



Ministère  
de l'Équipement,  
des Transports,  
et du Logement

# ÉTUDE ET RÉALISATION DES REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES

GUIDE TECHNIQUE



LCPC



Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes

[www.GenieCivilPDF.com](http://www.GenieCivilPDF.com)

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

**Page laissée blanche intentionnellement**

# ÉTUDE ET RÉALISATION DES REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES

---

## GUIDE TECHNIQUE

Novembre 2000

---

Document édité et réalisé par :



Le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes  
46, avenue Aristide Briand – BP 100 – F-92225 BAGNEUX CEDEX  
Téléphone : 01 46 11 31 31  
Télécopie : 01 46 11 31 69  
Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>



Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
58, boulevard Lefebvre – F-75732 PARIS CEDEX 15  
Téléphone : 01 40 43 52 26 – Télécopie : 01 40 43 54 95  
Internet <http://www.lcpc.fr>

---

Ce guide « Étude et réalisation des remblais sur sols compressibles » a été rédigé par un groupe de travail constitué par des représentants du Réseau Technique du Ministère de l'Équipement, des entreprises et des bureaux d'études et sa validation technique assurée par Messieurs Jean-Pierre MAGNAN (LCPC) et Yves GUIDOUX (SETRA).

Le groupe de travail était constitué de :

M. DE SAINT AMAND : Scetauroute  
M. BESCOND : CETE Méditerranée/ LRPC d'Aix-en-Provence  
M. DUBREUCQ : LCPC  
M. ETIENNE : STC PMVN  
M. GENRE : SETRA  
M. GILOPPE : CETE Normandie-Centre/ DESGI  
M. HADJ HAMOU : Simecsol  
M. LIAUSU : Ménard Soltraitement  
M. LONDEZ : Mécasol  
M. MAGNAN : LCPC  
M. MALAVERGNE : Scetauroute  
M. PASCAL : SNCF  
M. PERRIER : CETE Normandie-Centre/ CER Rouen  
M. PEYRON : CETE Méditerranée  
M. UNG : Fondasol  
M. VIROLLET : Scetauroute

La rédaction et la mise en forme ont été assurées par Jean-Pierre MAGNAN (LCPC) et Marie Odile CAVAILLES (SETRA).

*Photos de couverture : RN 32 - Compiègne-Ribecourt - LRPC Saint-Quentin*

Ce document est propriété de l'Administration et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation du SETRA ou du LCPC.

© 2000 - SETRA et LCPC  
Dépôt légal : 4<sup>e</sup> trimestre 2000

ISBN : 2-11-091783-0  
ISSN : 1151-1516  
Prix : 150 F (22,87 €)

# Sommaire

• PRÉAMBULE .....	5
• 1. DOMAINE D'APPLICATION .....	7
• 1.1 Les sols à risques .....	9
• 1.2 Problèmes spécifiques aux remblais sur sols compressibles .....	9
• 1.3 Conséquences pour les projets .....	11
• 1.4 Particularités des études .....	12
• 1.5 Particularités des travaux .....	14
• 2. DÉTECTER ET CARACTÉRISER LES SOLS COMPRESSIBLES .....	17
• 2.1 Généralités .....	19
• 2.2 Comportements typiques des sols compressibles .....	19
• 2.3 Consistance et organisation de la reconnaissance géotechnique .....	25
• 2.4 Les remblais d'essais .....	28
• 3. CHOIX DES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION .....	29
• 3.1 Introduction .....	31
• 3.2 Présentation des techniques de construction .....	31
• 3.3 Critères influant sur le choix des techniques .....	33
• 3.4 Choix des techniques en fonction du type d'ouvrage .....	35
• Annexes 1 à 15: Techniques de construction .....	38
• 4. CONTRÔLE DU CHANTIER ET DE L'OUVRAGE FINI .....	55
• 4.1 Introduction .....	57
• 4.2 Contrôle de la construction du remblai .....	57
• 4.3 Contrôle du comportement de l'ouvrage fini .....	60
• 4.4 Matériels .....	61
• 5. ASSURANCE DE LA QUALITÉ .....	65
• 5.1 Établissement du dossier de consultation des entreprises .....	67

---

- 5.2 Préparation du chantier ..... 69
- 5.3 Déroulement du chantier ..... 70
- 5.4 Achèvement du chantier ..... 72
- 5.5 Quelques exemples de points sensibles susceptibles  
d'être classés en points d'arrêt ..... 73
  
- 6. AIDE-MÉMOIRE ..... 75
- 6.1 Particularités des remblais sur sols compressibles ..... 77
- 6.2 Recommandations pour la commande des études,  
de l'instrumentation et du suivi ..... 79
  
- 7. BIBLIOGRAPHIE ..... 83

# P réambule

Le guide « Études et réalisation des remblais sur sols compressibles » est destiné aux maîtres d'œuvre et aux responsables de bureaux d'études qui ont à concevoir un projet routier dans lequel la construction de remblais sur sols compressibles est envisagée. Les spécialistes de géotechnique trouveront par ailleurs les ouvrages spécialisés pouvant les aider à définir les solutions.

Ce guide doit fournir aux maîtres d'œuvre et à leurs projeteurs des éléments pour :

- éviter de passer à côté du problème, c'est-à-dire reconnaître le caractère compressible des sols rencontrés ;
- pouvoir juger des enjeux, c'est-à-dire estimer même sommairement les conséquences de la présence de sols compressibles sur les coûts, les délais, la difficulté de réalisation et la qualité d'un projet ;
- savoir conduire un projet, c'est-à-dire piloter les études en respectant un phasage logique, piloter les travaux en étant sensibilisé à l'importance des points d'arrêt et prévenir le maître d'ouvrage des risques encourus ;
- savoir faire appel à des experts, c'est-à-dire être conscient de la complexité des phénomènes et ne pas surestimer sa propre capacité à optimiser seul la solution.

Après avoir rappelé les comportements caractéristiques des sols compressibles sous les remblais, ce document présente les différentes techniques de reconnaissances, les domaines d'application et les critères de choix des techniques de construction des remblais, le contrôle du chantier et de l'ouvrage fini ; il propose une démarche qualité adaptée et un aide-mémoire qui rappelle au maître d'œuvre les différents points à ne pas oublier pour les études et les travaux de construction de remblais sur sols compressibles.

**Page laissée blanche intentionnellement**



Chapitre

1

Domaine  
d'application



*RN 32 - Compiègne-Ribecourt - Photo LRPC Saint-Quentin*

**Page laissée blanche intentionnellement**

## 1.1 LES SOLS À RISQUES

### 1.1.1 Types de sols

La construction de remblais peut poser des problèmes sur des types de sols variés tels que :

- les tourbes,
- les vases,
- les argiles molles,
- les limons argileux ou lâches.

Ces sols associent en général une forte déformabilité, une faible perméabilité et une résistance faible. On les appelle habituellement « sols compressibles » ou « sols mous ».

Ce guide s'applique uniquement aux sols fins et sols organiques compressibles, saturés ou quasi-saturés. D'autres sols sont déformables, comme les sables lâches, les loess ou les remblais récents mal compactés. Les problèmes que posent ces sols (sensibilité à la liquéfaction en cas de séisme, affaissement en cas d'humidification) ne sont pas traités ici.

### 1.1.2 Profondeur et épaisseur des couches compressibles

La profondeur et l'épaisseur des sols compressibles ont une grande influence sur la nature et l'ampleur des problèmes posés par la construction des remblais et sur les solutions que l'on peut envisager pour les résoudre :

- en surface, la médiocrité des sols pose en premier lieu des problèmes de stabilité, mais une solution de purge peut être envisagée ;
- plus la couche compressible est située en profondeur, plus l'influence du remblai est faible (surtout lorsqu'il est de petites dimensions) ;
- plus la couche compressible est épaisse, plus les tassements sont importants et évoluent lentement.

## 1.2

## PROBLÈMES SPÉCIFIQUES AUX REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES

La construction de remblais sur les sols compressibles pose quatre types de problèmes particuliers : de stabilité, de déformations, d'efforts « parasites » sur les ouvrages voisins et de perturbation de l'écoulement des eaux. Ces problèmes doivent être traités quelle que soit l'épaisseur du remblai.

### **1.2.1 Stabilité**

Les sols compressibles sont en général peu résistants. Lorsqu'ils sont rencontrés en surface, il peut se produire des ruptures, en général de type rotationnel « circulaire » (cylindrique), lors de l'édification du remblai. Par contre, si l'on ne modifie pas ultérieurement la charge appliquée au sol par le remblai, il n'y a pas de risque de rupture différée.

### **1.2.2 Déformations**

Les sols compressibles se déforment verticalement (tassement) et horizontalement sous les remblais. Ces déformations ne sont pas instantanées. Elles commencent pendant la construction et peuvent durer pendant des mois, voire des années ou des dizaines d'années suivant les propriétés des sols et l'épaisseur des couches.

Les tassements ne sont pas uniformes à cause de la section trapézoïdale des remblais, de leur épaisseur variable et de l'hétérogénéité des sols supports.

### **1.2.3 Efforts sur les ouvrages voisins**

Les déformations du sol sous le poids d'un remblai s'étendent au delà des limites de la zone chargée en surface. La construction d'un remblai peut pour cette raison provoquer des tassements sous des ouvrages voisins existants (voies ferrées, autres voies, voie dont le remblai constitue un élargissement, fondations superficielles de bâtiment ou d'ouvrage d'art, etc.).

Les déformations verticales et horizontales des sols compressibles peuvent d'autre part induire des efforts très importants sur les ouvrages fixes ou incapables de suivre les déplacements des sols qui les entourent (fondations profondes d'ouvrages d'art, de bâtiments ou de quais, par exemple).

Cette interaction des remblais et des ouvrages existants ou à construire peut avoir des conséquences importantes sur les conditions d'exploitation des ouvrages. Elle doit être examinée avec soin lors de l'élaboration du projet et du phasage des travaux de construction.

### **1.2.4 Écoulement des eaux**

Les sols compressibles sont souvent situés en fond de vallée. La construction d'un remblai en travers de la vallée d'un cours d'eau ou le long de cette vallée perturbe l'écoulement des eaux dans la vallée en période de crues. Les écoulements de crues peuvent éroder le pied du remblai, qui doit alors être protégé. Ils nécessitent aussi souvent de prévoir des ouvertures à travers le remblai pour laisser passer l'eau. La déformation des sols compressibles sous le poids du remblai réduit d'autre part légèrement la perméabilité de ces sols, ce qui peut influencer l'écoulement de l'eau dans la nappe.

**1.3****CONSÉQUENCES  
POUR LES PROJETS**

La présence de sols compressibles introduit des contraintes particulières dans la conduite des projets.

**1.3.1 Faisabilité de l'ouvrage**

Un remblai sur sols compressibles peut être inconstructible sans travaux complémentaires (traitement du sol compressible, renforcement du remblai) ou nécessiter une construction en plusieurs phases. Les études de stabilité revêtent pour cette raison une importance particulière et doivent être effectuées aussitôt que possible, pour déterminer la hauteur maximale qu'il est impossible de dépasser sans contraintes particulières pour le projet.

La construction des remblais sur sols compressibles ne doit pas perturber la stabilité ni les conditions d'exploitation des ouvrages voisins préexistants.

Les techniques de construction prévues dans le projet doivent tenir compte des contraintes propres au site et à l'organisation du chantier.

**1.3.2 Phasage des travaux**

Pour limiter l'influence de la construction des remblais sur les ouvrages d'art et bâtiments qui seront édifiés dans le cadre d'un même projet, il est très souhaitable de construire d'abord les remblais et d'attendre qu'une partie des déformations du sol se soit produite avant de commencer les fondations des autres ouvrages. Cet ordre des travaux permet notamment de simplifier la conception de la transition entre les ponts et leurs remblais d'accès sur sols compressibles, de limiter les coûts, de mieux contrôler les délais d'achèvement des travaux et de limiter les tassements différentiels à long terme.

**1.3.3 Contraintes d'exploitation**

Les exigences du maître d'ouvrage sur le comportement du remblai terminé influent directement sur le dimensionnement de l'ouvrage, le choix des méthodes de construction et les informations qu'il faut obtenir sur les sols lors de la reconnaissance géotechnique. En particulier, le maître d'ouvrage doit préciser :

- les contraintes géométriques du projet : modifications admissibles du profil en long après la mise en service, compte tenu des coûts de l'entretien, mais aussi déformations du profil en travers, qui sont importantes pour les voies ferrées, le drainage des chaussées routières, les voies de grues portuaires, les terre-pleins portuaires, etc. Ces contraintes doivent tenir compte de l'impossibilité pratique de construire des remblais sur sols compressibles sans déformations à long terme. La géométrie de la plateforme, notamment les pentes pour l'écoulement des eaux de surface, doit pour cette raison être relativement indépendante des tassements différentiels du sol ;

- les contraintes environnementales (impact sur l'environnement et notamment sur l'écoulement des eaux souterraines et de surface ; maîtrise de l'érosion pendant les travaux, etc.).

### **1.3.4 Le temps**

La durée des études, des travaux et de la stabilisation des sols sous les remblais sur sols compressibles est un facteur déterminant pour la programmation des études et de la réalisation de ces ouvrages. Il convient en général de prévoir plusieurs mois pour les reconnaissances géotechniques et les études de dimensionnement, quelques mois à quelques années pour les travaux selon leur nature et plusieurs années de suivi de la stabilisation des déformations des sols après la fin de la construction. Pour beaucoup de solutions techniques, le temps est la contrepartie de la limitation des coûts de la construction.

### **1.3.5 Les coûts**

Le coût des remblais sur sols compressibles dépend très fortement des exigences du maître d'ouvrage en matière de niveau de service et de durée du chantier. Le surcoût dû aux sols compressibles est souvent important et n'est en fait plafonné que par le coût de l'ouvrage d'art qui permettrait de s'affranchir du problème en supprimant la construction du remblai. D'autre part, la persistance des déformations après la construction du remblai peut entraîner des contraintes pour l'entretien ultérieur de l'ouvrage. Le maître d'ouvrage doit être prévenu des provisions financières à prévoir dans ce cas.

## **1.4**

## **PARTICULARITÉS DES ÉTUDES**

### **1.4.1 Fixation préalable des objectifs**

Le choix des solutions les mieux adaptées à la construction d'un remblai sur sols compressibles dépend de la géométrie de l'ouvrage à réaliser, mais aussi des exigences du maître d'ouvrage en matière de niveau de service, de durée des travaux, de coût total des études, de la construction et de l'entretien de l'ouvrage. Ces contraintes doivent être convenues entre le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre avant le lancement des études pour orienter le concepteur vers les solutions adaptées. Leur réalisme doit être vérifié aux différents stades de la préparation du projet.

### **1.4.2 Les incertitudes**

Malgré les progrès faits dans la connaissance des phénomènes et dans les techniques de construction, il faut rester conscient que les études ne permettent que de faire des prévisions incertaines et de définir une stratégie de réalisation et d'entretien. Les incer-

titudes se réduisent avec le déroulement des études mais persistent souvent encore au démarrage des travaux et parfois même après la mise en service. Les incertitudes liées aux propriétés des sols peuvent rester très importantes dans le cas des terrains stratifiés dont on n'a pas pu déterminer la géométrie précise (couches sableuses lenticulaires ou continues dans des dépôts argileux, par exemple).

Pour vérifier la faisabilité des solutions avant les travaux ou certains points des prévisions, des études en vraie grandeur peuvent être réalisées sur des remblais d'essais avant le début des travaux de construction proprement dits.

Pour réduire progressivement les incertitudes subsistant dans les études, on peut aussi exploiter en temps réel les mesures et observations faites pendant les travaux. C'est ce que prévoit la « méthode observationnelle », dont la construction des remblais sur sols compressibles est l'un des domaines d'application privilégiés. Son principe peut être résumé comme suit :

- on définit un projet et un calendrier de réalisation en s'appuyant sur les informations disponibles (sans faire des hypothèses très sécuritaires pour éliminer tout risque) et en respectant les critères de justification du projet ;
- on définit des moyens de suivi du comportement des sols et de l'ouvrage et un programme de mesure en cours de construction ;
- on définit un seuil d'alerte et un seuil d'arrêt à chaque étape de la construction, pour chaque type de mesures ;
- on définit par avance les moyens permettant, en cas de divergence inacceptable entre les prévisions et les constats, de se ramener en deçà de ces limites.

Toutes ces vérifications expérimentales ont un coût et une durée, qui doivent être pris en compte dans la gestion du projet.

### **1.4.3 Nécessité du phasage des études et des travaux**

Il n'est pas réaliste en général d'espérer obtenir en une seule étape une connaissance suffisante d'un site de sols compressibles pour définir la solution de construction optimale.

Les études (campagne de reconnaissance géotechnique et calculs) doivent être adaptées à chaque cas et leur coût est trop élevé pour que l'on puisse se dispenser d'un phasage qui permettra de limiter le coût global de ces études. Ce phasage peut être le suivant :

- analyse des objectifs fixés par le maître d'ouvrage ;
- définition des problèmes géotechniques (délimitation de la zone compressible, nature des sols, géométrie des couches sensibles, pré-estimation des phénomènes) ;
- adaptation éventuelle des objectifs par le maître d'ouvrage ;
- inventaire des solutions envisageables ;
- définition des campagnes et essais géotechniques ;
- campagnes et essais géotechniques et exploitation ;
- quantification des phénomènes, définition de la solution retenue et des modalités d'exécution (stratégie des dossiers de consultation des entreprises, équipements de suivi, pilotage des travaux) ;
- exploitation des mesures faites lors de la réalisation ;
- établissement des consignes d'exploitation de l'ouvrage en service.

### **1.4.4 La durée**

Les études des zones compressibles sont plus longues que les études classiques, d'une part du fait du nécessaire phasage de la démarche et, d'autre part, à cause de la durée de certains essais, dont l'exécution est indispensable.

### **1.4.5 Les coûts**

La complexité des études à conduire et le coût des solutions à mettre en œuvre pour l'exécution des travaux imposent :

- de disposer de données géotechniques précises et nombreuses pour limiter les incertitudes ;
- de faire des études poussées pour limiter les aléas de chantier.

Cette limitation des risques pour les travaux se traduit forcément par un surcoût important des études par rapport à une section courante.

## **1.5**

## **PARTICULARITÉS DES TRAVAUX**

### **1.5.1 Travaux préparatoires**

Comme nous l'avons déjà noté, le temps d'exécution est un critère important de choix des solutions. De manière à bénéficier au maximum d'une durée plus longue de consolidation des sols compressibles, il est fréquent que certains travaux de construction de remblai soient anticipés par rapport aux travaux généraux (préchargement). Cette solution est peu onéreuse mais doit être prévue assez tôt pour se rendre maître du terrain, prévoir les accès et les fournitures des matériaux. Ces marchés, généralement indépendants, doivent être coordonnés avec les marchés généraux.

### **1.5.2 Travaux provisoires**

Il est fréquent que, pour accélérer l'évolution des tassements (de la consolidation) des sols compressibles, des travaux provisoires soient réalisés. Ils peuvent, par exemple, consister en la réalisation de surcharges temporaires par sur-hauteur, sur-largeur ou sur-longueur de remblai. On réalise aussi des banquettes latérales stabilisatrices et provisoires pour améliorer la stabilité du remblai et simplifier le phasage.

### **1.5.3 La nécessaire rigueur de la conduite du chantier**

Pour piloter les travaux de construction d'un remblai dans une zone de sols compressibles, le responsable du chantier doit faire preuve de rigueur et disposer de procédures d'exécution précises (Plan d'assurance qualité). Les points d'arrêt du phasage



des travaux sont nombreux et font souvent appel, d'une part, à des mesures sur le terrain et, d'autre part, à des calculs à réaliser par le bureau d'études ou l'expert.

La sensibilisation du responsable des travaux et des entreprises est nécessaire, non seulement par les pièces écrites du dossier de consultation des entreprises (DCE), mais aussi par une restitution directe, avant le démarrage des travaux, du contenu des études (réunion commune de l'équipe chargée des études avec l'équipe qui gèrera les travaux).

### **1.5.4 Prolongement des études pendant les travaux**

Malgré le caractère détaillé des études conduites avant le démarrage des travaux, il est presque toujours nécessaire d'équiper l'ouvrage de dispositifs de suivi du comportement lors de la réalisation. Les mesures qui sont ainsi faites sur le terrain permettent parfois de prendre directement certaines décisions, mais il est très fréquent que les décisions dépendent d'une exploitation complexe des mesures, avec des calculs que seuls des spécialistes peuvent faire. Il est donc nécessaire de prévoir l'intervention de l'équipe d'études pendant la réalisation des travaux.

### **1.5.5 Les adaptations du projet**

Les études proposent en général un scénario de réalisation définitif avec un phasage et des points d'arrêt de validation. Toutefois, les solutions sont souvent très onéreuses et les incertitudes qui persistent conduisent parfois le concepteur à différer la mise en œuvre de certaines solutions jusqu'à la vérification in situ de leur nécessité. C'est, par exemple, le cas des allègements des remblais, qui peuvent être gardés en réserve jusqu'à ce que les mesures faites pendant les travaux montrent que les tassements résiduels attendus restent trop importants si l'on n'allège pas le remblai. À l'extrême, ces adaptations différées peuvent aller jusqu'à prévoir la possibilité de rajouter une travée à un pont.

