

# Assises des vallées compressibles

## Choix des méthodes de consolidation

par Pierre ROSSI

*Docteur en géologie. Responsable géotechnique  
de l'unité « Grands Travaux de Terrassement (Razel) »*

Ludovic GAVOIS

*Directeur du service géotechnique (GTM Terrassement)*

et Guy RAOUL

*Ingénieur de l'École spéciale des travaux publics,  
Ancien directeur de GTM Construction, coordinateur de ce dossier*

1.	Dispositions de consolidation.....	C 5 364 - 2
1.1	Facteurs intervenants .....	— 2
1.2	Différentes techniques.....	— 2
1.3	Choix des méthodes de consolidation.....	— 2
1.4	Description des dispositions de consolidation les plus fréquentes .....	— 2
1.4.1	Construction du remblai par étapes.....	— 2
1.4.2	Drainage vertical des sols d'assise.....	— 6
1.4.3	Colonnes ballastées.....	— 8
2.	Instrumentation.....	— 12
2.1	Mesure de la pression interstitielle.....	— 12
2.2	Mesure des déplacements verticaux (tassements).....	— 13
2.3	Mesure des déplacements horizontaux .....	— 13
2.4	Description d'instrumentation.....	— 13
2.4.1	Tassomètre LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées).....	— 14
2.4.2	Tassomètre magnétique.....	— 14
2.4.3	Profilomètre hydrostatique .....	— 15
	Références bibliographiques .....	— 15

**D**ans le dossier [C 5 363], nous avons présenté de façon synthétique les principaux phénomènes rencontrés dans le franchissement des vallées compressibles, la nature des désordres potentiels qu'ils peuvent engendrer et les conséquences sur les ouvrages qu'il s'agira de prévenir, ainsi que les principales familles de sols à risques. Nous avons décrit les opérations de reconnaissances et les essais à envisager et qu'il convient de mener pour la détermination des dispositions constructives.

Le présent dossier complète notre exposé sur les **assises de remblais dans les vallées compressibles**. Il aborde les dispositions de consolidation des sols proprement dites et l'instrumentation nécessaire au suivi et à la vérification de la consolidation.

Tout comme pour le dossier [C 5 363], cette présentation s'appuie sur les éléments d'une approche concrète spécifique, telle qu'elle est mise en œuvre dans le domaine des terrassements, en particulier dans le choix des méthodes de consolidation.

# 1. Dispositions de consolidation

Pour des informations complémentaires, le lecteur pourra se reporter aux références [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8].

## 1.1 Facteurs intervenants

L'édification de remblais sur sols compressibles fait intervenir plusieurs facteurs qui sont liés :

- à la nature de l'ouvrage (routes, voies ferroviaires, bâtiments, plates-formes industrielles, etc.) ;
- aux natures des sols (vases, tourbes, argiles molles, etc.) ;
- aux conditions spécifiques de l'environnement (ouvrages existants ou à réaliser, entreprises, etc.).

## 1.2 Différentes techniques

Les  **principales solutions techniques** que l'on peut retenir sont classées essentiellement dans **deux groupes** listés ci-dessous, sans entrer dans le détail des différentes méthodologies d'exécution, mis à part pour certaines d'entre elles (les plus fréquemment utilisées) qui sont décrites au paragraphe 1.4.

### ■ Premier groupe

Il concerne les solutions comportant les dispositions constructives directement liées à la construction du remblai lui-même :

- substitution des sols d'assise ;
- construction du remblai par étape (§ 1.4.1) ;
- banquettes de stabilité ;
- renforcement du remblai par nappes de géotextile ;
- remblais allégés ;
- compactage dynamique.

### ■ Deuxième groupe

Ce groupe, dans lequel nous avons distingué quatre classes, intéresse des solutions (souvent associées à certains processus du premier groupe) qui font appel aux techniques d'amélioration du sol compressible et d'accélération de la consolidation. Il faut dans ce cas faire appel à des entreprises spécialisées pour réaliser les travaux décrits.

#### ● Classe 1 (solution par drainage vertical) :

- drainage vertical des sols d'assise avec ou sans surcharge temporaire (§ 1.4.2) ;
- colonnes ballastées (§ 1.4.3) ;
- plots ballastés pilonnés ;
- picots de sable.

#### ● Classe 2 (solution par système d'inclusion) :

- colonnes de sols traités à la chaux ;
- pieux, inclusions rigides ;
- compactage par injections solides ;
- vibrocompaction.

#### ● Classe 3 (solution par système d'injection de coulis ou mortier mélangé avec le sol en place) :

- **Jet Grouping** : méthode de renforcement des couches compressibles par la mise en place de colonnes de béton de sol en injectant sous très haute pression des coulis de ciment ;
- **Colmix** : méthode de consolidation et de stabilisation des sols par la confection de colonnes de matériaux traitées *in situ* par injection de liants (ciment ou chaux), l'homogénéisation étant réalisée à l'aide d'une tarière.

#### ● Classe 4 (solution particulière) :

- consolidation atmosphérique sous membrane peu employée.

À noter que les solutions de la classe 1 ont généralement un moindre coût et sont les plus usitées. Celles de la classe 2 peuvent être utilisées en cas de contraintes particulières, notamment de délais. L'emploi des procédés des classes 3 et 4 reste exceptionnel.

## 1.3 Choix des méthodes de consolidation

Les domaines d'application des dispositions de consolidation sont synthétisés dans les figures 1, 2 et 3.

La figure 1 permet d'appréhender la relation entre la nature des sols (notamment la taille des grains) et les méthodes de consolidations préconisées.

La figure 2 fournit les éléments d'une approche concrète pouvant orienter le choix des méthodes de consolidation les plus appropriées, par rapport aux tassements résiduels attendus et par rapport aux différentes catégories de sols rencontrées.

La figure 3 présente une comparaison qualitative des différentes méthodes de consolidation sur la base de critères d'exécution en corrélation avec le niveau technologique, les délais d'exécution et d'action, les effets de l'environnement, la dépense d'énergie et le coût.

## 1.4 Description des dispositions de consolidation les plus fréquentes

Les schémas et les photographies figurant dans ce paragraphe proviennent de différents documents, notamment :

- différentes revues du LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ; <http://www.lcpc.fr>), plus particulièrement les Bulletins de liaison ;
- les documents techniques et les références d'entreprises spécialisées comme MENARD-SOLTRAITEMENT (<http://www.menard-soltraitement.com>), KELLER (<http://www.keller-france.com>).

### 1.4.1 Construction du remblai par étapes

#### ■ Domaine d'application

Cette technique des plus courantes permet de préserver la stabilité du sol support, c'est-à-dire d'éviter sa rupture sous le poids des remblais. Elle est adaptée aux sols argileux très mous quand le projet définitif est fixé très longtemps avant le début de l'exploitation.

Pour gagner du temps, dans le cas de couches compressibles épaisses qui consolideraient très lentement, on associe à cette méthode des drains verticaux (§ 1.4.2).

#### ■ Dimensionnement

Pour consolider le sol et améliorer ses caractéristiques, il est impératif de vérifier la stabilité au poinçonnement et en rupture circulaire (figure 4).

La hauteur de remblai de chacune des phases est adaptée aux cohésions initiales mesurées lors de la campagne d'essai de façon à avoir un coefficient de sécurité à la rupture supérieur à 1,3. Selon les cas, on est amené à préconiser :

- la pose de drains verticaux ;
- l'édification de banquettes latérales ;
- la réalisation d'une purge partielle ou totale.

Ces techniques, bien connues des maîtres d'œuvre et des bureaux d'études conseils, sont systématiquement envisagées. Dans la majorité des cas, les prévisions d'études sont proches des réalités du chantier.



