ces matériaux ont en commun une déformabilité élevée, avec une part importante de déformation visqueuse, et une résistance au cisaillement faible. Par ailleurs, l'effet de certains liants sur les matières organiques est limité.

En pratique, les méthodes de construction sur les couches de sols tourbeux utilisent les techniques suivantes :

- substitution partielle ou totale pour les dépôts de surface ;
- préchargement, en essayant d'obtenir par avance une partie au moins des déformations de fluage.

Les drains verticaux permettent d'accélérer la consolidation primaire des dépôts de tourbes comme des autres sols fins, mais leur utilisation ne suffit pas à elle seule pour limiter le tassement secondaire (de fluage). Les méthodes d'amélioration qui supposent que le sol exerce une certaine pression latérale sur des colonnes ne sont pas utilisables dans les dépôts de surface. Pour les couches profondes, certains procédés d'injection pourraient toutefois être employés.

#### 3.2 Loess

Des couches de loess de plusieurs dizaines de mètres existent dans certaines zones arides du monde. En cas d'humidification, qui se produit presque inévitablement lorsque l'on entreprend de mettre en valeur ces territoires, ces couches de loess peuvent s'affaisser soudainement de près de 10 % de leur épaisseur si des travaux d'amélioration ne sont pas exécutés en temps utile. Les méthodes de traitement des sols loessiques affaissables sont variées :

- compactage des dépôts affaissables par pilonnage en surface ;
- compactage en profondeur à l'explosif ou par battage ;
- traitement thermique ;
- traitement chimique (injection de silicates) ;
- humidification préalable.

Toutes ces techniques sont décrites en détail dans la référence [14].

Lorsque les loess ont été humidifiés, ce qui est le cas normal dans les pays d'Europe occidentale, ils se comportent comme des sols fins classiques. On peut leur appliquer toutes les méthodes décrites au paragraphe 2.

#### 3.3 Déchets industriels et urbains

Les décharges sauvages ou contrôlées de déchets urbains ou industriels posent des problèmes spécifiques lorsqu'on est amené à les traverser ou à les aménager. Ces dépôts se singularisent par une variabilité élevée des matériaux qui les constituent, la présence d'objets de dimensions variées qui perturbent les reconnaissances par sondage, l'existence de matériaux putrescibles en cours de décomposition, avec émission de gaz, la réactivité chimique de certains de leurs constituants, etc. Dans ces conditions, les méthodes de traitement utilisées en pratique restent simples :

- préchargement ;
- substitution totale ou partielle ;
- pilonnage.

Ces méthodes de traitement sont décrites dans les références [15] [18].