### **1.5.6 Les particularités des ouvrages en service**

Le maître d'œuvre de la construction d'un remblai sur sols compressibles doit indiquer explicitement au maître d'ouvrage qu'il faut continuer à suivre cet ouvrage après sa mise en service. Ce suivi concerne essentiellement les tassements et il convient donc par exemple de laisser pendant quelques temps des tassomètres. Il faut également laisser des repères de nivellement et des bornes de référence pour suivre dans le temps les évolutions des tassements. Le suivi du bon fonctionnement du système de drainage doit aussi être fait régulièrement, car les déformations résiduelles peuvent le compromettre.

Le maître d'ouvrage devra pour sa part prévenir l'exploitant qu'il aura probablement à intervenir sur cette zone. En général, ces interventions se limitent à des rechargements de chaussées mais des travaux connexes sont aussi possibles suivant l'importance des phénomènes.

**Page laissée blanche intentionnellement**

Chapitre

# 2 Détecter et caractériser les sols compressibles



*Autoroute A 89 – Section 1 – LRPC Bordeaux*

**Page laissée blanche intentionnellement**

## 2.1 GÉNÉRALITÉS

Dans les projets de génie civil, la reconnaissance géotechnique se développe parallèlement aux phases d'élaboration du projet, avec pour missions :

- d'une part, de renseigner en temps utile le maître d'œuvre sur les contraintes géotechniques susceptibles d'influencer le choix des solutions et
- d'autre part, de fournir les bases des calculs nécessaires au dimensionnement des ouvrages.

Ainsi, pour les études de tracés de remblais routiers ou d'autres ouvrages linéaires (canaux, voies ferrées, etc.), cette reconnaissance fournit les éléments de décision quant au choix du meilleur fuseau, puis du tracé proprement dit, puis permet de préparer le projet d'exécution.

Le principe généralement admis est qu'il faut réaliser la reconnaissance du site et des sols de manière progressive, en densifiant les sondages au fur et à mesure de l'avancement du projet. Toutes les natures de sondages et essais coexistent dès le démarrage de l'étude : prélèvements pour identification des sols et essais en laboratoire, essais mécaniques en place, applications éventuelles des méthodes géophysiques. Seule la densité des essais et sondages augmente avec le détail des informations recherchées.

La reconnaissance des zones de sols compressibles doit être entreprise dès que l'existence de tels sols est détectée par la reconnaissance générale du site du projet : en effet, elle comporte nécessairement des essais de durée importante (essais de compressibilité, en particulier) et ses conclusions exercent une influence décisive sur l'économie générale du projet.

Ce chapitre rappelle les comportements caractéristiques des sols compressibles sous les remblais avant de décrire les techniques de reconnaissance et l'organisation spécifique de la reconnaissance géotechnique des zones de sols compressibles.

Pour les aspects généraux de l'organisation des reconnaissances de tracé, le lecteur pourra se référer au Guide sur la Commande et le contrôle des reconnaissances géotechniques de tracé (cf. bibliographie).

## 2.2 COMPORTEMENTS TYPIQUES DES SOLS COMPRESSIBLES

La reconnaissance spécifique des zones de sols compressibles est justifiée par les particularités de ces sols et par les calculs nécessaires au dimensionnement des ouvrages, à la justification de leur stabilité et au calcul de leurs déformations au cours du temps.

## 2.2.1 Propriétés caractéristiques des sols compressibles

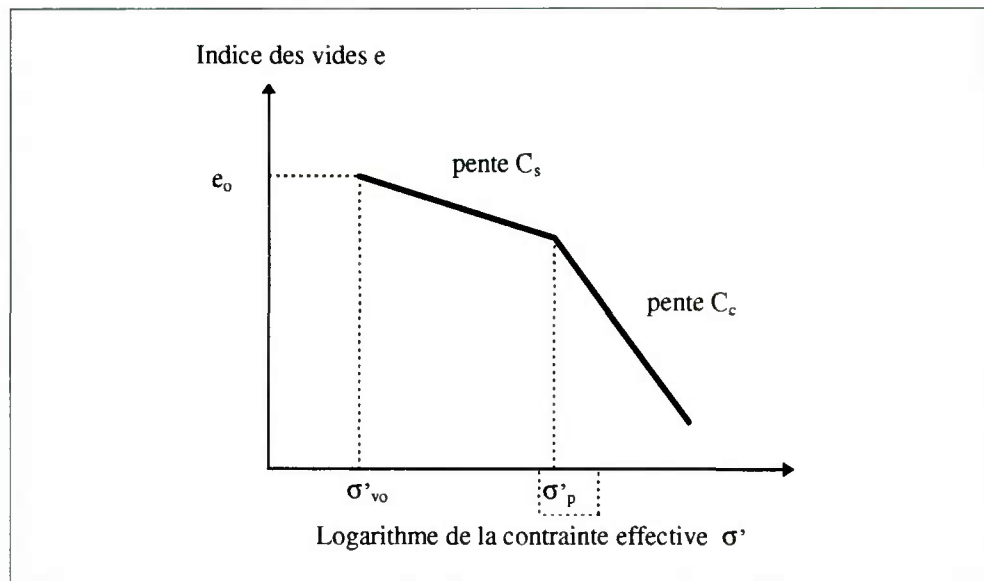
Les sols objets de ce guide (tourbes, vases, argiles molles, limons argileux ou lâches) ont en commun trois caractéristiques :

- une déformabilité élevée, fonction de la charge appliquée et du temps,
- une faible perméabilité, qui varie avec les déformations du sol,
- une résistance limitée, qui croît en général avec la profondeur.

La mesure de ces propriétés est décrite dans les manuels de mécanique des sols. Dans la pratique française courante

- la déformabilité est étudiée à l'œdomètre (essais de chargement par paliers, essais de fluage) et décrite par une relation semi-logarithmique entre l'indice des vides et la contrainte effective verticale (Figure 2.1) :

Figure 2.1 – Courbe de compressibilité œdométrique (essais de chargement par paliers).



$$e = e_o - C_s \lg \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} - C_c \lg \frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma}{\sigma'_p}$$

ou

$$e = e_o - C_s \lg \frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma}{\sigma'_{vo}},$$

suivant que la contrainte effective finale  $\sigma'_{vo} + \Delta\sigma$  est supérieure ou inférieure à la pression de préconsolidation  $\sigma'_p$ . L'essai de fluage permet d'estimer la partie de la déformation qui dépend du temps (Figure 2.2) :

$$\Delta e = -C_{\alpha e} \Delta \lg t;$$

- la perméabilité est le plus souvent déterminée à l'œdomètre. Elle varie avec la déformation selon une loi de la forme :

$$\Delta e = C_k \Delta \lg k;$$

- la perméabilité et la compressibilité contrôlent conjointement l'évolution du tassement au cours du temps (consolidation), par l'intermédiaire du coefficient de consolidation  $c_v$ , lui-même variable au cours de la consolidation ;

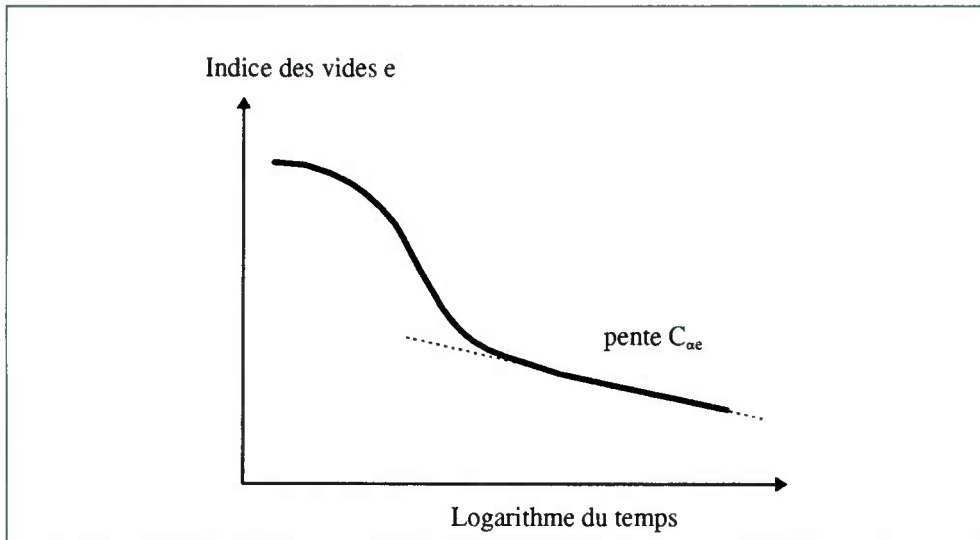


Figure 2.2 – Courbe de fluage œdométrique.

- la résistance est mesurée au scissomètre de chantier, qui fournit la résistance initiale du sol en conditions non drainées (chargement rapide). Cette résistance augmente avec les contraintes effectives. Sa loi de variation est déterminée à l'appareil triaxial dans des essais de type « consolidé-non drainé » CU :

$$\Delta c_u = \lambda_{cu} \Delta \sigma'$$

Le tableau 2.1 donne des ordres de grandeur de ces propriétés. Il n'existe pas de limites précises de la catégorie des sols compressibles. Les techniques décrites dans ce guide s'appliquent en général quand les tassements estimés dépassent quelques dizaines de centimètres, pour des sols de cohésion non drainée inférieure à 50 kPa, environ.

Les sols organiques et tourbeux posent des problèmes spécifiques de prélèvement et d'amplitudes de déformations qui nécessitent une attention particulière.

TABLEAU 2.1 – PROPRIÉTÉS CARACTÉRISTIQUES DES SOLS COMPRESSIBLES				
PROPRIÉTÉS	TOURBES	SOLS ORGANIQUES	VASES	ARGILES MOLLES
TENEUR EN EAU $w$ (%)	200-1000	100-200	60-150	30-100
INDICE DES VIDES $e$	3 à 10	2 à 3	1,5 à 3	1,2 à 2
POROSITÉ $n$	0,75 à 0,9	0,7 à 0,8	0,6 à 0,75	0,55 à 0,7
COMPRESSIBILITÉ $C_c / (1 + e_0)$	0,4 à 0,8	0,2 à 0,35	0,25 à 0,4	0,15 à 0,3
INDICE DE FLUAGE $C_{œ}$	0,02 $C_c$	0,03 à 0,05 $C_c$		
COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ $k$ (m/s)	$10^{-4}$ à $10^{-9}$	$10^{-6}$ à $10^{-9}$	$10^{-7}$ à $10^{-9}$	$10^{-9}$ à $10^{-11}$
COEFFICIENT DE CONSOLIDATION $c_v$ (m <sup>2</sup> /s)	$10^{-6}$ à $10^{-7}$	$10^{-6}$ à $10^{-8}$	$10^{-7}$ à $10^{-8}$	$10^{-7}$ à $10^{-9}$
COHÉSION NON DRAINÉE $c_u$ (kPa)	10-50	10-50	10-50	10-50
TAUX DE VARIATION DE $c_u$ : $\lambda_{cu} = \Delta c_u / \Delta \sigma'$	0,5	0,2 à 0,3	0,2 à 0,3	0,2 à 0,3
MASSE VOLUMIQUE SÈCHE $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	0,1 à 0,5	0,5 à 1	0,7 à 1,5	1 à 1,6
MASSE VOLUMIQUE DES PARTICULES $\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	1,4 à 2	2 à 2,6	2,4 à 2,7	2,6 à 2,7

L'exécution de sondages pressiométriques ou de sondages pénétrométriques permet d'obtenir rapidement un ordre de grandeur des amplitudes de tassements. Dans les sites où il est difficile, voire impossible, de prélever des échantillons intacts représentatifs pour les essais de laboratoire (dépôts alternés de sables et de sols argileux, couches profondes de sols compressibles), ces sondages peuvent même être un moyen de reconnaissance indispensable. Dans les essais de pénétration statique, les sols compressibles ont des résistances de cône  $q_c$  inférieures à 2 MPa. Dans les essais pressiométriques, les pressions limites de ces sols sont inférieures à 0,5 MPa. Les méthodes de calcul des tassements utilisées sont dans les deux cas les mêmes que pour les fondations superficielles (cf. fascicule 62 – Titre V).

## 2.2.2 Comportements caractéristiques des remblais sur sols compressibles

Les propriétés des sols compressibles ont trois conséquences pour les remblais :

- leur stabilité n'est pas automatiquement assurée ;
- ils subissent des tassements importants et de longue durée, qui rendent parfois problématique leur maintien à niveau avec les points durs ;
- leur construction perturbe les ouvrages avoisinants (frottement négatif et efforts horizontaux sur les fondations profondes, tassements différentiels des remblais et fondations superficielles, efforts supplémentaires sur les soutènements).

La maîtrise de ces phénomènes est l'objectif principal des reconnaissances géotechniques, des calculs de dimensionnement et des procédures de construction spécifiques aux remblais sur sols compressibles.

### ■ 2.2.2.a Stabilité

Les remblais sur sols compressibles connaissent deux formes d'instabilités (Figure 2.3) :

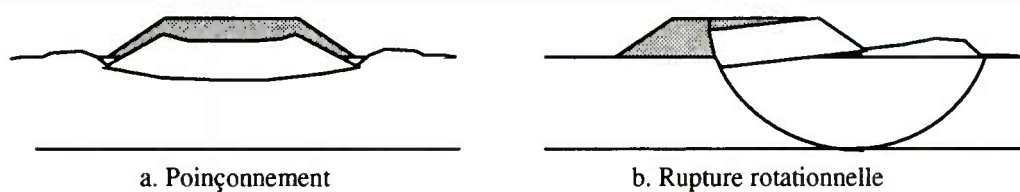


Figure 2.3 – Mécanismes de rupture des remblais sur sols compressibles.

- des instabilités de capacité portante par poinçonnement de la couche de sol mou (l'ensemble du remblai s'enfonce en repoussant le sol de part et d'autre). Ce type d'instabilité se produit dans les couches de sol très molles depuis la surface (vases d'estuaires, tourbières, etc.) ;
- des instabilités par rotation d'une partie du remblai et des sols compressibles sur une surface de rupture de forme cylindrique, avec formation d'un escarpement dans le remblai et d'un bourrelet de pied.

La plupart des ruptures sont de type « rotationnel ». Toutes les instabilités se produisent « à court terme », pendant les travaux de construction du remblai (ou d'excavation en pied de remblai ...).



Pour évaluer la stabilité d'un remblai sur sols compressibles, il faut déterminer la résistance du sol à court terme (cohésion non drainée). On peut améliorer la stabilité par différentes méthodes (chapitre 3). La construction par étapes, qui joue sur l'augmentation de la résistance du sol au cours du temps sous le remblai déjà construit, et la mise en place de banquettes latérales pour s'opposer au poinçonnement ou à la rupture rotationnelle sont deux des méthodes les plus courantes.

### ■ 2.2.2.b Tassements

Les règles de dimensionnement des remblais sur sols compressibles (coefficient global de sécurité de  $F = 1,5$  dans la pratique française courante) permettent de limiter les charges supportées par le sol à des valeurs pour lesquelles ses déformations (tassements et mouvements horizontaux) sont finies, même si elles sont importantes et peuvent durer pendant de très longues périodes.

Dans les conditions usuelles, le tassement se produit pour une faible part pendant la construction du remblai, pour l'essentiel pendant la phase dite de consolidation primaire et pour le reste pendant la période dite de compression secondaire ou de fluage. Le tassement immédiat (pendant la mise en place des couches successives du remblai) se développe en général à volume de sol constant, de sorte qu'il s'accompagne de déplacements horizontaux d'amplitude équivalente. Le tassement de consolidation primaire tend vers sa valeur finale en suivant une loi exponentielle. Le tassement de compression secondaire augmente comme le logarithme du temps. Des surpressions interstitielles subsistent pendant tout le processus de déformation du sol, y compris pendant la phase de fluage finale.

Il faut garder à l'esprit que ce processus en trois phases se réinitialise chaque fois que l'on applique une nouvelle charge au sol, c'est à dire en particulier quand on vient « recharger » le remblai pour le ramener à son niveau théorique.

Le procédé de « préchargement » ou de surconsolidation du sol (application pendant les travaux de construction d'une charge supérieure au poids final du remblai et de ce qu'il porte) est l'une des techniques permettant de contrôler ce processus.

Les amplitudes finales du tassement sont en général déduites d'essais de compressibilité à l'œdomètre. Le tassement total est habituellement supérieur de 10 à 20 % au tassement déduit de la courbe de compressibilité œdométrique, ce qui correspond aux effets du fluage et des mouvements horizontaux du sol. Toutefois, dans les sols hétérogènes comportant des alternances de sols sableux et argileux, les essais réalisés sur la partie la plus argileuse des carottes peuvent donner une image pessimiste de la déformabilité des sols et aussi de sa perméabilité.

Les variations de la pression interstitielle dans les sols compressibles sous les remblais accompagnent les tassements de consolidation et permettent de contrôler l'état des contraintes effectives dans le sol et donc sa résistance. Elles peuvent aussi être utilisées pour contrôler la stabilité du remblai pendant les travaux de construction.

Les tassements calculés doivent être pris en compte dans l'épaisseur totale du remblai à mettre en place pour obtenir à terme la cote prévue au projet. En particulier, il faut analyser la stabilité en tenant compte de l'épaisseur totale du remblai, tassements compris.

En cas de construction du remblai par étapes avec des tassements importants à chaque étape, il faut se préoccuper de la largeur de la plate-forme du remblai à chaque étape : une analyse géométrique montre que, pour obtenir la largeur souhaitée du remblai en fin de construction, il ne faut pas définir chaque étape en découpant en tranches horizontales le profil théorique du remblai, mais raidir les pentes des talus ou construire le remblai sur une emprise plus large. Si cette précaution n'est pas prise, la plate-forme finale est trop étroite et doit être élargie, ce qui est à la fois difficile à réaliser et coûteux.

### ■ 2.2.2.c Mouvements horizontaux

L'amplitude maximale des déplacements horizontaux des sols compressibles sous les remblais représente en général 15 % de l'amplitude du tassement. Ces déplacements conservent la même forme pendant la consolidation, ce qui facilite leur prévision et leur contrôle par des mesures inclinométriques. Les mouvements horizontaux peuvent être plus importants pendant la construction du remblai (conditions non drainées). On peut les limiter en améliorant les conditions de drainage du sol. Les mouvements horizontaux des sols compressibles sous les remblais sont l'une des causes principales des efforts parasites sur les ouvrages avoisinants.

### ■ 2.2.2.d Efforts parasites sur les ouvrages avoisinants

Les tassements sous les remblais créent des efforts de frottement négatif sur les pieux qui se trouvent dans leur zone d'influence (y compris à l'extérieur du remblai dans certains cas). D'autre part, les mouvements horizontaux du sol exercent aussi des efforts « parasites » horizontaux sur ces pieux. Ces efforts supplémentaires doivent être pris en compte dans le calcul des fondations profondes. Ils peuvent être limités, voire pratiquement supprimés, si le remblai est construit suffisamment à l'avance.

Les mouvements verticaux et horizontaux du sol peuvent également produire des efforts supplémentaires sur les ouvrages de soutènement situés en contrebas.

Enfin, la construction d'un remblai sur sol compressible provoque un tassement de la surface du sol sur une certaine distance (fonction de l'épaisseur des sols compressibles) au-delà du pied des talus du remblai. Ce tassement peut provoquer la fissuration d'ouvrages fondés superficiellement dans la zone d'influence du remblai. En particulier, l'élargissement des remblais sur sols compressibles est une opération complexe qui doit être étudiée avec soin.

## 2.3

## CONSISTANCE ET ORGANISATION DE LA RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE

On distingue classiquement trois phases dans les reconnaissances géotechniques, correspondant aux trois phases de l'élaboration des projets :

- la phase d'étude préliminaire, qui a pour buts de
  - (1) vérifier la faisabilité de l'opération envisagée,
  - (2) préciser les contraintes physiques, économiques et d'environnement conditionnant le projet,
  - (3) présenter une ou plusieurs solutions techniques et leur comparaison en termes de complexité, délais et coûts. La reconnaissance géotechnique y contribue en donnant une appréciation de la difficulté technique de la construction et des risques associés au projet ;
- la phase d'étude d'avant-projet, qui doit
  - (1) confirmer la faisabilité de la solution retenue,
  - (2) proposer l'implantation des ouvrages,
  - (3) proposer un découpage et un calendrier des travaux,
  - (4) estimer les coûts prévisionnels et les incertitudes associées,
  - (5) permettre au maître d'ouvrage de décider la réalisation du projet et de mettre en place les moyens nécessaires. La reconnaissance géotechnique y contribue en permettant le prédimensionnement des ouvrages ;
- la phase d'étude du projet, au cours de laquelle on
  - (1) précise les dispositions techniques générales et détaillées de l'ouvrage,
  - (2) établit un coût global et détaillé des travaux,
  - (3) prépare la consultation des entreprises de travaux. La reconnaissance géotechnique y précise les propriétés des sols et les bases de la justification des ouvrages.