Figure 1 – Domaine d'application des méthodes en fonction de la taille des grains du sol

### Mise en œuvre

Prenons le cas de la réalisation d'un remblai de 6 mètres de haut en trois phases de 2 mètres chacune (figure 5). Des périodes d'attente (jusqu'à plusieurs mois) séparent deux montées successives de remblai. Pendant une période d'attente donnée, le sol support consolide et gagne de la cohésion. Il peut alors supporter le poids d'une nouvelle couche de remblai sans rompre.

### Contrôle qualité

Il comprend :

- la mesure du tassement du sol support (piges, plaques, boules) ;
- la mesure de la pression interstitielle ;
- éventuellement, les mesures de déformation latérale en pied de remblai par inclinomètre ;
- une interprétation des différentes mesures par un ingénieur géotechnicien pour calculer les gains de cohésion du sol support et adapter le planning de montée de remblais.

### Instrumentation

Cette technique de consolidation nécessite l'utilisation de tasseurs, d'inclinomètres et de piézomètres.

### Avantages et inconvénients

Le tableau 1 présente une synthèse des avantages et inconvénients des dispositions de consolidations les plus fréquentes.

Cette technique seule est bien adaptée à un sol support très mou, mais de faible épaisseur, cela par simple adaptation du planning de travaux. Elle peut être mise en œuvre par une entreprise générale.

Le coût financier de ce procédé est très minime, mais elle nécessite des délais importants.

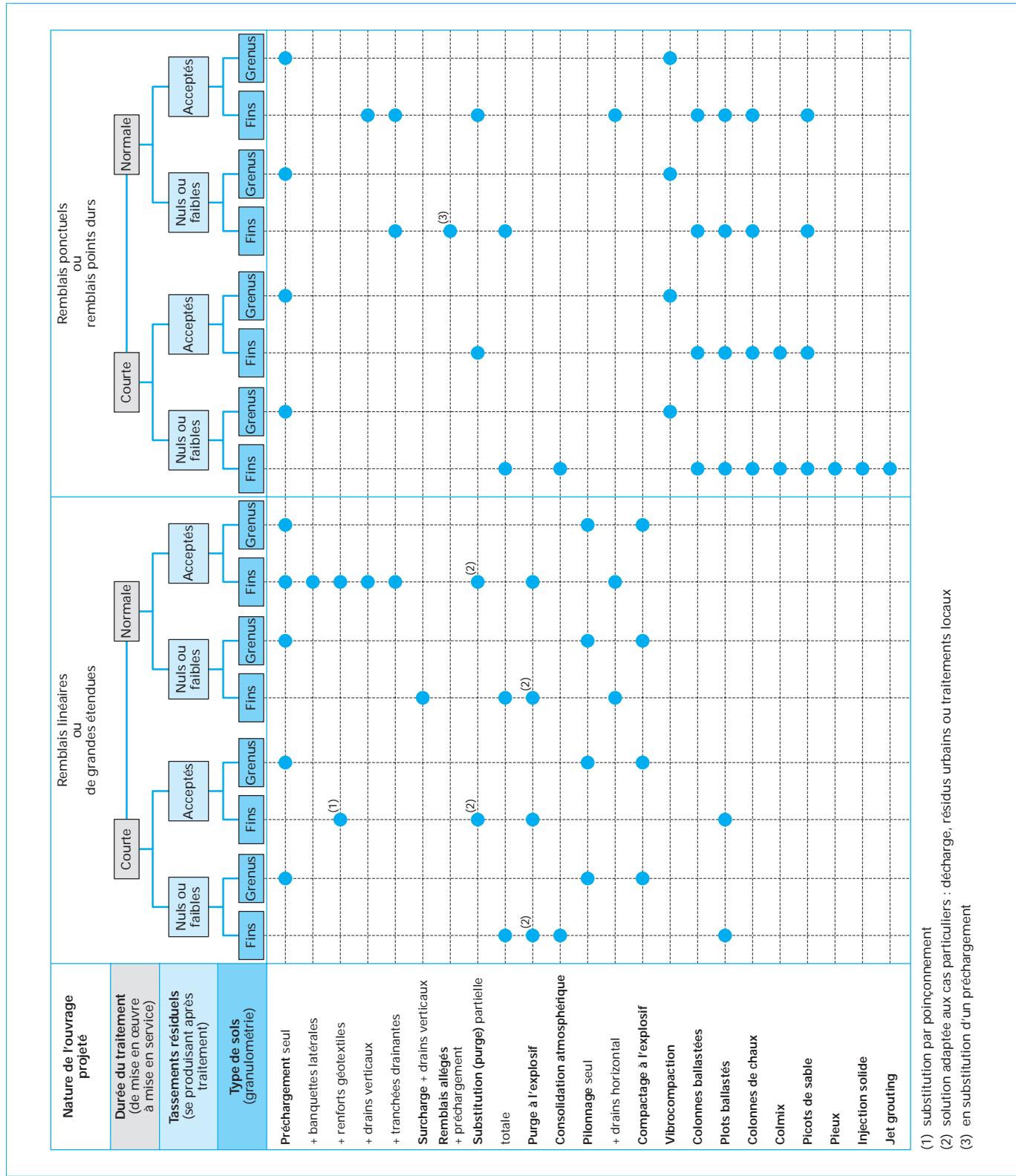


Figure 2 – Détermination des méthodes de traitement

Toute reproduction sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie est strictement interdite. – © Editions T.I.

	Entreprise générale	Quelques jours	Immédiat	Faible	Faible	Faible
	Équipement spécial	Une ou deux semaines	Quelques semaines	À surveiller	Moyenne	Moyen
	Entreprise spécialisée	Un mois et plus	Plusieurs mois	Néfaste	Forte	Fort
Méthode	Niveau technologique	Délai		Effet sur l'environnement	Dépense énergétique	Coût relatif
		d'exécution	d'action			
Préchargement seul	●	● → ○	● → ○	●	● → ○	●
+ banquettes latérales	●	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
+ renforts géotextiles	●	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
+ drains verticaux	●	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
+ tranchées drainantes	● → ○	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
Surcharge + drains verticaux	●	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
Remblais allégés + préchargement	●	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
Substitution (purge) partielle	● → ○	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
totale	● → ○	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
Purge à l'explosif	○	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
Consolidation atmosphérique	○	● → ○	● → ○	●	○	○
Pilonnage seul	●	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
+ drains horizontal	●	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
Compactage à l'explosif	○	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
Vibrocompaction	○	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
Colonnes ballastées	○	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
Plots ballastés	○	● → ○	● → ○	●	● → ○	● → ○
Colonnes de chaux	○	● → ○	● → ○	●	● → ○	○
Colmix	○	● → ○	● → ○	●	● → ○	○
Picots de sable	○	● → ○	● → ○	●	● → ○	○
Pieux	○	● → ○	● → ○	●	● → ○	○
Jet Grouting	○	● → ○	● → ○	●	● → ○	○