## Références bibliographiques

- [1] QUEYROI (D.), CHAPUT (D.) et PILOT (G.). – *Amélioration des sols de fondation. Choix des méthodes d'exécution*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Note d'Information Technique (F), 55 pages (1985).
- [2] PILOT (G.). – *Méthodes d'amélioration des propriétés géotechniques des argiles molles*. Bull. Liaison Laboratoires Ponts et Chaussées (F), n° Spécial VI F, p. 138-79 (1977).
- [3] MAGNAN (J.-P.). – *Théorie et pratique des drains verticaux*. 335 p., Paris, Technique et Documentation-Lavoisier (1983).
- [4] BOUTITIE (J.) et MEYER (J.). – *Traitement des terrains. dans : La pratique des sols et fondations*. Sous la direction de (G.) FILLIAT, Paris, Éditions du Moniteur, chapitre 17, p. 734-85 (1981).
- [5] BELL (F.-G.). – *Méthodes de traitement des sols instables*. Traduit de l'anglais, Paris, Eyrolles (1978).
- [6] SCHLOSSER (F.) et JURAN (I.). – *Paramètres de conception pour sols artificiellement améliorés*. Comptes rendus, 7<sup>e</sup> Congrès Européen de Mécanique des sols et des Travaux de fondations, Brighton, vol. 5, p. 227-52 (1979).
- [7] MAGNAN (J.-P.) et DEROY (J.-M.). – *Analyse graphique des tassements observés sous les ouvrages*. Bull. Liaison Laboratoires Ponts et Chaussées, (F), n° 109, p. 45-52 (1980).
- [8] SOYEZ (B.). – *Méthodes de dimensionnement des colonnes ballastées*. Bull. Liaison Laboratoires Ponts et Chaussées, (F), n° 135, p. 35-52 (1985).
- [9] LEROUÉIL (S.), MAGNAN (J.-P.) et TAVENAS (F.). – *Remblais sur argiles molles*. 342 p., Paris, Technique et Documentation-Lavoisier (1985).
- [10] MAGNAN (J.-P.). – *Méthodes pratiques pour la résolution des problèmes posés par les drains verticaux*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Note technique de la Division de géotechnique – Mécanique des sols 1, Paris, 30 p., mai 1983.
- [11] *Remblais et fondations sur sols compressibles*. Sous la direction de J.-P. MAGNAN, 253 p, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (1984).
- [12] *Renforcement en place des sols et des roches*. Comptes Rendus du Colloque International organisé à Paris du 9 au 11 oct. 1984, 382 p, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [13] MAGNAN (J.-P.). – *Prévision et comportement des remblais. Tassements et amélioration. État des connaissances*. Rapport général de la Séance 2A du Symposium International sur la Géotechnique des sols mous, Mexico, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, août 1987.
- [14] ABELEV (Yu.M.) et ABELEV (M.Yu.). – *Bases de l'élaboration des projets et de la construction sur les sols laessiques affaissables*. Traduit du russe par J.-P. MAGNAN. 287 p., Paris, Technique et Documentation-Lavoisier (1986).
- [15] CARTIER (G.). – *Construction sur zones de décharges*. Revue Française de Géotechnique, n° 17, p. 27-36, nov. 1981.
- [16] *Méthodes de traitement des sols mous*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, Rapport des Laboratoires, Série GT (1989).
- [17] BESANÇON (G.), IORO (J.-P.) et SOYEZ (B.). – *Analyse des paramètres de calcul intervenant dans le dimensionnement des colonnes ballastées*. Comptes rendus, Colloque International sur le Renforcement en place des sols et des roches, Paris, Presses École Nationale Ponts et Chaussées, p. 119-26, oct. 1984.
- [18] *Environnement et géotechnique*. Sous-thème I.4 *Construction sur zones de décharges (ordures ménagères, déchets industriels, etc.)*. Communications présentées aux 2<sup>e</sup> Journées Nationales Géotechniques, Nantes, mars 1981. Revue Française de Géotechnique, n° 14 bis, p. 85-105 (1981).
- [19] CARTIER (G.), WASCHKOWSKI (E.), POITOUT (M.-J.) et DUNOYER (H.). – *Expérimentation d'une technique innovante de stabilisation de remblais instables par colonnes de sol traité en place*. Bull. Liaison Laboratoires Ponts et Chaussées (F), n° 144, p. 5-18 (1986).
- [20] BLONDEAU (F.), SCHLOSSER (F.) et TRAN VO NHIEM (J.). – *Application des éléments finis au renforcement d'une faille de grande largeur par micropieux, sous un radier de table de groupe de centrale nucléaire ; dans La méthode des éléments finis dans les projets de géotechnique*. Paris, Presses École Nationale Ponts et Chaussées, p. 195-202 (1987).
- [21] COMBARIEU (O.). – *Amélioration des sols par inclusions rigides verticales. Application à l'édification de remblais sur sols médiocres*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Rapport des Laboratoires (F), Série GT, n° 26, 43 p.
- [22] DTU 13.2 *Fondations profondes*. Cahier des charges de 6.78, additif et commentaires, Cahier des clauses spéciales de 6.78 et commentaires, CSTB.