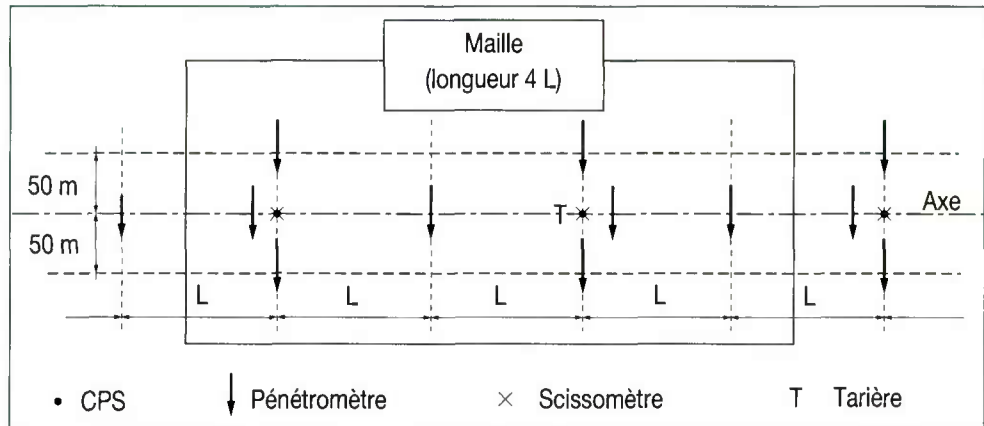
Ce phasage traditionnel est particulièrement important pour les études géotechniques de zones compressibles, dont le coût peut être très élevé.

Chronologiquement, la reconnaissance géotechnique débute par le collationnement des informations déjà accessibles à partir des cartes topographiques et géologiques ou encore des études géotechniques antérieures. Cette étude préliminaire, terminée par un rapport, doit recenser les zones compressibles et consigner les contraintes sur une carte géotechnique de la zone étudiée. À ce stade, le maître d'œuvre d'un projet d'infrastructure linéaire est en mesure de choisir le fuseau des tracés potentiels et le maître d'œuvre d'un projet d'aménagement d'implanter au mieux ses ouvrages ou bâtiments.

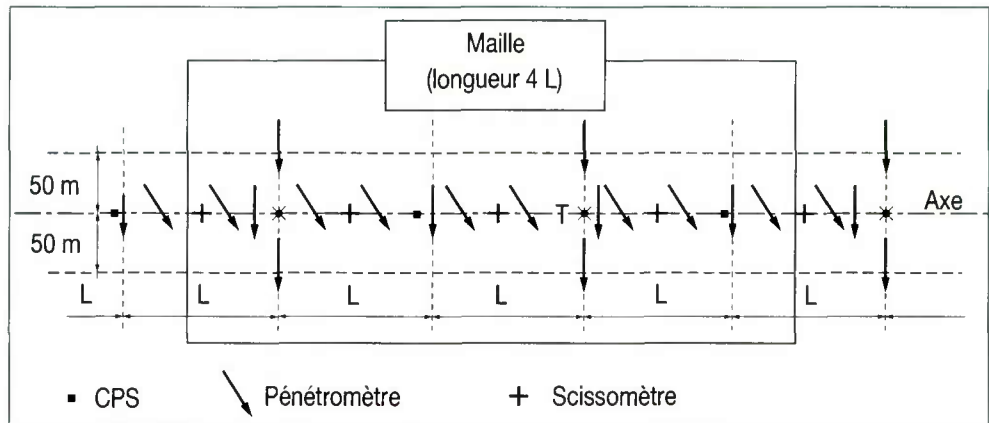
Les deux phases suivantes de la reconnaissance utilisent les mêmes méthodes et matériels de sondage et d'essai, mais avec une densité moindre pour la reconnaissance sommaire. Une façon efficace d'organiser la reconnaissance consiste à diviser le tracé ou la zone à étudier en mailles élémentaires comportant toutes les mêmes essais et sondages. La figure 2.4 montre un exemple de découpage d'un tracé en mailles de longueur 4 L (L devrait être compris entre 50 m et 250 m selon les sites et la variabilité des sols sur le tracé). Les sondages et essais doivent être implantés sur l'axe du tracé et sur deux lignes distantes d'une trentaine ou cinquantaine de mètres de part et d'autre de l'axe, afin de surveiller les variations latérales éventuelles des sols et de pouvoir prendre les dispositions nécessaires pour le projet.

Figure 2.4 – Implantation des sondages et essais pour la reconnaissance d'un tracé sur sols compressibles :

a) Reconnaissance géotechnique sommaire;



b) Reconnaissance géotechnique détaillée.



La densité des reconnaissances ne peut être définie indépendamment de la variabilité des sols du site et de la connaissance préalable que l'on en a. Elle doit aussi être adaptée à la consistance du projet et à l'influence des données géotechniques (tassements, stabilité) et de leurs incertitudes sur la conception globale de l'ouvrage et sa réalisation. Les reconnaissances géotechniques de sols compressibles sont donc lourdes, mais peuvent être optimisées.

Le bon sens doit régler les détails pratiques des reconnaissances géotechniques :

- à l'occasion d'une visite à pied du tracé du projet, on retiendra les accès les plus pratiques pour les machines de sondage, ce qui peut affecter la régularité du réseau de reconnaissance dessiné a priori;
- les sondages doivent traverser toute l'épaisseur de la couche ou des couches compressible(s) et certains doivent être poursuivis jusqu'au substratum résistant sous-jacent, notamment aux abords des ouvrages d'art;
- la densité des sondages et essais sera augmentée dans les zones où des variations importantes dans l'épaisseur ou la nature des sols compressibles sont découvertes.

Le tableau 2.2 donne des ordres de grandeur de la densité finale des sondages et essais dans les sections courantes de remblais sur sols compressibles.

TABLEAU 2.2 – DENSITÉS TYPES POUR LES PRÉLÈVEMENTS ET LES ESSAIS EN PLACE

	SONDAGE CAROTTÉ (*)	TARIÈRE (**)	SCISSOMÈTRE	PÉNÉTROMÈTRE
TRACÉ (unité/km)	4	1	10	8 à 16
OUVRAGE PLAN (unité/hectare)	0,06	0,02	0,08	0,64
OUVRAGE PORTUAIRE (unité/hectare)	0,2	1	0,2	0,2

\* Prélèvement de classe 1, selon la norme P94.202

\*\* Prélèvement de classe 3, selon la norme P94.202.

La consistance détaillée des reconnaissances géotechniques de remblais sur sols compressibles doit être fixée par un géotechnicien expérimenté. L'objectif final est de pouvoir diviser le tracé ou la zone à aménager en ensembles homogènes du point de vue géotechnique (épaisseurs de couches constantes ; propriétés physiques et mécaniques homogènes dans chaque couche), de façon à effectuer les calculs de dimensionnement dans chacune de ces zones. Les besoins en essais et sondages peuvent varier en fonction des caractéristiques du projet, mais on a toujours besoin au minimum des types d'essais et de sondages suivants :

- les sondages destructifs profonds permettent de contrôler la succession des couches géologiques sur le site et de préciser la profondeur maximale des sols compressibles ;
- les sondages carottés, avec prélèvement d'échantillons intacts au carottier à piston stationnaire, permettent d'exécuter les essais mécaniques de laboratoire (essais œdométriques, essais triaxiaux, essais de perméabilité) ainsi que les essais courants d'identification. La qualité des prélèvements est très importante et les opérations devraient être surveillées par un représentant du maître d'œuvre. En général, la qualité des prélèvements diminue à partir de 10 ou 15 mètres de profondeur. Les essais de laboratoire doivent être réalisés sur tous les types de sols rencontrés dans le sondage : mesure des teneurs en eau tous les mètres, voire plus ; mesure des masses volumiques, des teneurs en matières organiques et en carbonate de calcium et des limites d'Atterberg, détermination de la courbe granulométrique, essais œdométriques à chargement par paliers et de fluage, essais triaxiaux de type CU dans chaque couche ;
- les sondages à la tarière permettent de repérer les variations des couches de sols compressibles et d'effectuer les essais d'identification de la nature des sols présents sur le site. Pour les faibles profondeurs, on peut remplacer la tarière par une pelle hydraulique ;
- les sondages au scissomètre de chantier (à raison d'un essai tous les mètres) fournissent l'information de base pour les calculs de stabilité des remblais sur sols compressibles ;
- les sondages continus au pénétromètre statique ou au piézocône contribuent à l'identification des couches de sols compressibles et des niveaux sableux drainants. Ils peuvent fournir des informations complémentaires utiles pour le dimensionnement des remblais (stabilité et tassement).

Les essais pressiométriques réalisés pour le dimensionnement des fondations d'ouvrages d'art ou de bâtiments apportent aussi des informations utiles sur la nature des sols, leur résistance et leur déformabilité.

De façon générale, il est indispensable que les reconnaissances réalisées pour les ouvrages d'art soient mises à la disposition des personnes traitant du projet général, notamment des remblais sur sols compressibles, même si elles sont réalisées dans le cadre d'opérations ou de marchés séparés. Cette mise à disposition doit être réciproque.

Un rapport de synthèse doit être établi pour chaque phase de la reconnaissance géotechnique. Chaque rapport s'articule habituellement autour des trois points suivants :

- rappel de la commande et liste des travaux effectués ;
- description des sols rencontrés sur le site ;
- recommandations pour la suite des reconnaissances ou des études.

## 2.4

## LES REMBLAIS D'ESSAI

Une modalité particulière des études géotechniques, dont le coût est élevé et dont l'utilisation doit donc être mûrement réfléchie, est la construction d'un ou plusieurs remblais d'essais. Les remblais d'essais doivent être réalisés pendant la période des reconnaissances, donc avec des marchés de travaux particuliers. Leur conception et leur interprétation doivent être effectuées par des spécialistes de géotechnique.

Les remblais d'essais sont indispensables chaque fois que la faisabilité, le planning ou le coût d'un projet dépendent d'un aspect incertain du comportement des sols compressibles sur le site. Les remblais d'essais construits en France depuis une quarantaine d'années avaient pour objectifs :

- soit de contrôler les conditions réelles de stabilité du remblai, quand il était indispensable de caler précisément les valeurs des coefficients de sécurité pour gérer une construction par étapes ou pour garantir la possibilité de mettre en place la hauteur finale du remblai ;
- soit de vérifier la déformabilité réelle des sols (étendue du domaine surconsolidé où les déformations restent petites, valeurs réelles des paramètres de déformabilité) ;
- soit de déterminer la vitesse de tassement réelle des sols (grande incertitude sur le comportement d'un milieu stratifié ou difficile à prélever pour les essais de laboratoire ; désir de connaître l'efficacité d'une technique de réalisation de drains verticaux, etc.) ;
- soit de tester en conditions réelles l'applicabilité ou l'efficacité d'une technique de construction encore peu utilisée (renforcement des remblais, renforcement des sols compressibles).

Les remblais d'essai doivent être dimensionnés et instrumentés en fonction des questions auxquelles ils doivent apporter des réponses. En particulier, ils doivent solliciter les mêmes sols que l'ouvrage réel et donc avoir des dimensions comparables en général. Toutefois, les remblais à la rupture sont habituellement plus grands et comportent des banquettes latérales sur trois côtés, pour limiter l'instrumentation et les observations à la zone vers laquelle la rupture est dirigée. Quant aux remblais destinés aux études de tassements ou de vitesses de tassements, ils peuvent être moins étendus et moins hauts que les remblais du projet quand ces dimensions plus faibles sont suffisantes pour charger les sols voulus dans le domaine de chargement souhaité.

L'acquisition automatique des mesures effectuées sur les remblais d'essais est recommandée en raison du délai d'observation assez court dont on dispose en général. L'automatisation des mesures est en général facilitée par la concentration des appareils de mesure sur un espace limité ou sur un nombre limité de « profils » de mesure.

Les remblais d'essai sont souvent construits à un moment où les emprises du projet ne sont pas totalement disponibles. On doit les construire à l'écart du tracé sur les terrains qu'il est possible d'acquérir ou d'occuper temporairement pendant la période des études géotechniques. La transposition au projet des résultats obtenus doit tenir compte des particularités éventuelles des sites des essais. Quand on peut disposer des emprises du tracé pour la construction d'un remblai d'essai, il faut peser les avantages et inconvénients de l'incorporation ou non du remblai d'essai dans l'ouvrage final. Schématiquement, il s'agit de choisir entre la réalisation d'une partie de l'ouvrage final et les inconvénients de créer un point dur car les sols compressibles auront tassé plus tôt que les autres remblais et seront soumis à un tassement résiduel plus faible. Pour leur part, les remblais à la rupture doivent toujours être construits en dehors du tracé.

Les remblais d'essais bien conçus et réalisés dans des conditions soignées ont toujours apporté une aide décisive à la conception des projets de remblais sur sols compressibles.

Chapitre

# 3 Choix des techniques de construction



A 89 - Section 1 - Marais de Brizard - LRPC Bordeaux

**Page laissée blanche intentionnellement**



## 3.1 INTRODUCTION

Le choix des techniques de construction des remblais sur sols compressibles dépend :

- du temps disponible pour l'exécution des travaux,
- de l'amplitude des déformations tolérées après la mise en service,
- des contraintes d'environnement du projet (emprise, sensibilité aux vibrations, protection des nappes phréatiques, etc.),
- des contraintes budgétaires.

Les solutions adoptées se rattachent à deux groupes de techniques :

- le premier groupe rassemble les dispositions constructives directement rattachées au remblai (construction par étapes, surcharge, etc.),
- le second groupe est celui des techniques qui nécessitent des interventions dans le sol de fondation (substitution du mauvais sol, drainage, colonnes ballastées, etc.).

Le choix de la technique la mieux adaptée à un projet particulier nécessite l'intervention d'un spécialiste de géotechnique et un dialogue entre

- ce spécialiste et le projeteur,
- le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage sur les questions de coût, délai et fiabilité.

L'objet de ce chapitre est de rappeler les domaines d'application des techniques classiques de construction des remblais sur sols compressibles et de passer en revue les critères de choix entre ces techniques du point de vue des contraintes du projet et des types d'ouvrages concernés.

## 3.2 PRÉSENTATION DES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION

Les techniques classiquement utilisées pour la construction des remblais sur sols compressibles sont les suivantes :

### a. Dispositions constructives relatives au remblai

- construction par étapes,
- banquettes latérales,
- surcharge temporaire,
- remblais allégés,
- renforcement par géotextiles.

### b. Modifications du sol supportant le remblai

- substitution du mauvais sol,
- drains verticaux,
- consolidation atmosphérique,
- colonnes ballastées,
- plots ballastés pilonnés,
- injection solide,

- colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet (technique souvent appelée «jet grouting»),
- colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment,
- remblai sur inclusions rigides,
- électro-osmose.

Ces techniques sont décrites dans les annexes 1 à 15 à ce chapitre, dans l'ordre de la liste précédente.

Les techniques de construction spécifiques aux remblais sur sols compressibles visent à assurer la stabilité des sols et à limiter les déformations des remblais aux valeurs imposées par le projet. Le tableau 3.1 indique la correspondance entre ces objectifs et les techniques énumérées ci-dessus.

TABLEAU 3.1 – EFFETS DES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DES REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES															
ACTION SUR LE SOL DE FONDATION	Électro-osmose														
	Remblai sur inclusions rigides														
ACTION SUR LE REMBLAI	Colonnes de sol traité														
	Colonnes de mortier sol-ciment exécutées par jet														
	Injection solide														
	Plots ballastés														
	Colonnes ballastées														
	Consolidation atmosphérique														
	Drains verticaux														
	Substitution														
	Renforcement par géosynthétiques														
	Remblais allégés														
	Surcharge temporaire														
	Banquettes latérales														
	Construction par étapes														
	AMÉLIORER LA STABILITÉ	■	■		■	■	■		■	■	■	■	■	■	■
DIMINUER L'AMPLITUDE DES TASSEMENTS				■				■			■	■	■	■	■
DIMINUER LES DÉPLACEMENTS HORIZONTAUX (*)		■	■					■				■	■	■	
OBTENIR PLUS RAPIDEMENT UN POURCENTAGE DONNÉ DU TASSEMENT FINAL			■					■	■	■	■	■			
ACCÉLÉRER LA CONSOLIDATION (construction par étapes)									■	■	■				■

(\*) pour réduire les efforts appliqués à des pieux existants.

Les avantages, inconvénients et incertitudes des différentes techniques sont indiqués dans le tableau 3.2.

TABLEAU 3.2 – AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES				
TECHNIQUE DE CONSTRUCTION	COÛT	DÉLAI	TECHNICITÉ	FIABILITÉ (PRÉVISIONS)
ACTION SUR LE REMBLAI				
CONSTRUCTION PAR ÉTAPES	■	■■■	■	■■ (durée)
BANQUETTES LATÉRALES	■■	■■	■	■■■
SURCHARGE TEMPORAIRE	■	■■■	■	■■ (durée, effet)
REMBLAIS ALLÉGÉS	■■■	■	■■	■■■
RENFORCEMENT PAR GÉOSYNTHÉTIQUES	■■	■	■■	■■ (effet)
ACTION SUR LE SOL DE FONDATION				
SUBSTITUTION DU MAUVAIS SOL	■■■	■	■	■■■
DRAINS VERTICAUX	■■	■■	■■	■■ (durée)
CONSOLIDATION ATMOSPHÉRIQUE	■■■	■■	■■■	■■ (durée)
COLONNES BALLASTÉES	■■■	■■	■■■	■■ (effet)
PLOTS BALLASTÉS PILONNÉS	■■	■	■■■	■■ (effet)
INJECTION SOLIDE	■■■	■■	■■■	■■ (effet)
COLONNES DE MORTIER SOL-CIMENT EXÉCUTÉES PAR JET	■■■	■■	■■■	■■ (effet)
COLONNES DE SOL TRAITÉ	■■■	■■	■■■	■■ (effet)
REMBLAI SUR INCLUSIONS RIGIDES	■■■	■■	■■	■■■
ÉLECTRO-OSMOSE	■■■	■■■	■■■	■■ (durée, effet)

Légende : ■ - faible ■■ - moyen ■■■ - fort

Les appréciations de « faible », « moyen » et « fort » sont approximatives et ne traduisent pas nécessairement l'intérêt relatif des techniques pour un chantier donné.

## 3.3

### CRITÈRES INFLUANT SUR LE CHOIX DES TECHNIQUES

Le choix d'une technique de construction s'effectue par comparaison des coûts des solutions qui satisfont une série de critères concernant :

- la possibilité d'exécuter les travaux,
- l'impact des travaux sur l'environnement,
- les délais disponibles,
- la satisfaction des exigences de service de l'ouvrage fini,
- les contraintes générales communes aux chantiers de travaux publics.

Ces critères sont examinés ci-après.

#### 3.3.1 Disponibilité des matériaux et des matériels

Avant de choisir une solution, il faut s'assurer de la disponibilité sur le site du chantier et à la période prévue de tous les matériaux et matériels nécessaires à l'exécution des travaux :

- eau (réalisation de colonnes de mortier sol-ciment par jet),

- remblais en quantité suffisante (banquettes latérales, surcharge temporaire, substitution partielle ou totale des mauvais sols), en tenant compte des niveaux drainants indispensables au fonctionnement de l'ouvrage,
- ballast (colonnes ballastées, plots ballastés pilonnés),
- matériaux légers (polystyrène expansé, structures alvéolaires, schistes et argiles expansés, pneus, etc.),
- géotextile (renforcement du corps de remblai),
- ciment ou chaux.

### **3.3.2 Impacts sur l'environnement**

Les travaux doivent respecter les règles en vigueur concernant :

- la protection de l'eau (maintien des écoulements naturels, protection des nappes et des cours d'eau, etc.), notamment par référence à la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 et à ses décrets d'application. Ces précautions concernent en particulier l'exécution de colonnes de mortier sol-ciment par jet et le traitement à la chaux ou au ciment ;
- la lutte contre le bruit et les vibrations (colonnes ballastées, plots ballastés pilonnés), notamment pour le confort des riverains et le respect des installations sensibles aux vibrations ;
- la mise en dépôt des matériaux non réutilisables (substitution du mauvais sol).

### **3.3.3 Délais**

Les travaux de terrassements sur sols compressibles sont souvent sur le chemin critique de l'exécution des projets. Certaines techniques nécessitent des temps d'attente dont la prévision n'est pas très précise (construction par étapes, surcharge temporaire, drainage vertical, consolidation atmosphérique) et cette incertitude, qui diminue au cours des travaux, doit être prise en compte dans le choix de la solution.

Certaines techniques nécessitent d'autre part d'intervenir à une date précise en un point du chantier qui doit être accessible, ce qui peut interagir avec l'organisation générale du chantier et éventuellement exclure le choix des techniques concernées. L'exécution préalable de certains travaux nécessite aussi d'avoir pu libérer les emprises nécessaires.