Figure 3 – Comparaison relative des méthodes de traitement

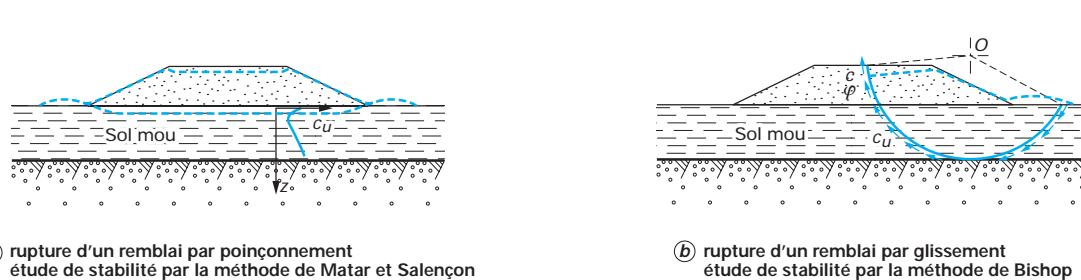


Figure 4 – Schémas de rupture d'un remblai

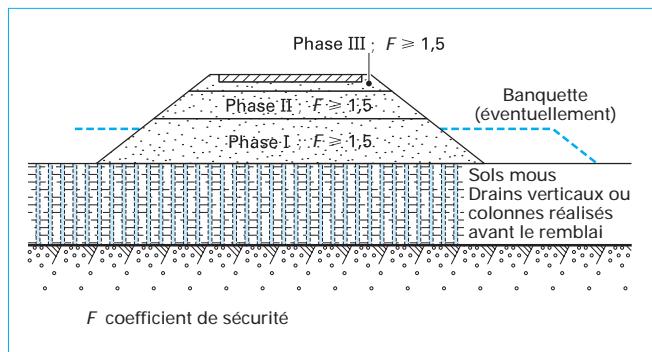


Figure 5 – Principe de la construction d'un remblai par phases

Tableau 1 – Comparaison des avantages et inconvénients des dispositions de consolidations les plus fréquentes

Critères	Faible	Moyen	Important
Coût	○	●	●
Délai		● ●	○
Technologie	○	● ●	

○ Construction du remblai par étapes  
 ● Drainage vertical  
 ● Colonnes ballastées

#### 1.4.2 Drainage vertical des sols d'assise

##### ■ Domaine d'application

L'application de ce procédé concerne, généralement, les couches d'argiles ou de limons compressibles de 3 à 50 mètres d'épaisseur.

Ce procédé est souvent couplé avec des surcharges provisoires pour anticiper les tassements ou avec de la consolidation atmosphérique pour améliorer la stabilité. Il permet l'accélération des tassements et de la consolidation des sols fins saturés à faible perméabilité (figure 6).

La mise en place de drains verticaux dans une formation organique, où les surpressions interstitielles se dissipent rapidement pendant la consolidation primaire, est rarement préconisée.

##### ■ Dimensionnement

###### ● Consolidation de sol, amélioration des caractéristiques du sol

Les colonnes de sable de 20 à 50 cm de diamètre sont supplantées à l'efficacité égale par les drains préfabriqués plastiques (polyéthylène, PVC, etc.), beaucoup plus économiques. Il existe deux types très usuels et quasi équivalents :

- les drains rond de 5 cm de diamètre ;
- les drains plats de 10 cm de large et de quelques millimètres d'épaisseur.

Les drains sont, en général, enrobés d'une chaussette géotextile. Suivant la perméabilité du sol compressible et le planning de l'opération, les densités de drains requises sont généralement de l'ordre de un drain par 1 à 5 m<sup>2</sup> de surface efficace. Le dimensionnement est à effectuer par un ingénieur géotechnicien à partir de la théorie de la consolidation.

###### ● Principe physique mis en jeu :

— sans drains verticaux : la figure 8 montre le sens d'écoulement des eaux dans l'assise compressible lorsqu'elle est chargée. La phase de consolidation peut durer jusqu'à 50 ans;

— avec drains verticaux : le temps de consolidation est proportionnel au carré de la longueur de drainage ; la réduction de la distance à parcourir par l'eau excédentaire en mettant en place des drains verticaux constitue une technique d'accélération de la consolidation (figures 9 et 10). La perméabilité horizontale des sols compressibles est très souvent nettement supérieure à la perméabilité verticale (processus de sédimentation) : cette situation milite également en faveur des drains verticaux.

Pour les sols compressibles dont l'épaisseur n'excède pas 5 mètres, une technique consiste à réaliser des tranchées drainantes.

##### ■ Mise en œuvre

Les outillages de mise en place des drains mèche à lame plastique comportent généralement un mandrin creux de section appropriée au travers duquel coulisse le drain muni à sa base d'un sabot d'arrêt métallique.

Le mandrin est foncé dans le sol par simple pression, par lancement, par battage ou par vibration (figure 11).

La cadence de mise en place peut atteindre 2 500 mètres de drain par jour.

La description d'un cycle de mise en œuvre de drainage vertical est présentée sur la figure 12.

La figure 8 illustre l'efficacité d'un drain vertical pour exuler l'eau.

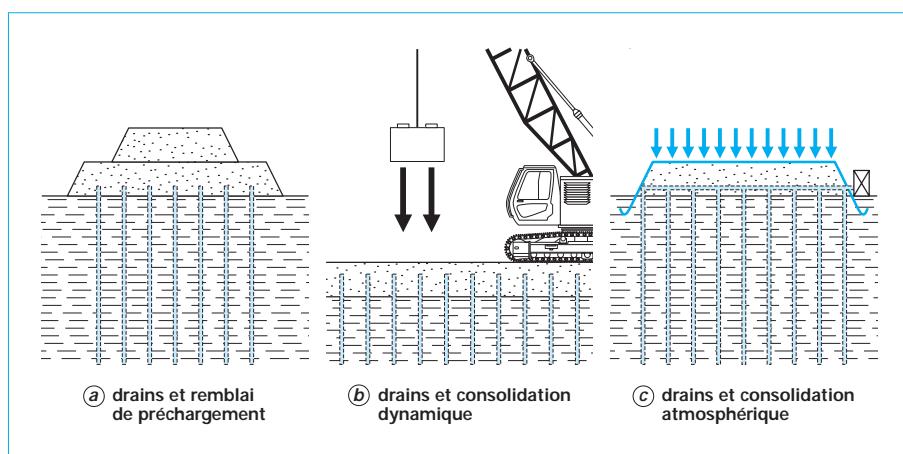


Figure 6 – Principe du drainage vertical

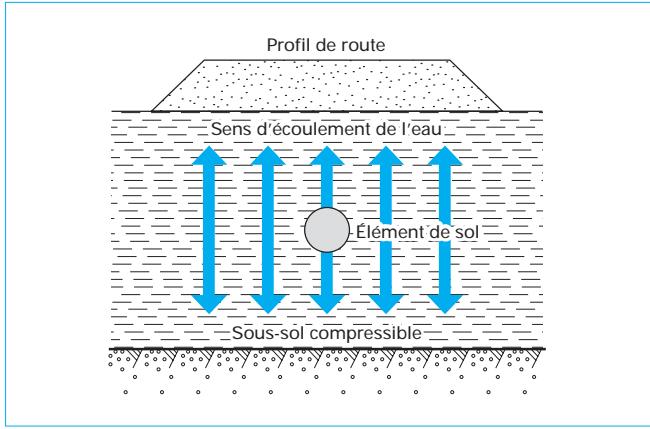


Figure 7 – Schéma de principe d'écoulement des eaux sous pression, dans un massif sans drain verticaux, durant la phase de consolidation qui peut durer jusqu'à 50 ans