### **3.3.4 Exigences de service de l'ouvrage**

Un critère essentiel pour le choix des techniques de construction est que l'ouvrage terminé réponde aux spécifications de ses utilisateurs, en termes de tassement total et de tassements différentiels. Les performances des différentes techniques doivent être comparées par le calcul lors de l'élaboration du projet. Ce travail nécessite l'intervention d'un spécialiste.

La répartition du coût total de l'ouvrage entre sa construction et son exploitation peut varier d'une technique à l'autre. Le coût de la satisfaction des exigences de service devrait pour cette raison être évalué en ajoutant les coûts de construction et d'entretien.

### 3.3.5 Contraintes générales communes aux chantiers de travaux publics

Comme les autres chantiers de terrassements, les chantiers de construction de remblais sur sols compressibles sont soumis à des contraintes sur :

- la circulation des véhicules,
  - l'emprise des chantiers,
  - l'évacuation des eaux et des déblais,
  - l'impact des emprunts et des dépôts,
  - la présence d'ouvrages existants à conserver pendant les travaux.
- Certaines techniques de construction peuvent être écartées pour respecter ces limitations.

## 3.4

## CHOIX DES TECHNIQUES EN FONCTION DU TYPE D'OUVRAGE

### 3.4.1 Ouvrages linéaires

Le premier groupe d'ouvrages pouvant comporter des remblais sur sols compressibles est celui des routes et autoroutes (et voies ferrées), qu'il s'agisse des sections courantes ou de sections particulières comme les accès aux ouvrages d'art et le franchissement de passages ou de cours d'eau par des buses ou des dalots.

#### ■ 3.4.1.1 Sections courantes de routes

Toutes les dispositions constructives concernant le remblai sont possibles. L'utilisation de matériaux légers (polystyrène, matériaux alvéolaires, ...) est peu courante, en raison de son coût et des mesures d'accompagnement nécessaires. Elle n'est mise en œuvre que de façon localisée (remblais d'accès à un ouvrage, par exemple).

Parmi les dispositions concernant le sol compressible, celles qui peuvent être couramment appliquées sont les suivantes :

- une substitution de tout ou partie de la couche de sol compressible peut être envisagée. La substitution totale est limitée en pratique à des couches de 4 à 5 mètres d'épaisseur. Elle élimine tous les problèmes de stabilité et de tassements. En cas de substitution partielle, on traite plutôt les problèmes d'amplitude des tassements de consolidation et de fluage ;
- la mise en œuvre d'un système de drainage vertical est souvent associée aux dispositions constructives se rapportant au corps de remblai (construction par étapes, etc.) ;
- pour accélérer le processus de consolidation, la consolidation atmosphérique apporte une solution efficace dans certains cas spécifiques pour lesquels les solutions traditionnelles ne sont pas adaptées. Elle permet en particulier de précharger le sol sans risque d'instabilité.

Les autres techniques d'amélioration des sols compressibles ne sont appliquées en section courante que dans certains cas particuliers et doivent être soumises à l'appréciation de spécialistes.

### ■ 3.4.1.2 Remblais d'accès aux ouvrages d'art

Les remblais d'accès aux ouvrages d'art diffèrent des sections courantes par l'importance particulière des interactions avec les fondations de l'ouvrage et des tassements différentiels. D'autre part, la longueur limitée des remblais concernés permet d'utiliser des techniques plus complexes, de coût plus élevé.

Les interactions des remblais d'accès avec les fondations profondes peuvent être limitées :

- en construisant les remblais avant les fondations de l'ouvrage (avec ou sans dispositions complémentaires pour accélérer la consolidation des sols compressibles) ;
- en augmentant la stabilité du remblai (utilisation de banquettes latérales, substitution du mauvais sol, remblais allégés, colonnes ballastées, colonnes de mortier sol-ciment, colonnes de sol traité, remblai sur pieux).

Pour les tassements différentiels, on cherche à provoquer la plus grande partie du tassement total prévu avant la fin des travaux de construction. Toutes les techniques permettant de diminuer l'amplitude du tassement total ou d'accélérer l'évolution du tassement (tableau 3.1) peuvent être utilisées, seules ou en combinaison. Le choix entre ces techniques dépend en pratique de l'épaisseur des sols compressibles :

- pour les faibles épaisseurs de sols compressibles (jusqu'à une dizaine de mètres), le contrôle des tassements peut s'effectuer par la substitution du mauvais sol, par la mise en place de colonnes de ballast, de sol traité ou de béton armé appuyées sur le substratum plus rigide, par l'allègement des remblais ou par l'accélération de la consolidation du sol pendant les travaux (préchargement par une surcharge temporaire ou par consolidation atmosphérique, réseau de drains verticaux) ;
- pour les épaisseurs plus fortes de sols compressibles (au-delà d'une vingtaine de mètres), les techniques de report des charges sur le substratum sont en général inapplicables. La limitation des tassements après la mise en service de la route est obtenue soit par accélération de la consolidation (drains verticaux, construction par étapes, consolidation atmosphérique, surcharge temporaire, ... en tenant compte des conditions de stabilité du remblai), soit par l'allègement du corps du remblai. Dans certains cas, des tassements dépassant les limites habituelles sont acceptés au prix d'une adaptation de la transition entre l'ouvrage et le remblai d'accès. D'autre part, le traitement de la partie superficielle des sols compressibles permet parfois de limiter les tassements à des valeurs acceptables ;
- pour les épaisseurs intermédiaires de sols compressibles, le choix des techniques doit être effectué spécifiquement pour chaque projet.

La longueur sur laquelle il convient de considérer un remblai routier comme « remblai d'accès » à un ouvrage dépend de l'épaisseur du remblai et de celle des sols compressibles. Il est courant de fixer cette longueur à deux fois la distance verticale entre la surface du remblai et la base des sols compressibles. La transition entre le « point dur » que constitue l'ouvrage et le remblai courant doit donc être assurée sur cette longueur du remblai d'accès.

### ■ 3.4.1.3 Remblais sur buses ou dalots

La présence d'un espace vide à l'intérieur du remblai diminue la charge appliquée au sol de fondation au voisinage des buses ou dalots. Des tassements différentiels se produisent localement et il convient d'en tenir compte lors de l'élaboration du projet. De

plus, il est nécessaire, comme pour toutes les structures placées sous un remblai, de contrôler l'interaction entre la buse ou le dalot et le remblai (qualité du compactage, tassements différentiels et reports de charge). Il faut également se préoccuper des tassements différentiels de la buse dans le sens de sa longueur (transversalement au remblai). Toutes les méthodes de construction sont applicables, mais le choix et le dimensionnement de la solution retenue doivent être confiés à un spécialiste.

#### ■ 3.4.1.4 Remblais en contact avec l'eau

Certains remblais routiers ou ferroviaires sont en contact avec des rivières, canaux ou lacs, de façon permanente ou intermittente. Ces remblais peuvent servir de digue de retenue des eaux ou être entourés d'eau.

Pour les remblais servant de digue, le choix d'un matériau imperméable ou une imperméabilisation de surface est nécessaire. Du point de vue des procédés de construction dans les zones de sol mou, il est exclu de placer une couche drainante sous toute la largeur du remblai (il reste possible de placer des couches drainantes partielles, à condition qu'elles ne communiquent jamais) et d'utiliser des systèmes de drainage du sol de fondation susceptibles de créer des chemins d'écoulement préférentiels.

Pour les remblais entourés d'eau, l'utilisation de matériaux ultra-légers doit être étudiée avec soin, pour éviter les effets de la poussée d'Archimède sur le corps du remblai en cas de submersion partielle ou totale.

### 3.4.2 Plates-formes industrielles et portuaires

Le second groupe d'ouvrages pouvant comporter des remblais sur sols compressibles est celui des plates-formes en remblai, destinées le plus souvent aux aménagements urbains, industriels ou portuaires. Des charges localisées importantes peuvent être appliquées à ces remblais (stockage de conteneurs, voies de roulement, cuves de stockage d'eau ou d'hydrocarbures).

Les techniques de construction les plus utilisées pour ce type d'ouvrages sont les mêmes que pour les ouvrages linéaires : construction par étapes, avec une surcharge temporaire lorsqu'il faut limiter le tassement après la mise en service et avec des drains verticaux lorsqu'il faut accélérer la consolidation du sol. La substitution totale ou partielle des sols compressibles peut également contribuer à régler localement les problèmes de tassement ou de stabilité ; notamment dans les zones de vases très molles ou de sols organiques.

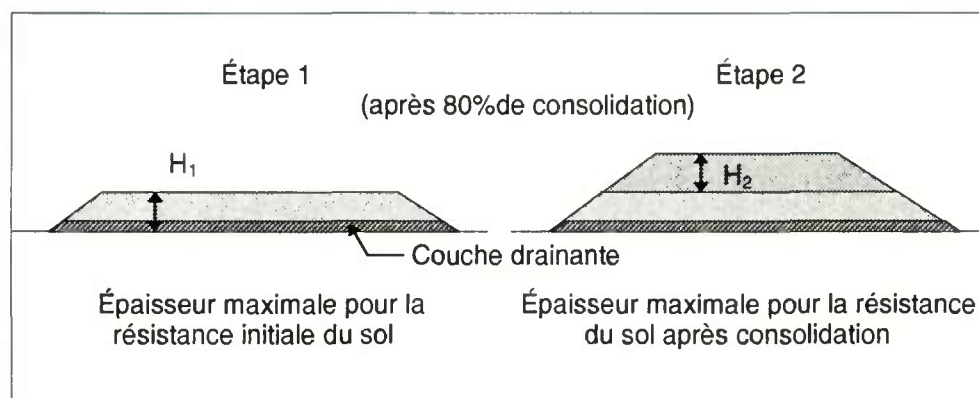
Pour les bâtiments industriels, les tassements différés et différentiels doivent être limités au maximum. La mise en place de colonnes (colonnes ballastées, colonnes de sol traité, colonnes de mortier sol-ciment, pieux) peut être une bonne solution pour les charges ponctuelles des poteaux et des murs porteurs.

Pour les cuves de stockage, le remblai est souvent de faible épaisseur et les charges transmises relativement faibles, mais les exigences de l'exploitation concernant les tassements (moyen et différentiel) sont souvent draconiennes et un soin particulier doit être apporté à la conception et à l'exécution des travaux de construction du remblai. Enfin, les tassements doivent être pris en compte dans la conception du raccordement des tuyauteries entre les cuves et les éléments extérieurs.

# ANNEXE 1 • Construction par étapes

## ■ Description et principe de fonctionnement

La résistance du sol augmente avec le niveau des contraintes effectives. La construction par étapes permet d'exploiter cette propriété pour des sols qui ne peuvent supporter dans leur état naturel la totalité de la charge prévue : le remblai est construit par couches ; l'épaisseur de la couche suivante est déterminée par un calcul de stabilité en fonction de la résistance du sol acquise par consolidation à la fin de l'étape précédente. Sous chaque charge on atteint la fin (ou souvent 80 %) de la consolidation. Cette méthode nécessite des délais importants si le sol compressible est épais et peu perméable. Elle est souvent associée à des drains verticaux.



## ■ Domaine d'application

Tous types de remblais sur sols argileux mous quand le projet définitif est figé longtemps avant le début de l'exploitation.

## ■ Mise en œuvre

Le remblai est construit par phases, avec des périodes d'attente pouvant atteindre plusieurs mois.

## ■ Contrôle de qualité

Mesure des tassements du sol support, des pressions interstitielles et, éventuellement, des déformations latérales en pied de remblai.

Interprétation par l'ingénieur géotechnicien, pour calculer les gains de cohésion du sol support et adapter le planning de construction du remblai.

## ■ Avantages et inconvénients

Technique économique mais demandant du temps et un contrôle précis des vitesses de consolidation. Technique adaptée aux sols dont la consolidation est rapide (faible épaisseur). Doit être combinée à des drains verticaux dans le cas contraire.

Travaux réalisés par une entreprise générale.

Le marché doit permettre une adaptation des délais de construction pendant les travaux. La technique n'est pas toujours applicable (l'augmentation possible de la résistance du sol est parfois insuffisante pour porter le remblai final).



## ANNEXE 2 • Banquettes latérales

### ■ Description et principe de fonctionnement

Cette technique améliore la stabilité du remblai en l'élargissant par des banquettes de plus faible hauteur. Ces banquettes servent de contrepoids vis à vis de ruptures circulaires (Figure a) et améliorent également la stabilité au poinçonnement (Figure b).

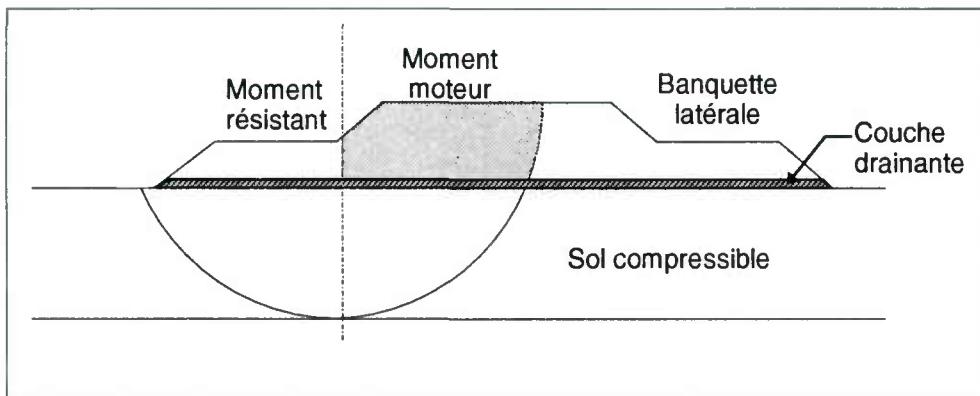


Figure a - Rupture circulaire.

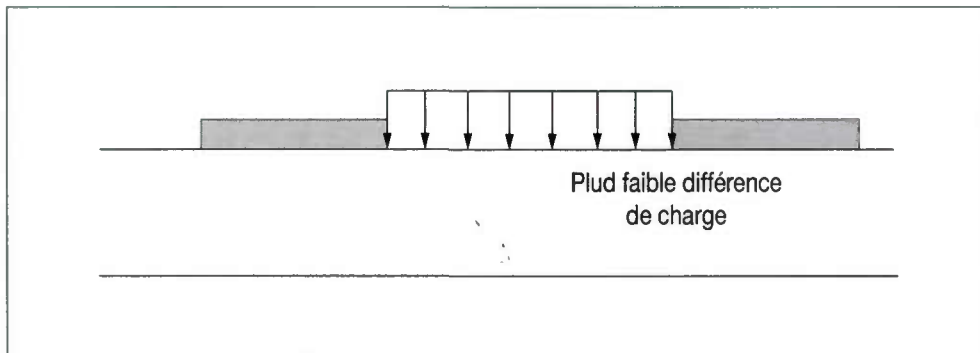


Figure b - Poinçonnement

### ■ Domaine d'application

Sections courantes de remblais et remblais d'accès aux ouvrages d'art. Souvent combinées à d'autres techniques (drains verticaux, construction par étapes, surcharge temporaire)

### ■ Mise en œuvre

Simple terrassements complémentaires. Le compactage n'est nécessaire que si les banquettes servent de piste de chantier ou de voie permanente de desserte.

### ■ Contrôle de qualité

Semblable à celui d'une section courante de remblai.

### ■ Avantages et inconvénients

Nécessite des emprises et volumes de remblais supplémentaires.

Pas d'effets directs sur les tassements.

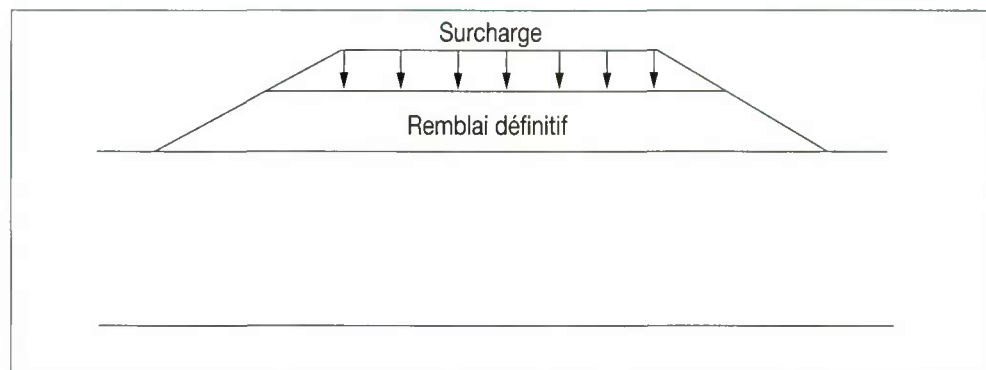
Réalisation par une entreprise générale.

## ANNEXE 3 • Surcharge temporaire

### ■ Description et principe de fonctionnement

L'application d'une surcharge temporaire permet de diminuer le tassement postérieur à la mise en service du remblai, mais au détriment de sa stabilité pendant la construction. En augmentant la charge appliquée au sol, on crée un tassement final plus important, dont 60 ou 80% peuvent représenter le tassement total du remblai à construire. Le temps nécessaire pour atteindre la déformation finale du sol sous le remblai est donc réduit.

Le dimensionnement doit être confié à un ingénieur géotechnicien.



### ■ Domaine d'application

Traitement des problèmes de tassement après la mise en service du remblai. Souvent associé à des drains verticaux.

### ■ Mise en œuvre

Travaux de terrassements classiques. Le compactage de la surcharge n'est en général pas nécessaire.

### ■ Contrôle de qualité

Mesure et analyse des tassements au cours du temps.

### ■ Avantages et inconvénients

Entreprise générale.

Coût des matériaux variable.

Durée comprise souvent entre quelques mois et un an.

## ANNEXE 4 • Remblais allégés

### ■ Description et principe de fonctionnement

La réduction du poids du remblai permet de diminuer les tassements et d'améliorer la stabilité.

Les densités des matériaux légers utilisables en remblai sont très variées :

- presque zéro pour les buses, cadres et dalots,
- 0,02 pour le polystyrène expansé et les matériaux alvéolaires (0,1 pour le calcul),
- 0,5 pour les blocs constitués de déchets agglomérés de matières plastiques (Plastbloc),
- 0,5 à 1 pour les schistes ou l'argile expansés,
- 0,5 à 1 pour les pneus usagés (Pneusol, Pneurésil, etc.),
- 0,6 pour le béton cellulaire léger,
- 0,8 à 1 pour le bois (écorce, sciure),
- 1 à 1,4 pour les cendres volantes et le laitier.

Le choix des matériaux est lié à l'allègement désiré, qui dépend de l'analyse géotechnique du site. Ce travail doit être confié à un spécialiste de géotechnique.

### ■ Domaine d'application

Traitement localisé de problèmes de stabilité et/ou de tassements :

- remblai d'accès à un pont déjà construit,
- élargissement d'une route,
- réparation d'un glissement de terrain,
- limitation du poids du remblai sur une buse ou un ouvrage enterré.

### ■ Mise en œuvre

Chaque matériau a une procédure de mise en œuvre particulière. Outre la mise en place du matériau léger lui-même, des mesures de préparation du site, de séparation des matériaux, de confinement latéral, de protection contre certaines agressions et de couverture peuvent être nécessaires.

### ■ Contrôle de qualité

Contrôle du respect des recommandations de mise en œuvre.

Vérification des produits utilisés.

Vérification de l'effet de l'allègement.

### ■ Avantages et inconvénients

Certains procédés sont onéreux.

La mise en œuvre peut être très rapide.

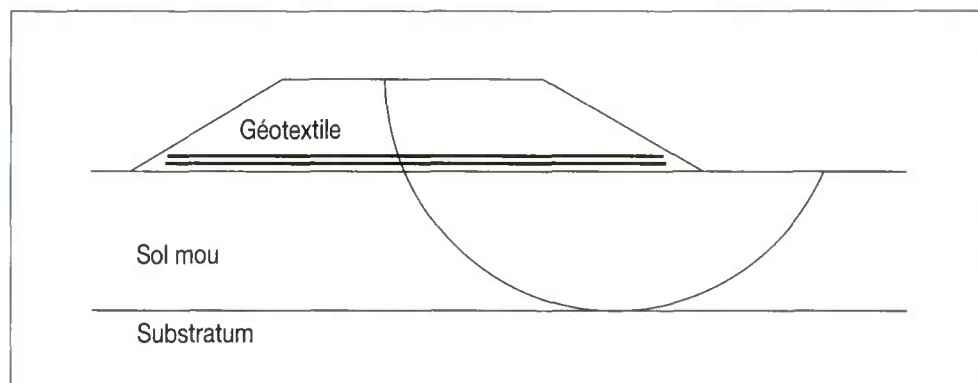
Travaux exécutés par une entreprise générale.

## ANNEXE 5 • Renforcement par géosynthétiques

### ■ Description et principe de fonctionnement

La mise en place d'une ou plusieurs nappes de géotextiles ou de géogrilles à la base du remblai permet d'augmenter sa résistance à la traction et d'améliorer sa stabilité vis-à-vis de ruptures circulaires. On peut donc augmenter la hauteur de remblai mise en œuvre à chaque phase de chargement, sous réserve des conditions de poinçonnement du sol. Le géotextile a pour effet annexe de rendre plus uniformes les tassements du sol sous le remblai.

Le choix du géotextile et les calculs de dimensionnement (résistance, ancrage latéral, stabilité du remblai) doivent être confiés à un spécialiste.



### ■ Domaine d'application

Traitement localisé de l'instabilité du remblai.

### ■ Mise en œuvre

Les nappes de géotextile sont placées au niveau prescrit au cours de la construction du remblai.

### ■ Contrôle de qualité

Contrôle de la conformité au projet (nombre et position des lacs de géotextiles).  
Contrôle du géotextile (résistance à la traction, déformabilité).

### ■ Avantages et inconvénients

Optimisation délicate du renforcement.

Amélioration de la résistance à la rupture circulaire, mais pas au poinçonnement.

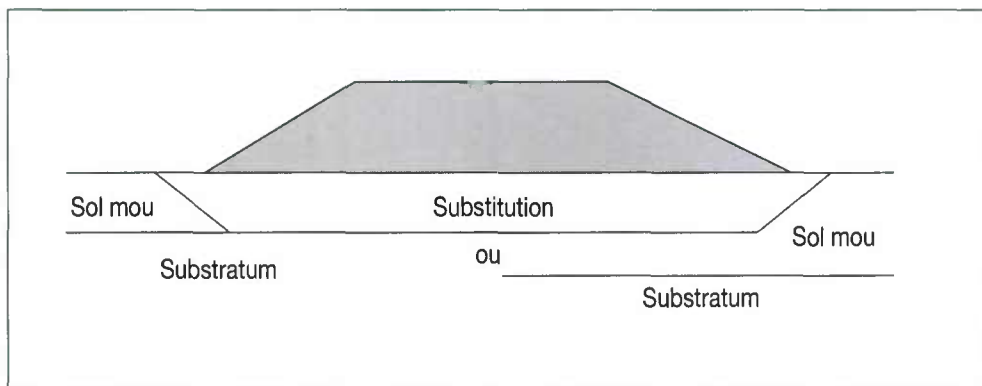
Entreprise générale.

## ANNEXE 6 • Substitution du mauvais sol

### ■ Description et principe de fonctionnement

La substitution consiste simplement à excaver le mauvais sol et à le remplacer par de bons matériaux d'apport compactés. Elle est plus difficile à mettre en œuvre sous l'eau (cas fréquent dans les tourbes) et est limitée en pratique à des profondeurs de quelques mètres. D'autre part, elle est contraignante vis-à-vis de l'environnement (nécessité de trouver des emprunts et des lieux de dépôt).

Le remplacement de tout ou partie du sol compressible par un matériau plus résistant et moins déformable élimine tout ou partie des problèmes de tassement et de stabilité.



### ■ Domaine d'application

Sites où une couche proche de la surface est responsable d'une part importante des tassements et de l'instabilité. Le domaine privilégié d'application de cette technique dans le domaine routier est la présence en surface de sols organiques dont les déformations de fluage sont importantes et néfastes au niveau de la chaussée.

### ■ Mise en œuvre

#### • Substitution hors d'eau :

Excavation des matériaux compressibles et remplacement par de bons matériaux insensibles à l'eau, compactés par couche au rouleau

#### • Substitution sous l'eau :

Excavation à la pelle mécanique ou à la dragline. Le compactage commence lorsque le remblai sort de l'eau. Le matériau de remblai ne doit pas comporter de fraction fine.

### ■ Contrôle de qualité

Contrôle de la qualité des matériaux d'apport.

Contrôle de la qualité du compactage.

Surveillance de la géométrie réelle de l'excavation.

### ■ Avantages et inconvénients

Procédé efficace mais coûteux (volumes importants de sols à évacuer et de bons matériaux à apporter).

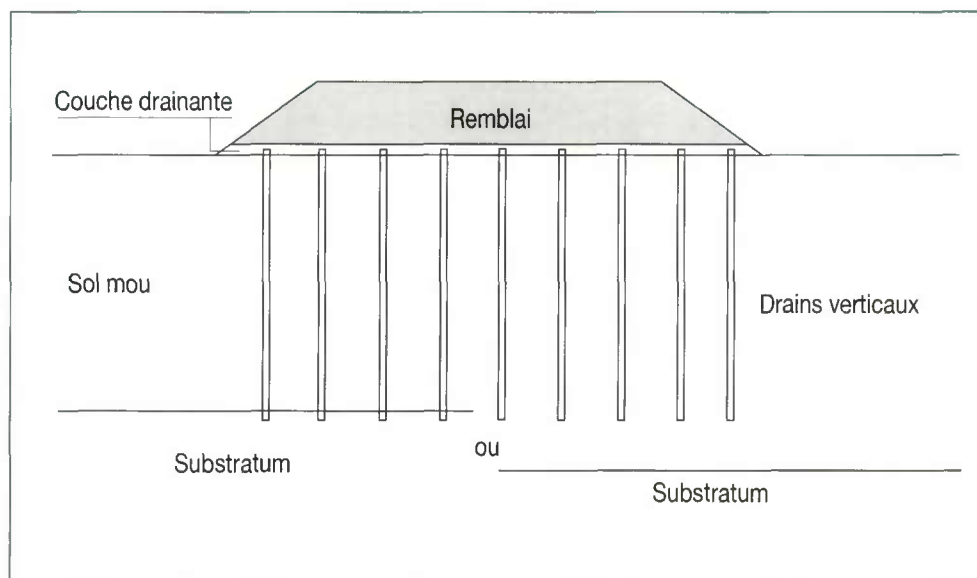
Nécessité de trouver un emprunt et un lieu de dépôt.

Entreprise générale.

## ANNEXE 7 • Drains verticaux

### ■ Description et principe de fonctionnement

Cette technique est utilisée pour accélérer les tassements de consolidation des sols fins saturés de faible perméabilité. La durée de la consolidation des sols est proportionnelle au carré de la distance de drainage. L'introduction de colonnes verticales drainantes dans un massif de forte épaisseur permet de raccourcir fortement cette distance de drainage et de contrôler ainsi les vitesses de consolidation. Les drains verticaux ont été initialement exécutés en sable. Les drains plats préfabriqués sont en général moins onéreux actuellement. L'eau sortant des drains doit être évacuée sous le remblai (couche drainante). Cette technique n'a d'effet que sur la vitesse de tassement (le tassement doit être créé par ailleurs).



### ■ Domaine d'application

Couches d'argile ou de limons compressibles de 3 à 50 m de profondeur. Pour les sols organiques, le fluage doit être pris en compte spécifiquement dans les études de faisabilité.

Les drains verticaux sont souvent associés à des surcharges provisoires. Ils sont en pratique toujours considérés comme indispensables à la consolidation atmosphérique.

### ■ Mise en œuvre

#### A. Drains préfabriqués

Les drains (plats de 10 cm de largeur et de quelques millimètres d'épaisseur ou cylindriques de 5 cm de diamètre, en général) sont foncés à l'intérieur d'un mandrin métallique actionné par un porteur de type pelle hydraulique ou sur chenilles. Les drains comportent une âme qui permet à l'eau de s'écouler vers l'extérieur, avec ou sans filtre géotextile. Ils doivent avoir une capacité de décharge suffisante (15 m<sup>3</sup>/an au minimum). Dans les sols mous, le fonçage est statique. Pour traverser des couches intermédiaires de sable, on recourt au vibrofonçage.

### ***B. Drains de sable***

Les drains de sable, de 20 à 50 cm de diamètre en général, peuvent être réalisés à la tarière creuse, par lançage ou par battage d'un tube fermé, que l'on remplit ensuite de sable.

#### **■ Contrôle de qualité**

Les contrôles portent sur l'intégrité des drains lors de leur mise en œuvre, sur la perméabilité et l'épaisseur de la couche drainante, sur le relevé détaillé des longueurs de chaque drain, sur le tassement de surface et, pour les projets délicats, sur le tassement en profondeur et les pressions interstitielles. Les courbes de tassement peuvent être analysées pour contrôler efficacement le déroulement de la consolidation.

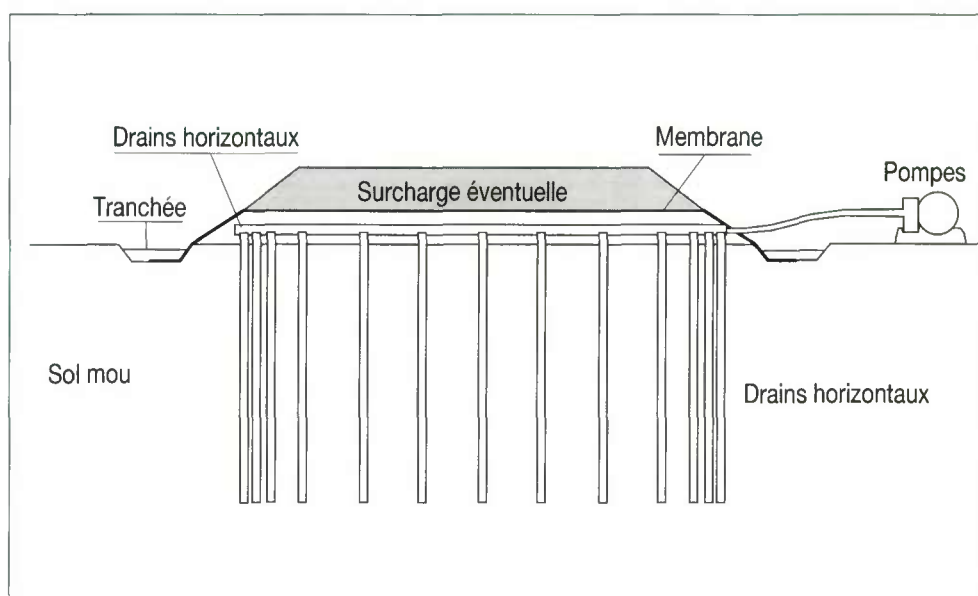
#### **■ Avantages et inconvénients**

Les drains doivent être mis en place par une entreprise spécialisée.

## ANNEXE 8 • Consolidation atmosphérique

### ■ Description et principe de fonctionnement

Un vide partiel est appliqué par pompage sous une membrane posée à la surface du sol. Les pompes sont connectées à un réseau de drainage horizontal et à un réseau de drains verticaux. La réduction progressive de la pression interstitielle à contrainte totale constante augmente les contraintes effectives dans le sol. Ce chargement est équivalent à 4 mètres de remblai, au maximum. On réduit ainsi les délais de consolidation sans risque d'instabilité du sol sous la charge appliquée



### ■ Domaine d'application

Traitement localisé dans des zones de sols très mous interdisant le chargement par remblai. Peut être combiné à un chargement classique par remblai.

### ■ Mise en œuvre

La technique nécessite l'exécution d'un réseau de drains verticaux, avec une couche drainante horizontale comportant des drains horizontaux reliés au système de pompage, la pose d'une membrane étanche et la création d'une dépression sous la membrane au moyen de pompes spéciales. La présence en surface d'une couche drainante sous la nappe peut limiter l'emploi du procédé.

### ■ Contrôle de qualité

Suivi du comportement du sol pendant le pompage (tassement, pression interstitielle). Contrôle de la dépression sous la membrane.

### ■ Avantages et inconvénients

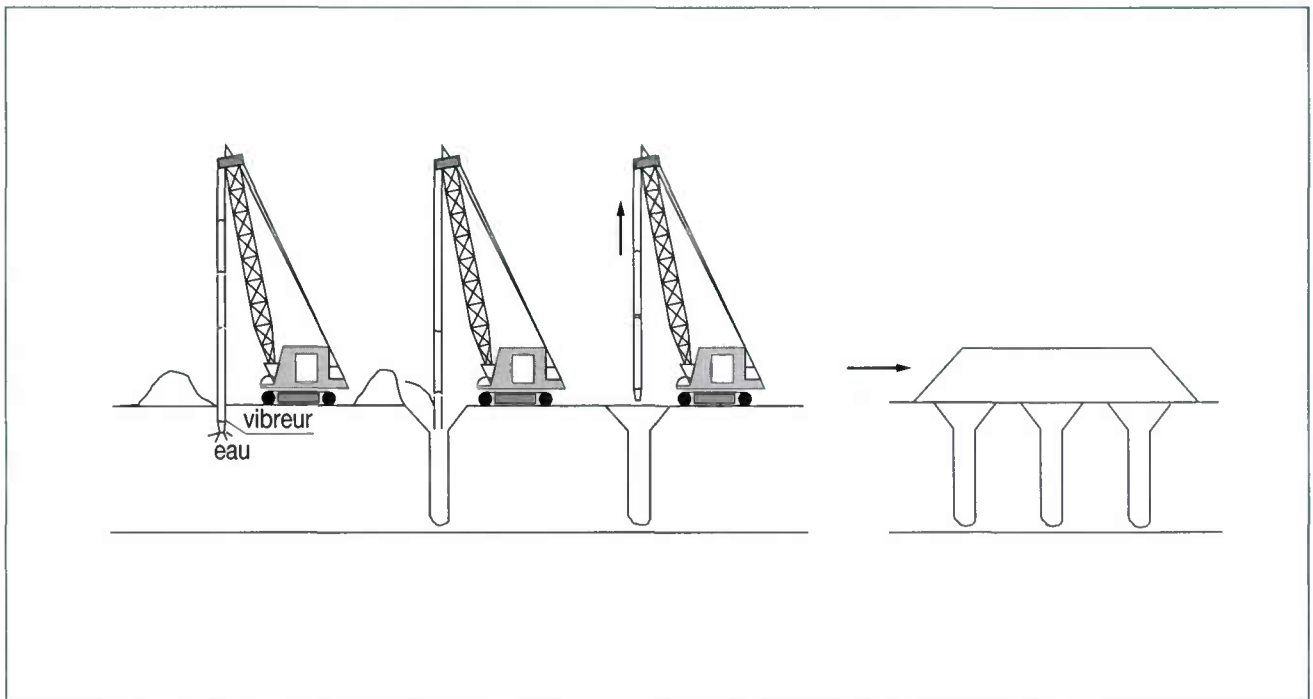
Pas de risque d'instabilité sous le seul chargement atmosphérique. Peut être combiné à un chargement par remblai. Entreprise spécialisée. Charge limitée à 80 kPa. Adaptable aux propriétés des sols sur le site (densité du maillage de drains verticaux).



## ANNEXE 9 • Colonnes ballastées

### ■ Description et principe de fonctionnement

Un réseau de colonnes de ballast compacté est constitué dans le sol au moyen d'une aiguille vibrante ou d'un tube battu pilonné. Ces colonnes agissent comme points de renforcement du sol mou. Elles améliorent la stabilité et diminuent les tassements en reportant une partie de la charge sur le substratum. Elles servent aussi de drains verticaux.



### ■ Domaine d'application

Fondations de bâtiments et de réservoirs. Zones de transition entre points durs (ouvrages fondés sur pieux) et sections courantes de remblai.

### ■ Mise en œuvre

Aiguille vibrante ou tube battu pilonné, porté par une pelle sur chenilles. Du ballast 20/40 à fort angle de frottement est incorporé dans le forage et compacté par le vibreur. On procède par passes successives en remontant le vibreur pour former des colonnes dont le diamètre est généralement compris entre 60 et 120 cm.

### ■ Contrôle de qualité

Contrôle des paramètres de mise en œuvre : volume du ballast, énergie de vibration. Contrôle des caractéristiques mécaniques des colonnes au pénétromètre. Essais de chargement de colonnes.

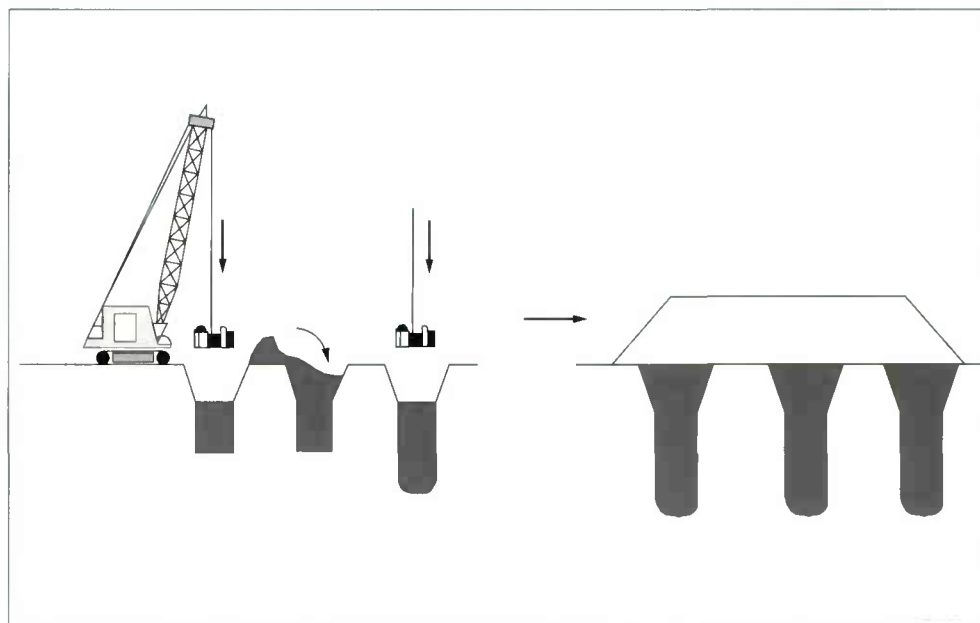
### ■ Avantages et inconvénients

Profondeur de traitement limitée à 15 mètres environ. Technique assez onéreuse (ballast et exécution). Réalisation par une entreprise spécialisée.

## ANNEXE 10 • Plots ballastés pilonnés

### ■ Description et principe de fonctionnement

La création de larges inclusions de bon matériau compacté à travers la couche molle permet de limiter les tassements et d'améliorer la stabilité. Les colonnes servent aussi de drains. Ces colonnes sont créées par pilonnage.



### ■ Domaine d'application

Remblais en environnement dégagé, sur des sols mous de 6 à 7 m de profondeur.

### ■ Mise en œuvre

Mise en œuvre par pilonnage au moyen d'un atelier de compactage dynamique : pelle sur chenilles levant une masse d'une quinzaine de tonnes. Les plots sont constitués de matériau granulaire d'apport et atteignent des profondeurs de 7m pour des sections de 4 à 5 m<sup>2</sup>.

### ■ Contrôle de qualité

Contrôle des paramètres d'exécution et vérification par essais in situ des caractéristiques mécaniques obtenues.

### ■ Avantages et inconvénients

Méthode économique sur des surfaces importantes seulement (coût de mobilisation du matériel).

Nécessite un environnement peu sensible aux vibrations.

Profondeur de traitement limitée à 6 ou 7 mètres.

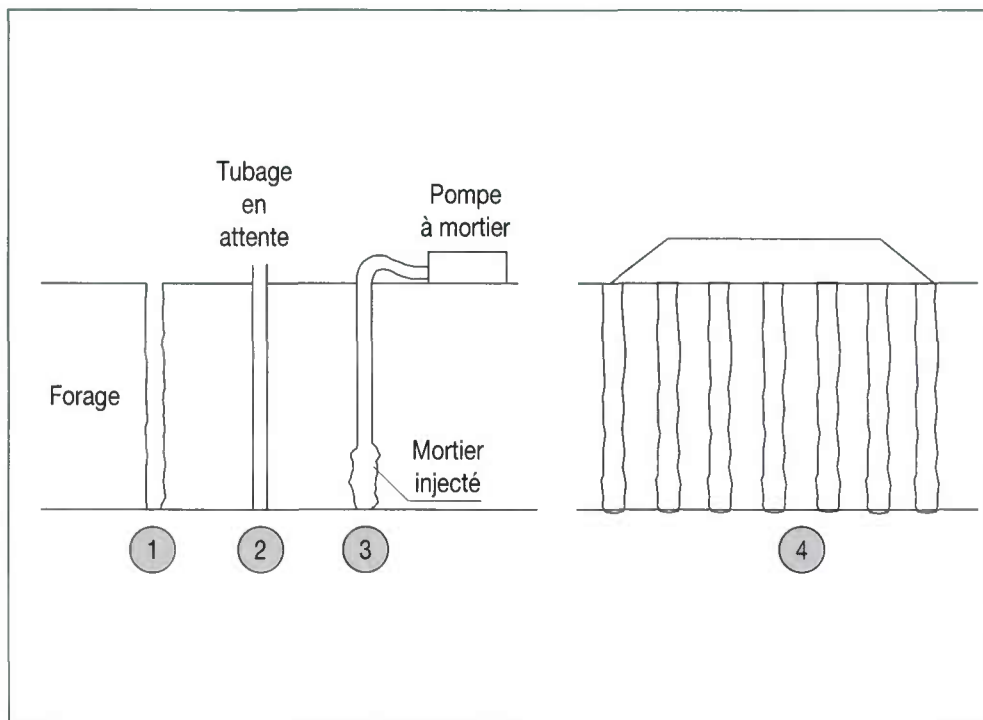
Emploi possible d'un matériau de récupération : matériaux de démolition triés, découverte de carrière, etc.