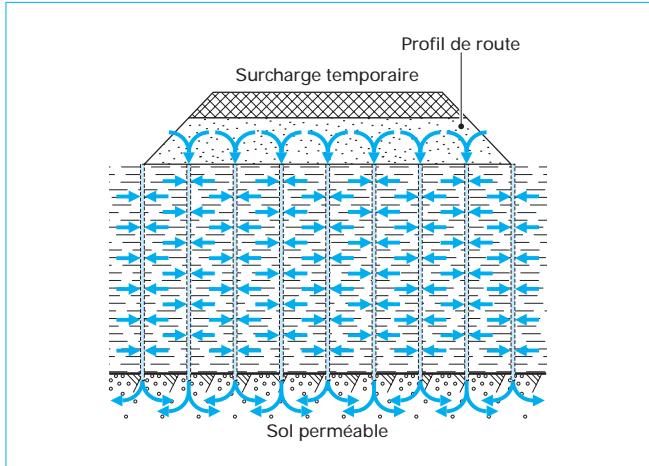


Figure 9 – Réseau d'écoulement de l'eau sous pression dans un massif drainé

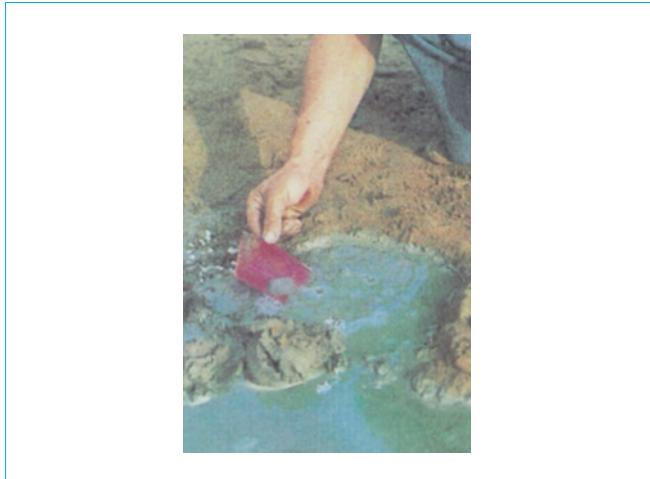


Figure 8 – Drain Desol au moment de sa mise en service, l'eau jaillit à la surface

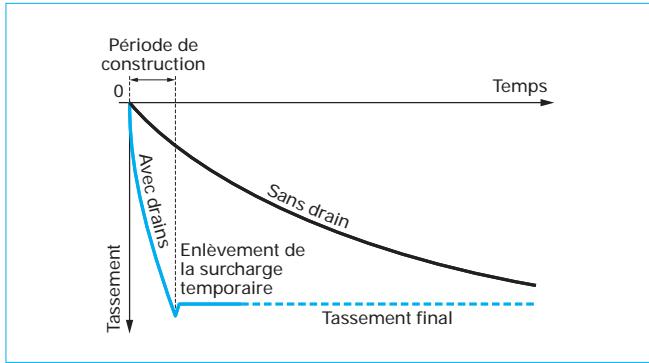


Figure 10 – Visualisation de l'accélération de consolidation apportée par le drainage vertical

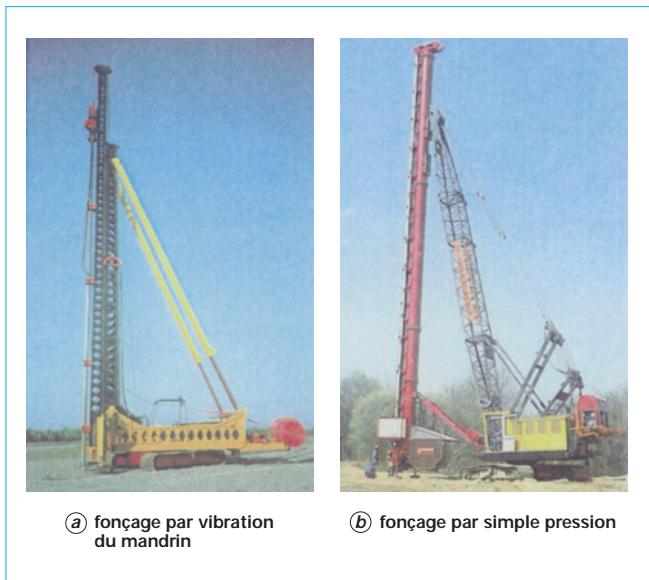


Figure 11 – Fonçage



**(a) recharge du sol sur une épaisseur de 0,5 à 1 m, avec des matériaux filtrants**  
Plate-forme de travail pendant l'exécution, non polluée par les travaux, cette recharge joue le rôle de drain de surface pour évacuer l'eau débouchant des drains



**(b) mise en batterie d'un engin porteur et d'un matériel de fonçage**  
Ce dernier comprend un mandrin creux à l'intérieur duquel le drain descend



**(c) mise en place d'un rouleau de drain**



**(d) amorce de la circulation à l'intérieur du mandrin**  
Fixation d'un sabot perdu coinçant le drain à la base



**(e) fonçage du drain par vibration ou simple poussée du mandrin jusqu'à la profondeur désirée**



**(f) relevage du mandrin et coupe de la bande de drain à 0,15 cm environ au-dessus du niveau de la plate-forme de travail**

Figure 12 – Description d'un cycle de mise en œuvre de drainage vertical

#### ■ Avantages et inconvénients

Le tableau 1 présente une synthèse des avantages et inconvénients des dispositions les plus fréquentes.

Cette technique n'occasionne aucune nuisance à l'environnement et sa mise en œuvre est rapide et propre. La consolidation reste efficace lors du fluege du massif.

Il faut cependant accepter la contrainte de phasage entre :  
— la réalisation de la couche drainante par l'entreprise titulaire du marché ;  
— la mise en place des drains par l'entreprise spécialisée ;  
— la montée du remblai.

Par ailleurs, l'erreur sur la prévision de vitesse de tassement peut atteindre un rapport de 1 à 10. Cette situation provient de l'imperfection des modèles rhéologiques et aussi à la difficulté du choix de certains paramètres lors de l'élaboration du projet.

Dans un sol avec beaucoup de fines, la durée de vie d'un drain plat n'excède pas 6 mois, au-delà de cette période son efficacité est

réduite par colmatage du filtre géotextile. Une solution consiste à utiliser des drains plastiques tubulaires réputés robustes et pérennes.

Pour ne pas réduire la cadence de pose, il faut vérifier les paramètres de la couche drainante qui ne doit être ni trop épaisse ni trop compacte. Faute de quoi, chaque pose de drain nécessitera la réalisation d'un avant-trou.

La mise en œuvre de ce procédé doit être réalisée par une entreprise spécialisée : MENARD-SOLTRAITEMENT (<http://www.menard-soltraitemen.com>), SOLETANCHE-BACHY (<http://www.soletanche-bachy.com>), KELLER (<http://www.keller-france.com>), GTS (Géotechnique et Travaux Spéciaux, <http://www.gts.fr>).

#### 1.4.3 Colonnes ballastées

##### ■ Domaine d'application

Ces colonnes améliorent la stabilité du remblai en renforçant les sols fins compressibles tout en réduisant leurs tassements sous le poids du remblai (figure 13). Elles permettent également de frettler le sol contre les risques du fluege.

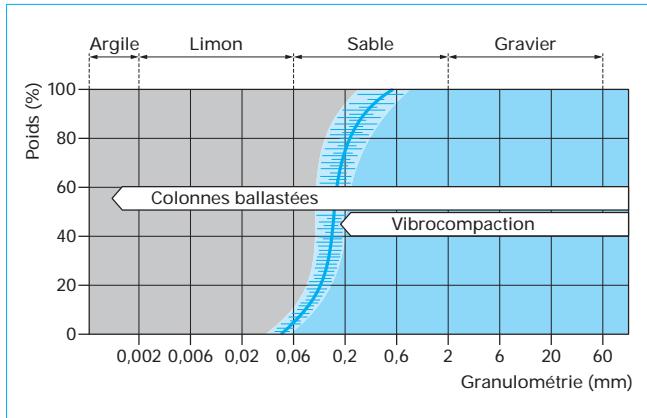


Figure 13 – Champ d'application du procédé de vibration profonde des sols

Attention : ne s'applique pas dans le cas de couches épaisses de tourbes, les risques de rupture par cisaillement étant alors trop importants.

Dans le cas d'**inclusion « molles »**, ces colonnes améliorent les caractéristiques du sol et reportent les contraintes sur la couche dure.

#### ■ Dimensionnement

Le diamètre des colonnes varie de 60 à 120 cm.

**Le dimensionnement des colonnes ballastées prend en compte trois modes de ruptures :**

- par expansion latérale : hauteur  $\gg$  diamètre ;
- par cisaillement généralisé : sols peu cohérents, tourbe, hauteurs importantes ;
- par poinçonnement, colonne flottante : substratum non atteint, portance du sol insuffisante.

La contrainte admissible sur une section théorique de colonne doit être inférieure à 2 fois l'étreinte latérale du sol encaissant et à 0,8 MPa (D.T.U. 13.2). La force portante d'une colonne est généralement comprise entre 200 et 300 kN.

Attention de ne pas perdre l'effet de groupe par un maillage trop large.

#### ■ Mise en œuvre

La mise en œuvre des colonnes ballastées peut être réalisée :

- par vibroflottation, avec aiguille pleine (figure 15) ;

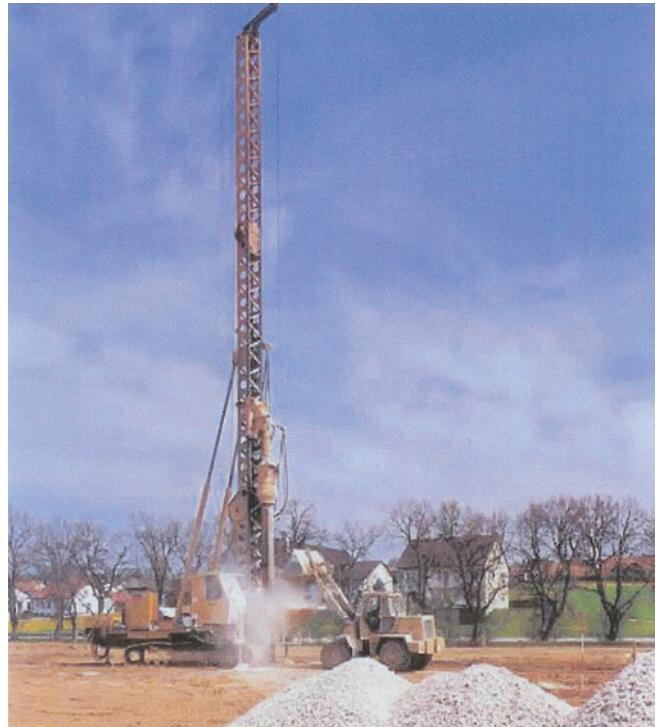


Figure 14 – Chantier de plate-forme

- par tube vibro-foncé + trépan (figure 16) ;
- par vibreur à sas.

Les caractéristiques de mise en œuvre sont données dans le tableau 2.

La description d'un cycle de mise en œuvre de colonnes ballastées est présentée sur les figures 17 et 18.

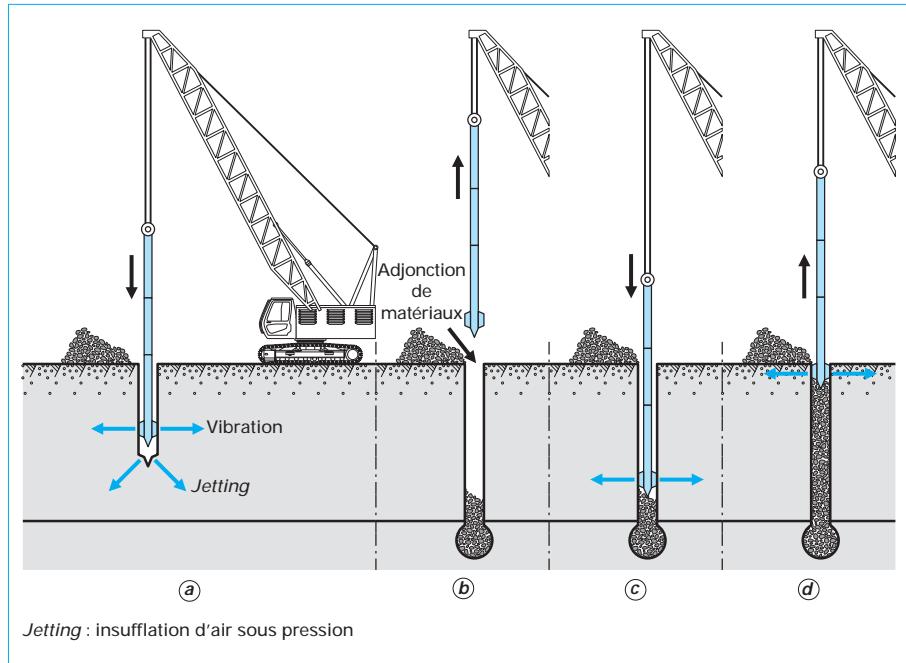
#### ■ Contrôle qualité

Il comprend les étapes suivantes :

- contrôle des paramètres de mise en œuvre :
  - volume de ballast injecté,
  - énergie de vibration,
  - profondeur maximale ;
- contrôle des caractéristiques des colonnes au pénétromètre (éventuellement entre colonnes) ;
- essai de chargement des colonnes.

Tableau 2 – Contraintes induites par le matériel nécessaire à la réalisation des colonnes ballastées

	Dénomination	Contraintes induites			Matériel
		Électricité	Eau	Surface	
Matériel	Aiguille vibrante à sas	<input type="radio"/>			Groupe électrogène, compresseur, chargeur
	Vibreur hydraulique ou électrique	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		
	Tube vibro-foncé + trépan	<input type="radio"/>			
Engin porteur	Pelles sur chenilles, pelle mécanique				Plate-forme carrossable
Cantonnement	Atelier, bureau, vestiaire	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	80 m <sup>2</sup>	
Matériaux	Ballast 20/40				



Jetting : insufflation d'air sous pression

Figure 15 – Réalisation de colonnes par vibroflottation

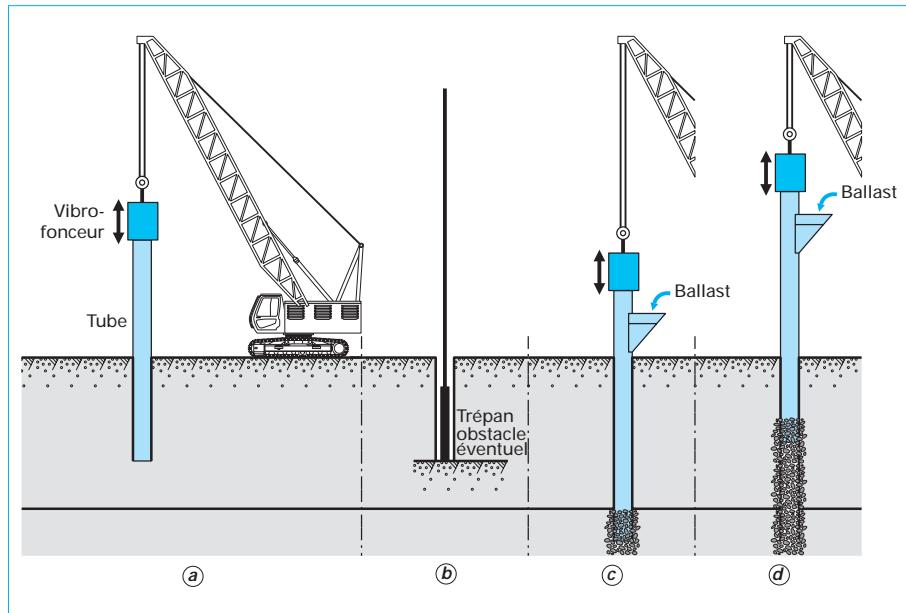


Figure 16 – Réalisation de colonnes par tube vibré

### ■ Instrumentation

Cette technique de consolidation nécessite l'utilisation :

- de tassomètres de surface et de tassomètre de profondeur (tassements différentiels sol/colonne) ;
- de cellules de contraintes totales (report des contraintes sol → colonnes).