Entreprise spécialisée.

# ANNEXE 11 • Injection solide (compactage statique horizontal)

## ■ Description et principe de fonctionnement

Le procédé consiste à introduire en force dans le sol, par injection sous pression dans un forage tubé de petit diamètre, un mortier très visqueux. Par sa consistance, ce mortier ne peut imprégner le sol ni claquer le terrain. Le sol va donc être refoulé et comprimé latéralement. La prise du mortier crée ensuite des colonnes verticales plus rigides. On combine donc un effet de renforcement au droit de chaque colonne avec une compression de la masse du sol. Les taux d'incorporation ne dépassent en général pas 5 à 6% du volume traité.



## ■ Domaine d'application

Renforcement des sols sous les bâtiments et les ouvrages.  
Traitement localisé sous les remblais linéaires.

## ■ Mise en œuvre

Forage tubé de petit diamètre, puis injection sous pression d'un mortier visqueux.

## ■ Contrôle de qualité

Contrôle des paramètres d'exécution (pression d'injection, volume injecté, consistance du mortier).

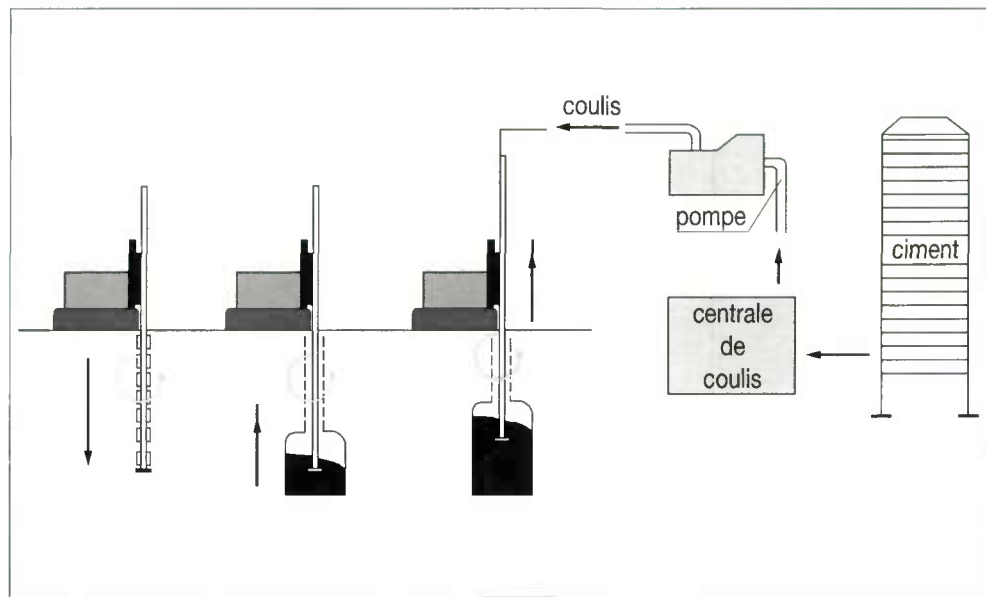
## ■ Avantages et inconvénients

Technique onéreuse pour les remblais.  
Entreprise spécialisée.

## ANNEXE 12 • Colonnes de mortier sol-ciment réalisées par jet

### ■ Description et principe de fonctionnement

Ce procédé utilise un jet de fluide à haute pression pour déstructurer le terrain et le mélanger à un coulis de ciment. La prise du ciment dans le sol injecté crée des colonnes de mortier sol-ciment à fortes caractéristiques mécaniques. Ces colonnes reportent en profondeur une partie des charges dues au remblai, ce qui améliore la stabilité et diminue le tassement final.



### ■ Domaine d'application

Sols compressibles de toutes granulométries.  
Toutefois, emploi limité par le coût.

### ■ Mise en œuvre

Une centrale de fabrication du coulis (eau + ciment), une pompe à haute pression (400 bars) reliée à la machine de forage sur chenilles.  
Une colonne est réalisée en deux opérations : forage vertical de petit diamètre, puis injection par la base du train de tiges à la remontée.

### Contrôle de qualité

Des colonnes d'essai permettent d'ajuster les paramètres d'exécution : composition du coulis, volume du coulis par colonne.  
Enregistrement des paramètres d'exécution.  
Carottage de colonnes, écrasement en laboratoire d'éprouvettes de béton de sol.  
Découverte de colonnes à la pelle mécanique.

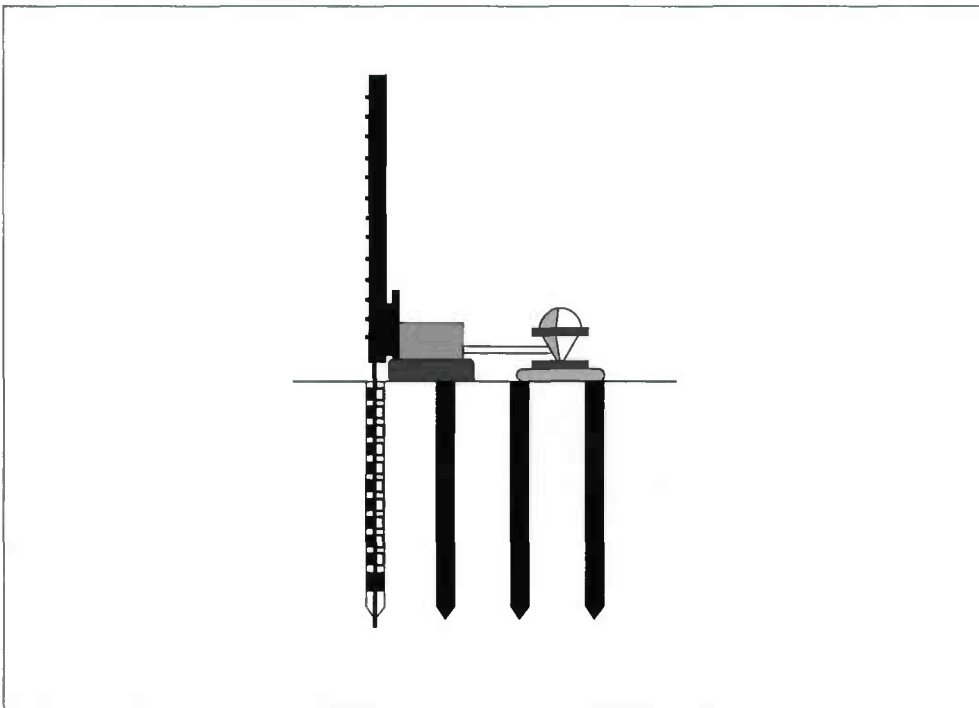
### Avantages et inconvénients

Technique onéreuse et de mise en œuvre délicate.  
Entreprise spécialisée.

# ANNEXE 13 • Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment

## ■ Description et principe de fonctionnement

Cette technique, applicable aux argiles molles peu consistantes (cohésion de l'ordre de 10 à 20 kPa), consiste à mélanger le sol en place avec de la chaux vive ou du ciment au moyen d'une machine de forage à tarière adaptée. On obtient ainsi des colonnes dont la résistance permet d'améliorer la stabilité et de réduire les tassements.



## ■ Domaine d'application

Fondations de bâtiments. Zones de transition entre points durs et sections courantes de remblai. Soutènements d'excavations.

## Mise en œuvre

Machine de forage équipée d'une tarière spécifique.

## Contrôle de qualité

Contrôle du volume de chaux ou de ciment incorporé. Vérification des caractéristiques mécaniques des colonnes. Pour les sols organiques, des problèmes de prise du liant sont possibles. Il convient de réaliser un nombre suffisant d'essais de convenance, des contrôles en cours de chantier et des adaptations éventuelles des dosages en cours de travaux.

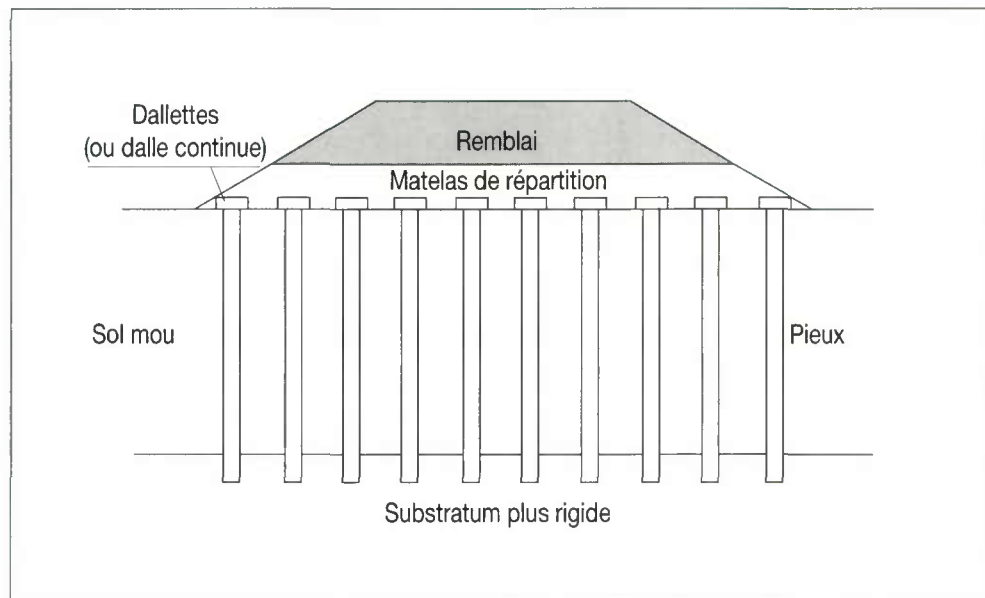
## Avantages et inconvénients

Technique peu courante.  
Entreprise spécialisée.

## ANNEXE 14 • Remblais sur inclusions rigides

### ■ Description et principe de fonctionnement

Les charges apportées par le remblai sont transmises au niveau du substratum rigide, par l'intermédiaire de pieux disjoints, surmontés chacun d'une dalle destinée à reporter sur le pieu le poids d'une partie du remblai. Cette technique permet ainsi d'améliorer la stabilité et de réduire les tassements.



### ■ Domaine d'application

Remblais d'accès à des ouvrages fondés sur pieux.

Zones localisées où les tassements doivent être strictement limités à quelques centimètres.

### ■ Mise en œuvre

Tous les types classiques de pieux peuvent être envisagés, y compris des micropieux. Le choix dépend de la nature des sols compressibles à traverser. Les pieux sont usuellement surmontés de dalles disjointes en béton armé, servant à assurer le report des charges du remblai. Une dalle continue est parfois réalisée. Une nappe de géotextile peut être noyée dans le remblai au dessus des dallettes pour constituer un matelas de répartition des charges sur les pieux.

### ■ Contrôle de qualité

Techniques usuelles de contrôle des pieux : enregistrement des paramètres de forage ou de fonçage, auscultation dynamique des pieux (par réflexion ou par impédance).

### ■ Avantages et inconvénients

Procédé facile à mettre en œuvre et efficace.

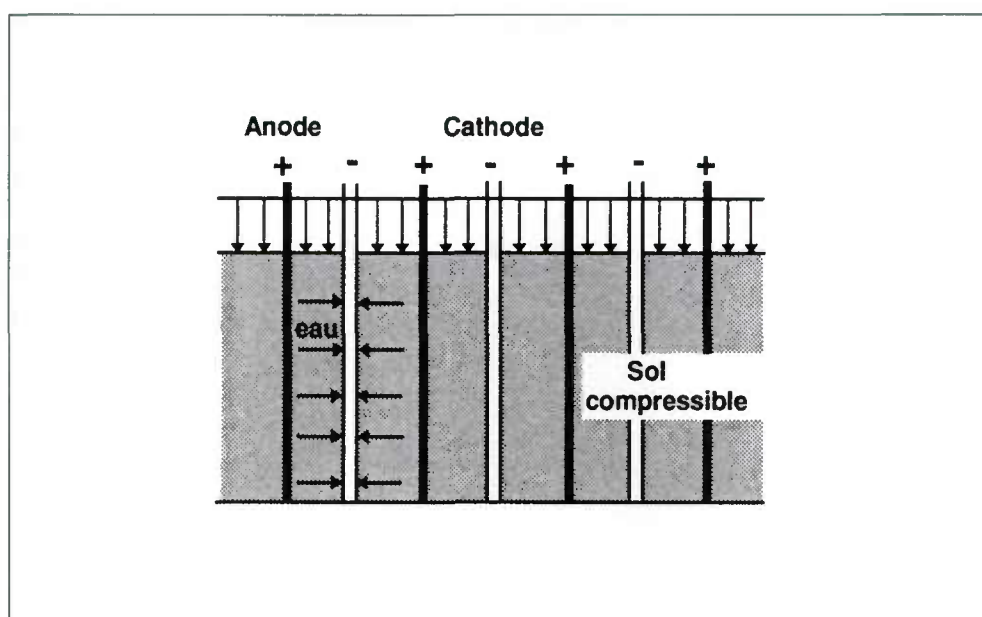
Calcul complexe mais fiable.

Technique onéreuse. Entreprise spécialisée.

## ANNEXE 15 • Electro-osmose

### ■ Description et principe de fonctionnement

Un réseau d'anodes et de cathodes (tubes creux) est placé selon un maillage régulier dans le massif de sol à traiter (figure ci-dessous). Une différence de potentiel est appliquée entre les anodes et les cathodes et provoque un écoulement de l'eau vers les cathodes, où elle est évacuée. Cet écoulement produit une diminution de la teneur en eau moyenne dans le sol et donc un tassement et une augmentation de la résistance au cisaillement.



### ■ Domaine d'application

L'électro-osmose et des variantes (électro-injection) ont été utilisées sur quelques chantiers pour stabiliser des fondations ou des remblais difficiles d'accès et que l'on ne pouvait traiter par des méthodes classiques. L'expérience montre que l'électro-osmose n'a d'effet significatif que sur des sols de perméabilité suffisamment faible ( $< 10^{-6}$  m/s), dont les particules sont majoritairement limoneuses.

### ■ Mise en œuvre

Installation des anodes et des cathodes. Alimentation électrique continue de forte puissance. Entretien des cathodes et anodes (dissolution).

### ■ Contrôle de qualité

Mesure continue de la différence de potentiel entre anodes et cathodes. Mesures de teneur en eau et de cohésion non drainée dans le sol.

### ■ Avantages et inconvénients

La méthode est efficace mais coûteuse. Les paramètres et les effets du traitement sont difficiles à prévoir avant le chantier.

**Page laissée blanche intentionnellement**



Chapitre

# 4

## Contrôle du chantier et de l'ouvrage fini



A 837 - Saintes-Rochefort - Zone de Rochefort-Tonnay-Charente - Autoroute en cours de construction - Scétauroute-ASF

**Page laissée blanche intentionnellement**

## 4.1 INTRODUCTION

Le suivi des chantiers de remblais sur sols compressibles s'effectue à deux niveaux : celui de la construction du remblai proprement dit, qui diffère peu du contrôle des terrassements hors zone compressible, et celui du comportement du sol de fondation, qui peut poser des problèmes de stabilité ou de déformations excessives. Une fois la construction achevée, les problèmes de stabilité et de compactage disparaissent, mais les tassements et déplacements horizontaux du sol compressible vont se prolonger pendant des semaines, des années, voire des dizaines d'années et des mesures de déplacements pourront être nécessaires pendant une durée assez longue.

Le contrôle des terrassements est défini dans le Guide technique sur la réalisation des remblais et des couches de forme (« GTR », 1992) et n'est pas évoqué ici.

Pour les contrôles à effectuer sur le sol de fondation, pendant et après la construction, ce chapitre donne des indications sur les objectifs à poursuivre, les matériels disponibles et les contraintes que les mesures introduisent dans la conduite du projet.

## 4.2 CONTRÔLE DE LA CONSTRUCTION DU REMBLAI

### 4.2.1 Objectifs des mesures de contrôle de la construction

Les mesures effectuées lors de la construction des remblais sur sols compressibles ont deux objectifs principaux :

- le premier est de contrôler, par la mesure du tassement de la surface du terrain naturel sous le remblai, les volumes de matériaux mis en place ;
- le second objectif est de valider les résultats des études géotechniques et des calculs de dimensionnement et d'apporter les informations nécessaires à la conduite du chantier.

Les mesures effectuées dans le cas des remblais d'essai (chapitre 2.4) sont interprétées pour leur part dans le cadre des études géotechniques.

### 4.2.2 Plans d'instrumentation types et programmes de mesures

Suivant l'importance des problèmes, la nature des incertitudes et les objectifs précis fixés à l'instrumentation, le type, le nombre et la position des instruments de mesures peuvent être très variable. La figure 4.1 montre quatre dispositions courantes d'appareils de mesure pour des remblais sur sols compressibles. Dans le cas de remblaiement de zones étendues, on peut reproduire les dispositions indiquées sous l'axe des remblais de la figure 4.1.

Les appareils de mesure utilisés classiquement sous les remblais sont :

- les jalons et repères topographiques de surface,
- les tassomètres de surface ou de profondeur (mesure ponctuelle du déplacement vertical),
- les tassomètres multipoints (mesure du tassement de plusieurs points sur une même verticale),
- les piézomètres fermés, pour la mesure des pressions interstitielles,
- les tubes inclinométriques, dans lesquels on descend une sonde de mesure d'inclinaison.

Figure 4.1 – Schémas types d'instrumentation pour les remblais sur sols compressibles

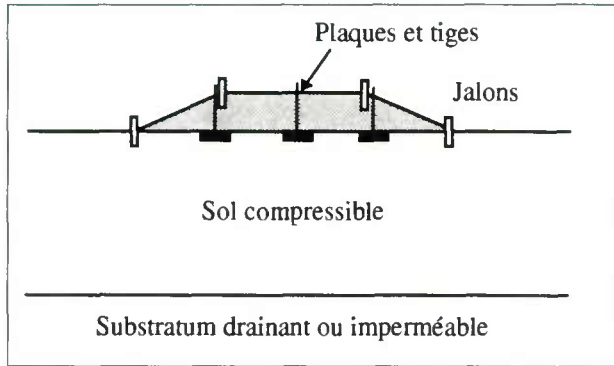


Figure 4.1.a – Contrôle des tassements par plaques et jalons.

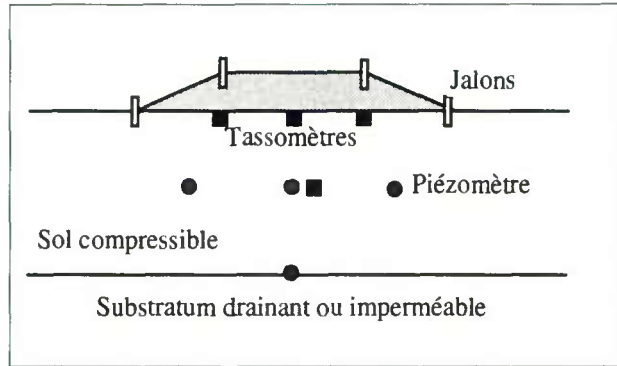


Figure 4.1.b – Contrôle d'un remblai sur sol homogène.

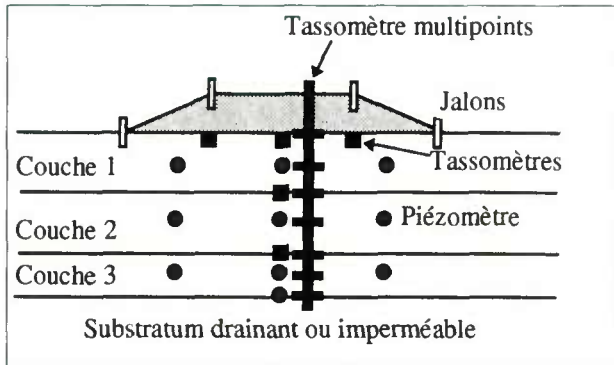


Figure 4.1.c – Contrôle d'un remblai sur massif de sols multicouches.

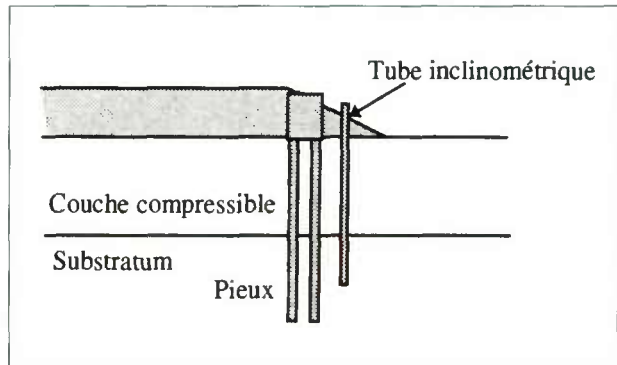


Figure 4.1.d – Contrôle des déplacements horizontaux à proximité de fondations profondes.