### ■ Avantages et inconvénients

Le tableau 1 présente une synthèse des avantages et inconvénients des dispositions les plus fréquentes.

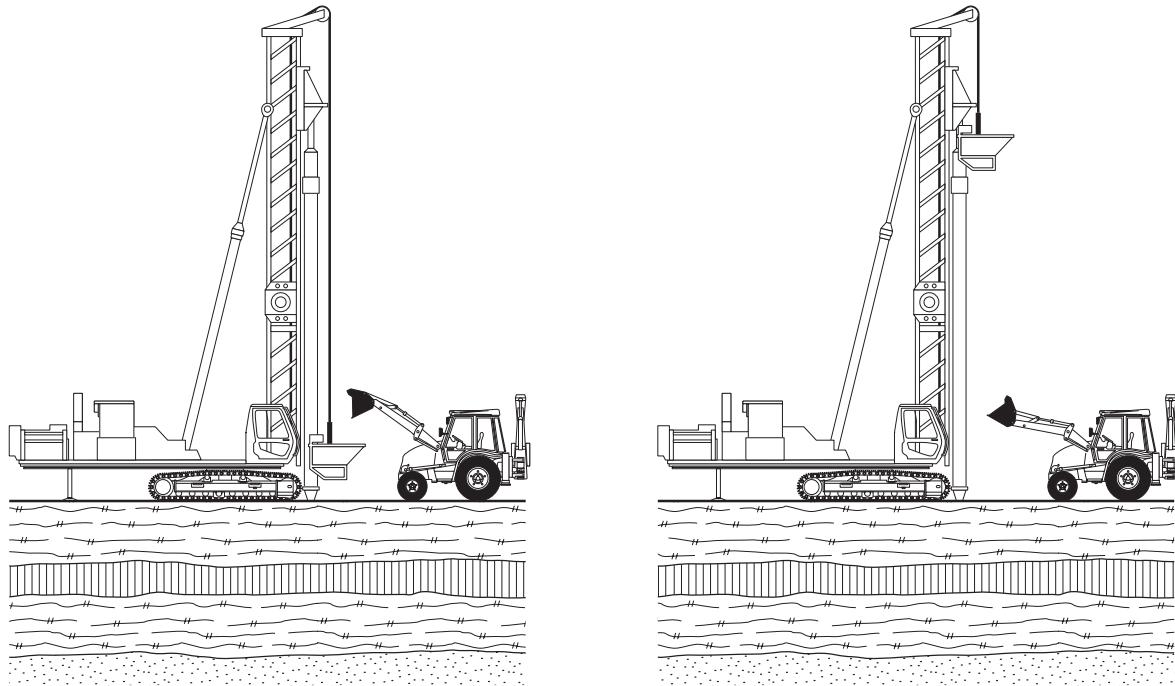
La profondeur de traitement de cette technique est couramment 15 m.

Pour un taux de ballastage  $\approx 20\%$ , les tassements sont diminués de moitié :  $T = Ti/2$  (avec  $Ti$  tassement du sol d'assise sans exécution des colonnes ballastées).

Le caractère drainant est surtout effectif pour les forts diamètres et les maillages serrés.

Il n'y a pas ou très peu de déblais à évacuer.

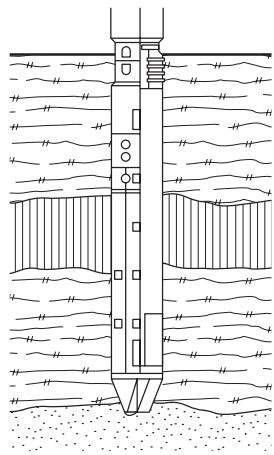
Cependant, le ballast utilisé est cher.

**a) préparation**

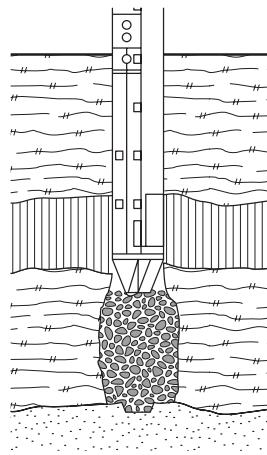
La machine est mise en station au-dessus du point de fonçage, et stabilisée sur ses vérins. Un chargeur assure l'approvisionnement en agrégat.

**b) remplissage**

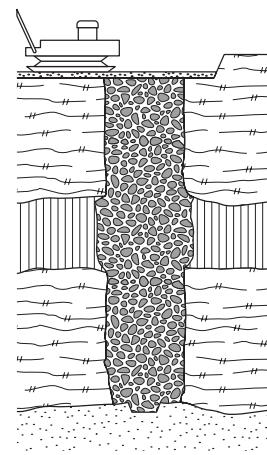
Le contenu de la benne est vidé dans le sas. Après fermeture, l'air comprimé permet de maintenir un flux continu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie.

**c) fonçage**

Le vibreur descend, en comprimant latéralement le sol, jusqu'à la profondeur prévue, grâce à l'insufflation d'air comprimé et à l'activation.

**d) compactage**

Lorsque la profondeur finale est atteinte, les matériaux d'apport sont mis en place puis bourrés latéralement dans le sol et compactés, par paliers successifs.

**e) finition**

La colonne est exécutée jusqu'au niveau prévu. Le niveau d'assise des fondations est alors réglé et compacté.

Figure 17 – Étapes d'un cycle de mise en œuvre de colonnes ballastées



Figure 18 – Visualisation des principales étapes de mise en œuvre de colonnes ballastées

Cette technique, assez onéreuse, est bien adaptée aux surfaces réduites ou aux zones de transitions entre point dur et remblai courant : culées d'ouvrages d'art par exemple.

La mise en œuvre de ce procédé doit être réalisée par une entreprise spécialisée : KELLER (<http://www.keller-france.com>), MENARD-SOLTRAITEMENT (<http://www.menard-soltraitements.com>), SOLETANCHE-BACHY (<http://www.soletanche-bachy.com>), GTS (Géotechnique et Travaux Spéciaux, <http://www.gts.fr>).

## 2. Instrumentation

Lorsque pour un projet donné, l'existence d'une zone compressible est avérée, les volumes de terrassements précisés, les essais *in situ* et en laboratoire réalisés et interprétés, les déformations appréhendées tant sur le plan de leur importance que sur celui de leur durée, alors l'instrumentation pour le suivi des déformations de l'ensemble de l'ouvrage peut et doit être programmée.

Cette instrumentation concerne le suivi de la pression interstitielle des sols d'assise ainsi que les déplacements verticaux et horizontaux.

En outre, le suivi et l'interprétation en continu des paramètres cités ci-avant permettront :

- la validation des hypothèses de l'étude ;
- d'adapter éventuellement le projet ;
- de maîtriser les quantités à mettre en œuvre ;
- de mieux assurer la gestion, l'exploitation de l'ouvrage en service et de mieux appréhender les éventuels désordres.

### 2.1 Mesure de la pression interstitielle

Au cours des dernières décennies, l'évolution des matériels de mesure a été très nette.

Les premiers instruments étaient des capteurs hydrauliques. Ils ont laissé leur place à des capteurs pneumatiques et les plus couramment utilisés aujourd'hui sont des capteurs électriques.

La mesure de la pression interstitielle peut être ponctuelle, comme multipoint, grâce à la disposition des capteurs à plusieurs niveaux de la zone molle compressible. Pour se faire, les cellules sont généralement descendues dans le terrain à l'aide de sondages destructifs ou carottés.

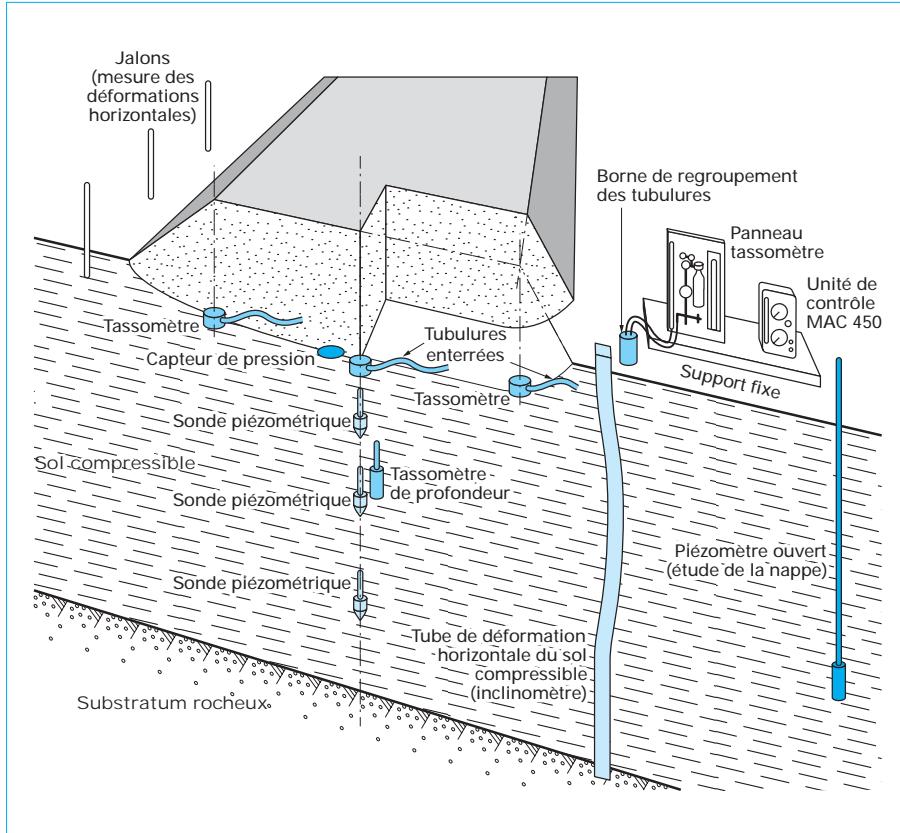


Figure 19 – Schéma d'instrumentation d'un remblai

## 2.2 Mesure des déplacements verticaux (tassements)

L'évolution des techniques a permis de passer de l'utilisation des piges ou des éléments métalliques avec embases, à celle des capteurs électriques ou magnétiques en passant par les tassomètres pneumatiques.

En outre, des mesures en continu peuvent être réalisées le long de profils calés soit sur le terrain naturel (profilomètre), soit sur un plan vertical de ce dernier (tassomètre de profondeur multipoint).

## 2.3 Mesure des déplacements horizontaux

Les déplacements horizontaux, qui ne sont pas systématiquement mesurés, peuvent être corrélés aux tassements qui intéressent l'axe du remblai et doivent être intégrés à l'analyse de la déformation globale de l'ouvrage. Les capteurs les plus utilisés et les plus fiables sont les inclinomètres.

La figure 19 illustre l'instrumentation théorique du suivi des mouvements d'un remblai susceptible de tasser.

La mesure et le bon suivi des tassements doivent répondre aux **principales règles** qui indiquent quels sont les **principaux endroits stratégiques qu'il convient de surveiller**, à savoir :

— l'interface terrain naturel – remblai, avec la mesure du tassement global à l'aide de tassomètres de surface, de piges, d'extensomètres et du repérage de certains points topographiques ;

— la masse des sols compressibles, en général sur des verticales, avec le suivi de la pression interstitielle et celui des déplacements horizontaux ;

— la couche molle compressible à étudier, avec l'établissement du profil des pressions interstitielles et des tassomètres de profondeur aux limites de la couche ;

— l'ouvrage dans son ensemble, avec le relevé des points topographiques après la fin des travaux en prolongation de l'instrumentation.

## 2.4 Description d'instrumentation

À titre d'exemples, nous présentons dans ce paragraphe les **dispositifs les plus couramment utilisés** : ceux du tassomètre type « LPC », du tassomètre magnétique et du profilomètre hydrostatique.

Les schémas et photographies figurant dans ce paragraphe proviennent de différents documents, notamment :

- différentes revues du LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ; <http://www.lcpc.fr>), plus particulièrement les Bulletins de liaison ;
- les catalogues de matériels et d'équipements de fournisseurs comme ELE (<http://www.ele.com>), CONTROLS (<http://www.controls.it>), LINDQVIST INTERNATIONAL (<http://www.controlab.fr>), CONTROLAB (<http://www.lindqvistinternational.com>)...