Certaines techniques de construction nécessitent une instrumentation particulière. Dans le cas des drains verticaux (accélération de la vitesse de tassement et de consolidation du sol), l'instrumentation type est représentée sur la figure 4.2.

Figure 4.2 – Schémas types d'instrumentation pour les remblais sur drains verticaux.

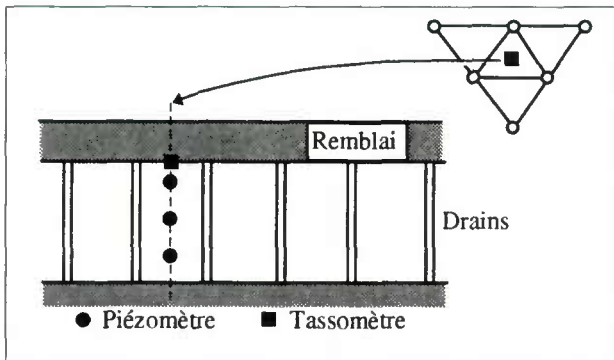


Figure 4.2.a – Remblai sur sol homogène

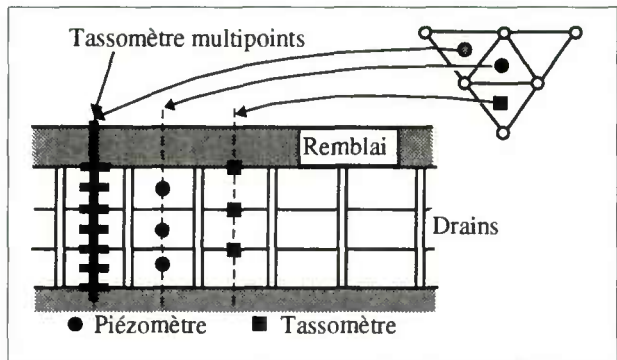


Figure 4.2.b – Remblai sur sol multicouches.

Les particularités des différentes techniques de mesure sont indiquées dans la section 4.4 de ce chapitre.

La fréquence des mesures dépend du type de mesure et des objectifs de l'instrumentation. Suivant l'urgence des réactions aux mesures, on peut d'abord opter pour un système de mesure automatique ou pour des mesures discontinues, exécutées selon un programme de mesure défini au préalable. Toutefois, tous les programmes de mesure doivent respecter un certain nombre de règles, dont le respect facilite l'interprétation des résultats. Ces règles sont les suivantes :

- tous les appareils de mesure doivent être mis en place avant le début des travaux (une plate-forme de travail peut être nécessaire) et faire l'objet de plusieurs « mesures de zéro » destinées à définir l'état du sol avant le chargement ;
- la construction des remblais se fait généralement par couches, séparées par des pauses de quelques heures à quelques jours... Il est indispensable d'effectuer des mesures juste avant et juste après chaque phase de mise en place du remblai à la verticale de l'appareil de mesure, de noter avec soin la succession des phases de la construction et, si la réponse aux questions posées en dépend, de faire aussi une série de mesures sous chaque charge constante successive ;
- en général, il est préférable d'effectuer toutes les mesures au même moment (en pratique souvent le même jour) pour disposer d'une série d'images cohérentes des états successifs du sol et du remblai.

### 4.2.3 Interpréter et utiliser les résultats des mesures

L'interprétation des résultats des mesures de tassements, déformations horizontales et pressions interstitielles doit être effectuée par un spécialiste de géotechnique. Suivant les objectifs de l'instrumentation et les questions précises posées lors de l'élaboration du projet, on pourra utiliser principalement les amplitudes de tassements ou les courbes d'évolution des tassements au cours du temps ou les relations entre déplacements verticaux et horizontaux ou encore les rapports des incréments de pression interstitielle à l'augmentation de la charge qui les a provoqués.

Les résultats des mesures sont présentés sous différentes formes :

- des courbes d'historique du chargement et des résultats des mesures (Figure 4.3) ;
- des courbes isochrones donnant la distribution dans l'espace des valeurs mesurées d'un même paramètre (pressions interstitielles, tassements, ...) à une date ou heure fixée ;
- des courbes de variation d'un paramètre en fonction d'un autre, par exemple la variation de la surpression interstitielle en fonction de la charge appliquée à la surface du sol (Figure 4.3.d) ou l'évolution du déplacement horizontal maximal en fonction du tassement du remblai.

Ces courbes doivent être mises à jour à chaque nouvelle mesure, analysées et validées par le géotechnicien et transmises au maître d'œuvre avec les commentaires nécessaires. Elles servent à contrôler l'évolution du projet par rapport aux prévisions et à traiter les points d'arrêt prévus dans le plan qualité des travaux.

On dispose à ce jour de méthodes d'analyse fiables pour les résultats des mesures :

- l'analyse du rapport des incréments de pression interstitielle aux incréments de charge correspondants permet de contrôler la stabilité du remblai pendant sa construction ;
- dans le cas des couches de sols compressibles homogènes et de faible épaisseur et

dans celui de l'accélération de la consolidation par des drains verticaux, l'analyse des courbes de tassement au cours du temps (sous charge constante) permet de déterminer le tassement final de consolidation primaire et le coefficient de consolidation moyen des sols compressibles ;

- pour les cas plus complexes, bien étudiés et instrumentés, l'utilisation de programmes de calcul numérique (consolidation unidimensionnelle et calculs bi- et tridimensionnels en éléments finis) permet de recalibrer les valeurs des paramètres de calcul adoptés lors de l'étude géotechnique sur les observations.

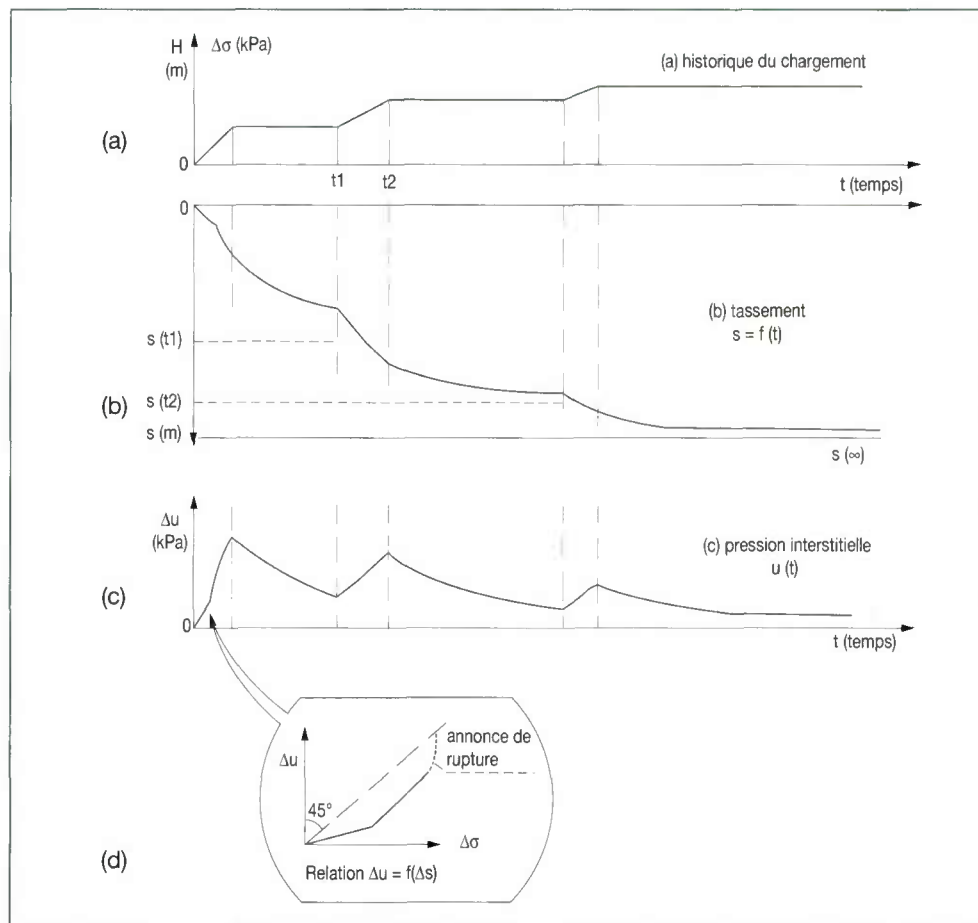
Pour chaque méthode de construction, le plan d'instrumentation est adapté aux incertitudes propres à la méthode choisie et les règles d'analyse peuvent être différentes, sous la responsabilité du géotechnicien.

## 4.3 CONTRÔLE DU COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE FINI

### 4.3.1 Objectifs des mesures effectuées après la construction

Dès la fin de la construction (mise en place de la dernière charge sur les sols compressibles), les risques d'instabilité du remblai passent au second plan et les mesures se limitent au contrôle de l'évolution au cours du temps des tassements, déplacements horizontaux et pressions interstitielles. Un point zéro de l'état des sols et du remblai lors de sa mise en service peut être utile au responsable de l'exploitation et de l'entretien de l'ouvrage.

Figure 4.3 – Courbes de suivi des tassements et pressions interstitielles sous un remblai sur sols compressibles : historique du chargement, tassement au cours du temps, évolution des surpressions interstitielles.



### 4.3.2 Plans d'instrumentation types et programmes de mesure

Les techniques de mesure du comportement de l'ouvrage fini sont les mêmes que pour la phase de construction et le même dispositif d'instrumentation peut souvent être utilisé, s'il n'a pas été détérioré pendant les travaux de construction.

La principale différence avec la période de construction réside dans la fréquence des mesures : on peut souvent se contenter de mesures hebdomadaires puis mensuelles, compte tenu de la vitesse toujours lente des mouvements des sols sous l'ouvrage fini. Par contre, pour ces mesures, la référence à des bases fixes et la maîtrise des incertitudes de la mesure elle-même jouent un rôle beaucoup plus important dans la qualité des mesures et donc dans la fiabilité de leur interprétation.

### 4.3.3 Interpréter et utiliser les résultats des mesures

L'interprétation des mesures effectuées sur l'ouvrage fini se limite le plus souvent à vérifier que les tassements ou les déplacements horizontaux postérieurs à la mise en service restent inférieurs aux valeurs maximales définies lors de la préparation du projet. Cette vérification peut être effectuée par le service chargé de l'exploitation ou par le géotechnicien qui a effectué l'étude géotechnique de l'ouvrage.

En cas de difficultés plus graves, l'ensemble des données disponibles doit être soumis à un géotechnicien expérimenté, qui jugera de la gravité de la situation et évaluera l'évolution ultérieure possible des sols et de l'ouvrage.

## 4.4 MATÉRIELS

La qualité des mesures dépend pour beaucoup de la qualité des matériels de mesure et de la qualité de la pose de ces appareils. La mise en place des appareils de mesure demande une certaine expérience et doit être exécutée conformément aux règles de l'art.

### 4.4.1 Mesures de tassements

Les tassements sont évalués par rapport à un point fixe, qui peut être situé en dehors de la zone compressible, ou sur un repère fixe existant (ouvrage sur pieux, par exemple) ou installé à cet effet (micro-pieu ancré dans le substratum). Des techniques de mesure variées peuvent être utilisées :

- relevé topographique des mouvements de piges installées à la surface du remblai ou du terrain naturel ou de tiges fixées sur des plaques posées sous le remblai ;
- tassomètres ponctuels hydrauliques, pneumatiques ou électriques placés à la surface du terrain naturel, dans le remblai ou à l'intérieur des sols compressibles ;
- tassomètres multipoints à mesure magnétique ou électrique, donnant le tassement de repères disposés sur une verticale ;
- tassomètres continus (profilomètres) permettant de suivre le tassement de la surface du terrain naturel.

Les qualités et inconvénients de ces différents types d'appareils sont indiquées dans le tableau 4.1. En pratique, la précision des mesures est en général de  $\pm 1$  cm.

**TABLEAU 4.1 – DISPOSITIFS DE MESURE DES TASSEMENTS**

TYPE DE TASSOMÈTRE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Piges (plaques et tiges)	Simple, faible coût, lecture directe (topographie)	Protection nécessaire pendant le remblaiement. Associé à topographie
Tassomètres hydrauliques de surface (ponctuels et profilomètres)	Simple, faible coût, robuste, pérenne (> 10 ans), lecture directe	Pose soignée, fuites possibles, point fixe nécessaire à proximité, précision plus faible à long terme
Tassomètres électriques de surface (ponctuels ou profilomètres)	Lecture rapide, facile à automatiser	Mesure indirecte, dérives de zéro, sensibilité à la température, câbles, pérennité incertaine
Repères topographiques	Possibilité de suivre X, Y, Z Matériel très performant	Ne permet pas de suivre les phases de chargement. Intègre la déformation propre du remblai
Piges (repères de profondeur)	Lecture directe	Associé à topographie. Mise en œuvre délicate (ancrage dans le sol). Protection nécessaire pendant le remblaiement
Tassomètres ponctuels de profondeur	Comme capteurs de surface	Comme capteurs de surface
Tassomètres multipoints	Lecture directe	Mise en œuvre délicate. Ancrage, qualité du scellement, protection nécessaire pendant le remblaiement

### 4.4.2 Mesures de déplacements horizontaux

Les déplacements horizontaux du sol peuvent être mesurés en surface au moyen d'extensomètres ou de piges ou repères topographiques et en profondeur par inclinométrie (Tableau 4.2). La plupart des mesures sont effectuées à l'inclinomètre, dans des tubes scellés dans le sol compressible et, sur plusieurs mètres, dans le substratum indéformable. Le choix du coulis de scellement est important et la mise en œuvre doit être soignée. Lorsque toutes les conditions sont respectées, les mesures inclinométriques donnent une erreur sur le déplacement horizontal qui ne dépasse pas 1 cm sur dix mètres.

**TABLEAU 4.2 – DISPOSITIFS DE MESURE DES MOUVEMENTS HORIZONTAUX**

TYPE DE MESURE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Mouvements de surface : - extensomètre	Bonne précision Matériel simple à mettre en œuvre	
Mouvements de surface : - jalons ou repères topographiques	Possibilité de suivre X, Y, Z Matériel très performant	Ne permet pas de suivre les phases de chargement. Intègre la déformation propre du remblai
Mesures en profondeur : - inclinomètre	Bonne précision si l'ancrage en pied est correct	Pose soignée, scellement important. Dérives électroniques classiques (zéro, température) Mesures perturbées par le tassement (flambement des tubes)



### 4.4.3 Mesures de pressions interstitielles

Dans les sols compressibles, on met en place des piézomètres dits « fermés » (par opposition aux tubes piézométriques ouverts, dans lesquels on peut repérer le niveau de l'eau depuis le haut du tube, mais dont les temps de réponse sont très longs). Les piézomètres fermés sont des capteurs de faible volume interne, qui sont mis en place dans des forages, en veillant à éviter tout écoulement d'eau le long du forage. Ces capteurs, de différentes technologies, ont une précision de l'ordre du kilopascal. Le tableau 4.3 indique les avantages et inconvénients des principaux types de capteurs existants.

TABLEAU 4.3 – APPAREILS DE MESURE DES PRESSIONS INTERSTITIELLES		
TYPE DE PIÉZOMÈTRE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Piézomètre hydraulique	Simple, faible coût d'achat, lecture directe	Désaturation fréquente, lecture lente, sensible à la température
Piézomètre pneumatique	Lecture directe. Pas de dérive	Fuites possibles. Risque d'oxydation du capteur
Piézomètre électrique	Lecture rapide, facile à automatiser	Mesure indirecte, dérives de zéro, sensibilité à la température, câbles

Pour l'analyse de l'évolution de la consolidation des sols, on étudie la différence entre la pression mesurée et la pression d'équilibre, en l'absence de remblai. Pour suivre l'évolution de la pression naturelle de l'eau dans le sol, on place un piézomètre en dehors de la zone d'influence du remblai, en complément de ceux que l'on installe sous le remblai.

**Page laissée blanche intentionnellement**

Chapitre

# 5 Assurance de la qualité

*Pour plus de renseignements sur l'organisation générale de la qualité dans les terrassements, se reporter au guide technique SETRA / LCPC sur l'« Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassement ».*



*Autoroute A 89 – Section 1 – Remblai de préchargement de l'OHD 3 – LRPC Bordeaux.*

**Page laissée blanche intentionnellement**

## 5.1

## ÉTABLISSEMENT DU DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

Le dossier de consultation des entreprises (DCE) doit définir la qualité requise dans les pièces du marché. Il doit comprendre le dossier géotechnique complet.

### 5.1.1 Établissement de l'esquisse de Schéma Directeur de la Qualité (SDQ)

Ce document, qui préfigure le Schéma Directeur de la Qualité, est établi en fin d'élaboration du DCE, avant l'appel d'offres.

Concernant l'assurance de la qualité liée à la construction de remblais sur sols compressibles, l'esquisse de SDQ pourra comprendre notamment :

- l'évaluation, éventuellement avec l'aide d'un spécialiste de géotechnique, du niveau atteint au projet par les études de dimensionnement des remblais sur sols compressibles. Cette évaluation aboutira, si c'est utile, à la définition d'un programme d'études d'exécution à spécifier au CCTP pour faire effectuer des études complémentaires par l'entreprise (reconnaitances complémentaires, études de détail des méthodes d'exécution et des contrôles devant y être associés). L'évaluation peut aussi aboutir à la définition d'épreuves de convenance à réaliser sur chantier (par exemple, détermination de l'épaisseur de purge après essai à la pelle mécanique sur chantier), auquel est associé le contrôle extérieur ou plus simplement à renforcer l'instrumentation pour exercer un contrôle extérieur et un pilotage plus interactif du maître d'œuvre ;
- la récapitulation des effets des tassements et éventuels risques de rupture sur le projet (contraintes additionnelles sur les pieux des ouvrages d'art, déformations transmises à des ouvrages adjacents, maîtrise des emprises,...) ;
- la vérification que les délais de consolidation calculés et prévus sont compatibles avec le planning de construction des ouvrages adjacents (ouvrages d'art, en particulier), avec le rappel des éventuels délais partiels d'exécution des remblais sur sols compressibles spécifiés au CCTP ;
- en l'absence de purges généralisées, les dispositions retenues pour suivre l'évolution de la consolidation dès le démarrage du chantier et pendant les différentes phases de celui-ci (nombre, nature et positionnement des capteurs, méthode d'interprétation envisagée pour guider l'avancement des travaux) ;
- dans le cas où l'entreprise à la charge des études géotechniques d'exécution, prévision des prestations de suivi d'ouvrage par le contrôle intérieur ou de l'information de celui-ci pour s'assurer que le comportement des sols compressibles est conforme aux études complémentaires de l'entreprise ;
- dans le cas où le contrôle intérieur est en charge de l'instrumentation, description des dispositions administratives et techniques mises en place pour pouvoir poursuivre ces mesures au-delà de la période de réception des ouvrages.

### 5.1.2 Règlement de consultation (RC)

Le règlement de consultation définit les éléments qui devront figurer dans le « schéma organisationnel du plan d'assurance qualité » (SOPAQ) proposé par l'entreprise. On s'attachera à faire préciser notamment les points suivants pour obtenir une assurance de la qualité sur l'exécution des remblais sur sols compressibles :

- l'organigramme (si possible, nominatif) détaillé de l'entreprise, précisant les missions et délégations de chaque niveau hiérarchique. En particulier, on insistera sur la désignation du technicien en charge du suivi de l'exécution des remblais sur sols compressibles (compétences en géotechnique, expérience,...);
- le programme d'exécution de l'ouvrage, indiquant de façon sommaire la durée prévisionnelle des différentes phases de chantier, en particulier les phases de terrassements et de préchargement éventuel ;
  - si des études d'exécution relatives aux remblais sur sols compressibles sont prévues, indication du bureau d'études de géotechnique envisagé (éventuellement plusieurs noms, si le bureau d'études n'est pas encore choisi), planning et objectifs des études à programmer ;
- des indications sur les procédés d'exécution envisagés pour l'exécution des remblais sur sols compressibles et sur les moyens matériels que l'entreprise compte employer ;
  - l'organisation des contrôles d'assurance qualité qui reviennent à l'entreprise pour le suivi de l'exécution des remblais sur sols compressibles ;
- des indications sur les moyens prévus au niveau du contrôle intérieur (capteurs, méthodes et fréquences de mesures) ;
- la liste des prestations sous-traitées que l'entrepreneur envisage de proposer à l'accord du maître d'ouvrage après la conclusion du marché. Le SOPAQ devra indiquer comment est organisée l'assurance de la qualité des prestations de ces sous-traitants (vis-à-vis desquels l'entrepreneur se trouve dans la même position que le maître d'ouvrage vis-à-vis des entreprises principales) ;
- des indications sur la provenance des principales fournitures et les procédures de contrôle de qualité prévues (matériaux drainants, drains préfabriqués, géotextiles, ...).

Le maître d'œuvre doit compléter le règlement de consultation (RC) par d'éventuels éléments d'information sur le chantier.

### **5.1.3 Cahier des clauses administratives particulières (CCAP)**

Le CCAP doit indiquer que le SOPAQ sera un document contractuel.