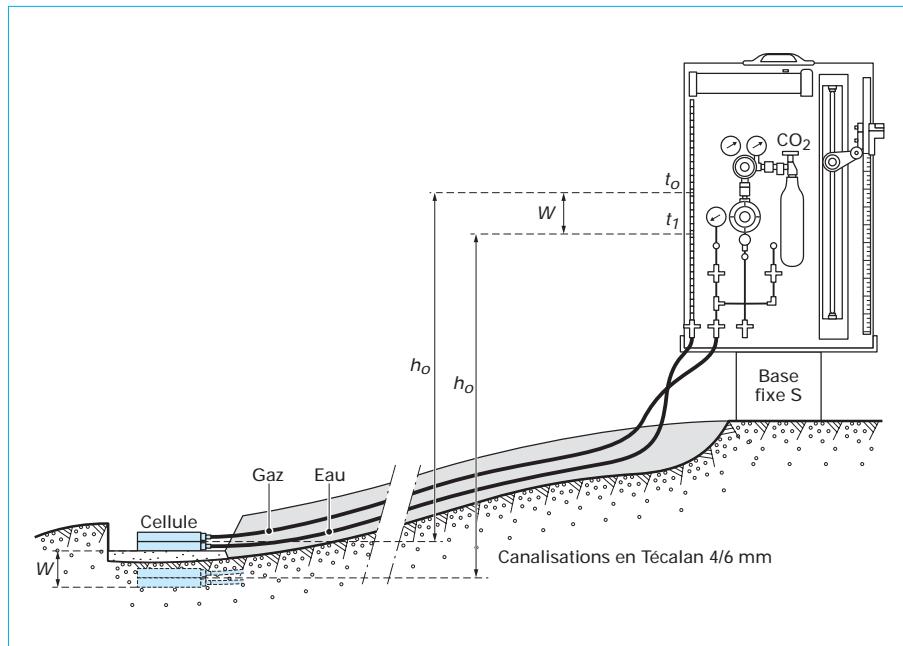


Figure 20 – Vue d'ensemble du tassomètre LPC

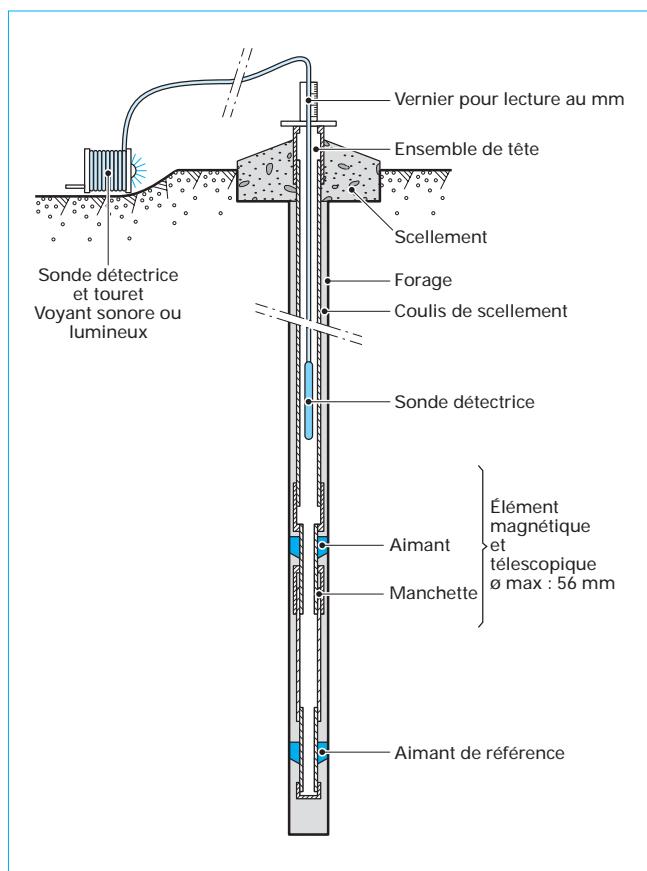


Figure 21 – Schéma de principe du tassomètre magnétique

#### 2.4.1 Tassomètre LPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées)

##### ■ But

On mesure les tassements du sol de fondation pendant et après la construction d'un remblai ou d'un ouvrage sur sol compressible.

##### ■ Principe

Une cellule de prise de niveau est placée sous l'ouvrage et suit les mouvements verticaux. Sa position en altitude par rapport à un repère fixe S, hors de la zone d'influence de l'ouvrage, est suivie à l'aide d'un tableau de mesure. La cellule de prise de niveau, à demi remplie d'eau, est reliée au tableau de mesure par deux canalisations, une servant pour le liquide, l'autre pour le gaz. Quand le sol se tasse, la cellule se déplace vers le bas et la colonne d'eau translate d'une quantité d'eau équivalente au tassement, directement lisible sur le tableau de mesure (figure 20).

#### 2.4.2 Tassomètre magnétique

##### ■ But

On mesure les déplacements horizontaux dans les sols compressibles, de plusieurs points d'un forage.

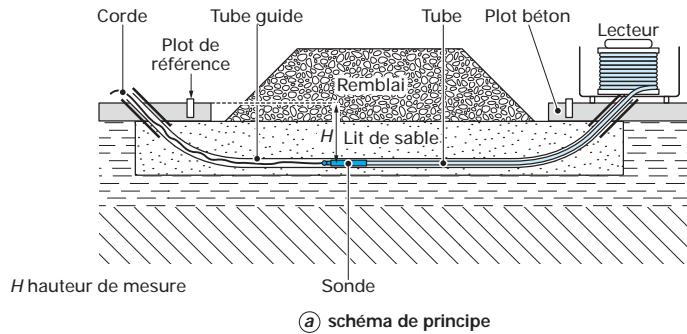
##### ■ Principe

Dans un forage, une succession de bagues magnétiques entourant un tube en PVC sont posées. Elles suivent le mouvement du sol et leur position est repérée à l'aide d'une sonde lumineuse qui réagit au passage d'un champ magnétique.

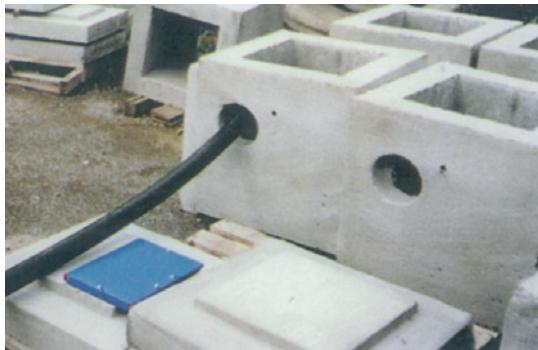
##### ■ Dispositif

L'élément magnétique comprend la bague aimantée fixée sur le tube PVC (figure 21).

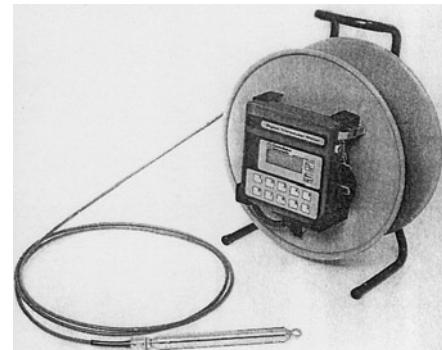
La sonde est composée d'un embout dans lequel est inclus un ILS (type de commutateur à lames) dont le contact se referme au passage d'un champ magnétique.



(a) schéma de principe



(b) entrée du tube dans la chambre de mesure



(c) vue de la sonde, de sa tubulure et du boîtier de mesure

Figure 22 – Principe et dispositif de mesure du profilomètre hydrostatique

#### ■ Mise en place

Les altitudes des différents points de mesure étant déterminées, il faut préparer toutes les longueurs intermédiaires de PVC, puis les assembler par éléments de 3 à 4 m.

Chaque élément est descendu dans le forage et relié au suivant par collage. Il reste alors à remplir d'eau et à injecter du coulis.

#### ■ Mesures

La première mesure significative peut être faite 4 à 5 jours après le forage :

- dérouler le ruban jusqu'au fond du forage ;
- faire la mesure en remontant.

La lecture se fait à chaque extinction de la lumière.

Les valeurs sont recalées par rapport à un point fixe dont les déplacements sont connus.

#### 2.4.3 Profilomètre hydrostatique

##### ■ But

On mesure des tassements verticaux sur toute la largeur de la construction en continu.

##### ■ Principe

Les altitudes de différents points sont prises à intervalles réguliers, dans un tube guide mis en place dans une tranchée remplie de sable avant la construction (figure 22).

##### ■ Dispositif

Le dispositif de mesure de ce profilomètre et sa mise en place sont présentés sur la figure 22.

### Références bibliographiques

- [1] CASSAN (M.). – *Les essais in situ en mécanique des sols* – Tome 1 *Réalisation et interprétation* – Tome 2 *Applications et méthodes de calcul*. Diffusion par les éditions Eyrolles (1978).
- [2] MAGNAN (J.P.) et MIEUSSENS (C.). – *Remblais sur sols compressibles. Instrumentation et exploitation des mesures*. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro 115, sept.-oct. 1981.
- [3] MAGNAN (J.-P.). – *Progrès récents dans l'étude des sols compressibles*. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro 116, nov.-déc. 1981.
- [4] PILOT (G.), CHAPUT (D.) et QUEROI (D.). – *Remblais routiers sur sols compressibles. – Étude et construction*. Diffusion par la Documentation française dans la rubrique « Routes et villes » pour le ministère de la Coopération et du Développement (1988).
- [5] BOURGES (F.), LEGRAND (J.), MIEUSSENS (C.I.), PEIGNAUD (M.), PILOT (G.), PUIG (J.), QUEROI (D.), VAUTRIN (J.) et sous la direction de MAGNAN (J.P.). – *Remblais et fondations sur sols compressibles*. Diffusion par les presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (édition de déc. 2002).
- [6] *Foundation engineering*, sous la direction de PILOT G. (1983).
- [7] MAGNAN (J.P.). – *Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols*. France : Presses de l'ENPC (1982).
- [8] *Guide technique : Étude et réalisation des remblais sur sols compressibles*. LCPC/SETRA, nov. 2000.