### **5.1.4 Cahier des clauses techniques particulières (CCTP)**

Le CCTP indique les exigences techniques relatives au projet.

Au niveau de la qualité, il reprend les éléments connus dans l'esquisse du schéma directeur de la qualité (Esquisse du SDQ), document rédigé par le maître d'œuvre à la fin de l'établissement du projet, mais préalablement à la rédaction du DCE. Les éléments figurant au CCTP seront ceux décidés par le donneur d'ordres (par exemple, la maîtrise de l'extension des purges éventuelles). Il convient en particulier d'y faire figurer les points d'arrêt et éventuellement les points critiques jugés nécessaires pour le contrôle extérieur (on en trouve une liste indicative au § 5.5). Les prestations dont la forme ou le contenu peuvent être discutés avec l'entreprise sans préjudice pour la qualité seront plutôt demandées par le règlement de consultation, pour figurer au SOPAQ.

## V.2

## PRÉPARATION DU CHANTIER

**5.2.1 Plan d'Assurance Qualité (PAQ)**

Le PAQ rédigé par l'entreprise sur la base du SOPAQ et des pièces du marché est modulable car évolutif. Il doit être conforme au SOPAQ et, dans tous les cas, être accepté par la maîtrise d'œuvre.

À titre indicatif, le PAQ de l'entreprise peut être constitué de la manière suivante :

■ **Une note d'organisation générale du chantier**, traitant des points suivants :

- description sommaire des travaux,
- organigramme,
- installation de chantier,
- moyens en matériel,
- moyens en personnel,
- contrôle de la qualité (contrôle intérieur),
- entreprises sous-traitantes,
- principaux fournisseurs,
- liste des points sensibles, points critiques et points d'arrêt,
- programme d'exécution.

■ **Une ou des procédures d'exécution** définissant les moyens et les conditions de réalisation des travaux. Il convient, dans tous les cas, de prévoir une procédure spécifique au PAQ pour définir les méthodes, moyens et délais de réalisation des remblais sur sols compressibles :

- étude géotechnique d'exécution complémentaire éventuelle ;
- mise en œuvre des remblais sur sols compressibles y compris les dispositions spécifiques de contrôle intérieur (personnel, moyens, méthodes, délais, fréquences, traitement des résultats, ...). Il est important de traiter de la suite qui sera réservée aux principales anomalies susceptibles de se produire en cours d'étude ou de travaux, en particulier pour éviter de poursuivre ceux-ci jusqu'à des désordres irréversibles alors que des signes annonciateurs auraient permis de les éviter ;
- exécution des purges.

■ **Fiches de suivi d'exécution et de résultats** relatives à la réalisation des remblais sur sols compressibles :

- présentation de la reconnaissance géotechnique complémentaire éventuelle,
- résultats des contrôles effectués sur les sols compressibles et les remblais sus-jacents,
- fiche de suivi des purges éventuelles.

**5.2.2 Schéma directeur de la Qualité (SDQ)**

Le SDQ est rédigé par le maître d'œuvre à partir de l'esquisse du SDQ en prenant en compte le (ou les) PAQ du (ou des) entrepreneur(s). Il doit préciser :

- l'organisation de l'encadrement retenue par l'entreprise et la maîtrise d'œuvre pour mener à bien le chantier ;
- le rôle de chacun des intervenants ;

- la consistance des contrôles intérieurs qui sont faits sous la responsabilité de l'entreprise ;
- la consistance du contrôle extérieur exécuté par la maîtrise d'œuvre, c'est-à-dire les tâches de chacun des intervenants de la maîtrise d'œuvre ;
- l'organisation de la communication des résultats et des informations relatifs à la qualité.

Pour chacune des tâches élémentaires de réalisation, il est précisé :

- comment elle est réalisée et par qui,
- dans quel cas elle est réalisée,
- comment et à qui sont diffusés les résultats.

Dans le cas d'un contrôle de conformité, deux types de points sensibles sont définis :

- un point d'arrêt est un point sensible pour lequel un accord formel du contrôle extérieur est nécessaire à la poursuite de l'exécution ;
- un point critique est un point sensible pour lequel il a été décidé d'effectuer un contrôle intérieur à un intervenant, le contrôle extérieur étant formellement informé du moment de son exécution et/ou de son résultat.

### 5.2.3 Plan de contrôle

Le plan de contrôle est établi par le maître d'œuvre et constitue le document d'harmonisation entre le contrôle intérieur et le contrôle extérieur. Il précise les obligations de chacun, notamment en matière d'information réciproque des partenaires. Il prévoit les supports papiers pour la circulation des informations. Il fixe les délais de transmission.

Pour chacune des tâches élémentaires de contrôle, il précise :

- dans quel cadre elle est réalisée (contrôle intérieur ou extérieur),
- comment elle est réalisée, par qui et à quel moment,
- comment les résultats sont utilisés.

## 5.3

## DÉROULEMENT DU CHANTIER

Pendant le déroulement du chantier, la mise en application de plans d'assurance qualité nécessite :

- la vérification de la bonne application de la démarche qualité,
- le traitement des anomalies,
- l'adaptation éventuelle du (ou des) PAQ.

### 5.3.1 Vérification de la bonne application de la démarche qualité

Au cours du déroulement du chantier, le maître d'œuvre et l'entreprise devront s'assurer que la démarche qualité prévue par le SDQ est bien suivie et que les organes de contrôle extérieur et intérieur assurent les tâches qui leur sont assignées. Cette vérification sera faite avec une périodicité adaptée pour pouvoir arrêter au plus tôt des travaux pouvant provoquer des désordres irréversibles.



### 5.3.2 Traitement des anomalies

Une anomalie est une déviation par rapport à ce qui est attendu. Une anomalie justifie une investigation, qui peut déboucher sur la constatation d'une non conformité, d'un défaut ou d'une sur-qualité.

Une « non conformité » est par définition la non satisfaction aux exigences spécifiées (qualité requise). Cette non conformité est un « défaut » lorsque les exigences de l'utilisation prévue ne seront pas satisfaites (qualité d'usage).

Une anomalie ne conduit pas obligatoirement à une non conformité.

L'instruction d'une anomalie ne peut conduire qu'à l'une des solutions suivantes :

- réparation selon les modalités d'une procédure existante ou à créer,
- acceptation en l'état,
- rejet ou démolition.

Le Schéma Directeur de la Qualité (SDQ) doit prévoir les conditions de traitement des anomalies. Ces anomalies sont classées en quatre niveaux :

- **NIVEAU 1** : Anomalie mineure traitable immédiatement dans le cadre du procédé utilisé, dans le respect des procédures. Le traitement de cette anomalie peut éventuellement ne donner lieu qu'à de simples observations sur la fiche de contrôle correspondante établie par l'entreprise.
- **NIVEAU 2** : Anomalie traitable avec une procédure de réparation existante, définie dans la procédure d'exécution « Remblais sur sols compressibles ». L'identification et le traitement de cette anomalie doivent être documentés, soit sur les documents de suivi, s'ils le permettent, soit sur une fiche d'anomalie ouverte à cet effet. La remise en conformité est réglée a priori conformément à la procédure prévue au PAQ à cet effet.
- **NIVEAU 3** : Anomalie pour laquelle aucune procédure de réparation n'existe, mais dont le traitement permettra de reconstituer une qualité équivalente et si possible identique à celle de la conception initiale. Une fiche d'anomalie est ouverte, la procédure de réparation est établie et soumise à l'acceptation du maître d'œuvre, dans le délai fixé au marché. Le contrôle intérieur et, le cas échéant, l'expert géotechnicien de l'entreprise sont impliqués dans la proposition de réparation et éventuellement dans le contrôle de son exécution.
- **NIVEAU 4** : Anomalie mettant en cause le niveau de qualité contractuel, voire son aptitude à satisfaire la qualité d'usage (défaut). Une fiche d'anomalie est ouverte dans les délais fixés au marché, et l'entreprise adresse ses propositions au maître d'œuvre, qui prend sa décision.

La fiche d'anomalie doit comporter :

- le nom de l'initiateur de la fiche et la date d'émission,
- les noms des destinataires,
- les caractéristiques et l'origine de l'anomalie,
- la solution préconisée par l'entreprise pour la remise en conformité et les actions correctives qu'elle envisage de prendre pour éviter le retour de nouvelles anomalies de même nature,
- l'avis du maître d'œuvre,
- les résultats de la remise en conformité,
- les différents visas de l'entrepreneur et du maître d'œuvre.

### **5.3.3 Adaptation éventuelle du (ou des) PAQ**

Le maître d'œuvre et l'entrepreneur devront prévoir la possibilité de modifier ou compléter le PAQ d'origine pour tenir compte de problèmes particuliers de chantier et des éventuels aléas.

Il est nécessaire de prévoir périodiquement des réunions de synthèse relatives à l'assurance de la qualité pour faire le point de l'organisation mise en place et traiter des réajustements souhaitables relatifs à l'édification des remblais sur sols compressibles.

## **5.4**

## **ACHÈVEMENT DU CHANTIER**

### **5.4.1 Réception**

La réception est prononcée au vu des constats et mesures montrant la conformité.

### **5.4.2 Récolement**

Le maître d'œuvre associé à l'entreprise et au maître d'ouvrage constitue le dossier de récolement, qui doit s'intégrer au dossier d'ouvrage. Il doit rendre compte des conditions de réalisation du chantier, notamment :

- de la qualification des fournitures utilisées (drains préfabriqués, matériaux drainants, ...),
- des moyens utilisés, résultats de contrôles et performances obtenues,
- des anomalies éventuelles et de leur traitement,
- etc.

### **5.4.3 Point « zéro » éventuel**

Il correspond à la mesure des caractéristiques de l'ouvrage à la mise en service, que l'on effectue afin de disposer d'une référence pour juger de l'évolution éventuelle de cet ouvrage au cours du temps. Ce sera pour l'essentiel les graphiques d'évolution des tassements et éventuellement des pressions interstitielles dans les sols compressibles. Il convient le plus souvent de prévoir la poursuite de ces mesures au-delà de la réception de l'ouvrage, surtout si les tassements à venir demeurent importants pour maîtriser l'évolution de l'ouvrage.

### **5.4.4 Évaluation**

L'évaluation en fin de chantier est une opération non obligatoire mais très souhaitable. Elle est réalisée par le maître d'œuvre et gagne à être établie de façon contradictoire avec l'entreprise. Elle porte essentiellement sur la comparaison de la réalité du chantier avec les prévisions du projet. On doit en particulier évaluer l'adéquation de l'organisation de l'assurance de la qualité prévue au niveau du projet.

## 5.5

## QUELQUES EXEMPLES DE POINTS SENSIBLES SUSCEPTIBLES D'ÊTRE CLASSÉS EN POINTS D'ARRÊT

TECHNIQUE/PHASE
<b>Fourniture du Plan d'assurance qualité</b>
<b>Construction par étape</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• instrumentation</li> <li>• phasage de montée du remblai</li> </ul>
<b>Banquettes latérales</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• instrumentation</li> <li>• phasage de la construction du remblai</li> </ul>
<b>Renforcement du remblai par géotextile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• instrumentation</li> <li>• agrément du géotextile</li> <li>• agrément de la procédure de mise en œuvre du géotextile</li> <li>• phasage de la construction du remblai</li> </ul>
<b>Remblai allégé</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• agrément de la procédure de mise en œuvre</li> <li>• agrément de la provenance et de la qualité des matériaux</li> </ul>
<b>Colonnes ballastées</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• agrément de la procédure de mise en œuvre</li> <li>• agrément de la provenance et de la qualité des matériaux</li> </ul>
<b>Substitution</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• réception du fond de fouille de la substitution</li> <li>• agrément de la provenance et la qualité des matériaux</li> <li>• agrément de la procédure de compactage du matériau d'apport</li> </ul>
<b>Consolidation atmosphérique</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• instrumentation</li> <li>• suivi des tassements</li> </ul>
<b>Drains verticaux</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• agrément de la procédure de mise en œuvre</li> <li>• instrumentation</li> <li>• couche de matériaux drainants en surface</li> <li>• phasage de la construction du remblai</li> </ul>
<b>Surcharge temporaire</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• instrumentation</li> <li>• enlèvement de la surcharge</li> </ul>

**Page laissée blanche intentionnellement**

Chapitre

# 6

## Aide-mémoire



*Remblai d'accès au pont sur le oued (Drader au Maroc) – Allègement au moyen de buses – LCPC*

**Page laissée blanche intentionnellement**

Cet aide-mémoire a pour objet de rappeler au maître d'œuvre les différents points à ne pas oublier pour les études et pour les travaux de construction de remblais sur sols compressibles.

## 6.1

# PARTICULARITÉS DES REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES

### 6.1.1 Pour les études

#### ■ 6.1.1.a Sections courantes du remblai

- *Délais de réalisation des études*
  - prévoir des marges de sécurité dans les délais d'études
- *Contraintes géométriques*
  - si l'on doit respecter une cote NGF fixée pendant toute la durée de vie de l'ouvrage (par exemple, un niveau de crue), prévoir une marge de sécurité ;
  - prendre en compte le fluage dans le dimensionnement du projet.
- *Contraintes d'environnement*
  - prévoir les incidences sur les structures existantes (bâti, ligne de chemin de fer, ouvrage d'art existant) et éloigner au maximum les remblais des structures sensibles ;
  - en cas d'élargissement de remblais existants, se préoccuper du déboisement et du rejet des eaux.
- *Niveau de confort de l'ouvrage*
  - uni du profil en long selon l'ouvrage : définir avec le maître d'ouvrage les valeurs limites acceptables des tassements différentiels.
- *Sécurité*
  - prévoir l'évolution dans le temps des profils en travers ;
  - prévoir autant que possible des profils en travers en toit ;
  - éviter les dévers nuls (risque d'aquaplanage) ;
  - prévoir une pente longitudinale suffisante pour l'évacuation de l'eau de surface à long terme.
- *Assainissement*
  - prévoir des dispositifs d'assainissement adaptables et souples (par exemple : cunette préfabriquée tolérant plus facilement des déformations), que l'on puisse reprendre au cours du temps.

#### ■ 6.1.1.b Sections d'accès aux ouvrages d'art

En complément des problèmes déjà décrits pour les sections courantes, il convient de veiller aux points suivants :

- *Interférences avec les fondations des ouvrages*
  - attention aux frottements négatifs ;
  - attention aux déformations horizontales associées aux tassements résiduels (fluage à long terme).
- *Liaisons délicates entre un point dur (ouvrage) et le remblai*
  - prévoir une dalle de transition ;
  - envisager un vieillissement artificiel des sols (surcharge, allègement).

- *Phasage particulier*
  - prévoir un préchargement anticipé ;
  - augmenter localement le nombre des drains verticaux.
- *Problèmes particuliers de stabilité frontale*
  - prévoir une banquette de nez à retirer (débouché hydraulique) ou à garder ;
  - penser aux risques d'instabilité liés au surcreusement du cours d'eau et aux variations du niveau d'eau ;
  - prévoir une protection des berges et des talus (accélération du courant au débouché hydraulique, en cas de crues).

## 6.1.2 Pour les travaux

### ■ 6.1.2.a Géométrie

- *Acquisitions foncières*
  - prévoir des surlargeurs par rapport au projet. Toutes les modifications du projet en phase de construction entraînent des surconsommations de terrains (banquettes à élargir, fossés supplémentaires, piste).
- *Entrées en terre*
  - prévoir des surlargeurs prenant en compte les tassements, la méthode excédentaire plus une marge.
- *Fossés latéraux*
  - attention aux risques d'instabilité, qui peuvent conduire à éloigner les fossés du pied des remblais ou des banquettes.
- *Pentes hydrauliques*
  - se méfier des faibles pentes données aux fossés d'évacuation des eaux, qui peuvent s'inverser après tassement ;
  - ne pas hésiter à surdimensionner les fossés pour pouvoir les approfondir ultérieurement.

### ■ 6.1.2.b Méthodes de construction

- *État des lieux*
  - prévoir un constat préalable des ouvrages dans l'emprise et le voisinage du chantier (réseaux, par exemple), afin de disposer d'une référence fiable pour juger des dégâts imputables au chantier.
- *Drains verticaux*
  - surveiller la mise en œuvre des drains verticaux (longueur, ancrage dans le substratum perméable) soit visuellement, soit par des enregistrements de paramètres.
- *Matériaux*
  - prévoir une couche drainante à la base du remblai ;
  - assurer la continuité de l'assise drainante sous le remblai au niveau des banquettes, qui sont souvent réalisées en matériaux imperméables ;
  - prévoir des matériaux insensibles à l'eau au minimum sur la hauteur des tassements ;
  - adapter la nature des matériaux du corps de remblai aux tassements (déformabilité) ;
  - prévoir des couches de forme en matériaux granulaires et des chaussées souples.
- *Mise en œuvre*
  - construire uniformément par zones homogènes : pas de décalage de plus d'une épaisseur de couche élémentaire de compactage ; pas de montée de remblai par demi-plateforme ;



- monter les banquettes simultanément avec le corps du remblai (problèmes de stabilité) ;
- prévoir des phases contractuelles de remblai avec des délais d'attente. Il faut prévoir de monter le remblai par palier avec des temps de consolidation intermédiaires (dissipation des pressions interstitielles) ;
- prévoir la mise en place de la couche de forme juste avant la mise en œuvre de la chaussée en cas de surcharge ;
- limiter les cadences de chargement des remblais. Bien spécifier qu'il ne s'agit pas de monter des remblais ordinaires avec des ateliers à grand rendement.

- *Instrumentation*

- insister sur l'inscription détaillée dans le journal de chantier de toutes les variations de hauteur du remblai (montée et déchargement) ;
- prévoir un suivi topographique accru et démarrant dès le début de travaux ;
- prévoir de réaliser pendant les terrassements une plate-forme provisoire pour recevoir l'instrumentation ;
- situer les profils d'instrumentation au droit des sondages carottés réalisés lors des études géotechniques ;
- créer des points fixes : tassomètres de référence fixés sur un pieu ancré dans le substratum ;
- faire connaître à l'entreprise de terrassement qu'il y aura des interruptions en phase de construction pour la mise en place de l'appareillage ;
- avertir l'entreprise de terrassement des contraintes liées à l'instrumentation fixe dans le remblai : tiges des repères topographiques en profil en travers, tassomètres multi-points, inclinomètres ;
- en cas de préchargement, prendre les dispositions permettant de commencer les mesures avant le début des travaux.

- *Remise de l'ouvrage*

- informer le maître d'ouvrage et l'exploitant qu'il y aura des tassements résiduels, sans que cela résulte d'un défaut de conception, et qu'il faudra continuer de surveiller l'ouvrage.

## 6.2

## RECOMMANDATIONS POUR LA COMMANDE DES ÉTUDES, DE L'INSTRUMENTATION ET DU SUIVI

Cette section rassemble diverses recommandations pour la rédaction des clauses techniques des marchés d'études géotechniques et pour les marchés d'instrumentation et de suivi des sols et des remblais pendant et après les travaux.

## 6.2.1 Commandes des études géotechniques

CLAUSES DU MARCHÉ	COMMENTAIRES
<b>1. Objet de la reconnaissance géotechnique</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• substratum</li> <li>• nature et caractéristiques des sols mous</li>   <li>• mode de construction des remblais                             <ul style="list-style-type: none"> <li>– pour les problèmes de stabilité,</li> <li>– pour les problèmes de tassements</li> </ul> </li> <li>• dispositions constructives</li> <li>• prédimensionnement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ drainant ou imperméable ?</li> <li>→ identification du sol (granulométrie, limites d'Atterberg)</li> <li>→ teneur en eau naturelle, densités</li>   <li>→ résistance des sols (scissomètre <i>in situ</i>)</li> <li>→ essais œdométriques, essais de fluage</li> </ul>
<b>2. Phasage des travaux de reconnaissance</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Enquête préliminaire (documentation, étude géologique, hydrogéologique, géophysique)</li>   <li>• Reconnaissance sommaire (estimation des difficultés géotechniques, zonage du site, ordres de grandeur des tassements et des charges limites)</li>   <li>• Reconnaissance détaillée (préparation du projet d'exécution)</li>   <li>• Études spécifiques (fondations des ouvrages d'art, ...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ essais de pénétration statique et dynamique</li> <li>→ sondages scissométriques</li> <li>→ sondage carotté (carottier à piston stationnaire)</li> <li>→ sondage à la tarière</li> <li>→ essais de laboratoire</li>   <li>(idem, plus nombreux)</li>   <li>→ sondages pressiométriques</li> </ul>
<b>3. Méthodes et moyens de reconnaissance</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• matériel à utiliser</li> <li>• échantillonnage</li> <li>• essais de laboratoire</li> <li>• essais en place</li> <li>• normes et procédures d'essai</li> </ul>	
<b>4. Organisation des études</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• délais,</li>   <li>• phasage,</li>   <li>• rapports,</li>   <li>• résultats,</li>   <li>• conclusions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ la durée des études peut atteindre ou dépasser six mois à un an</li> <li>→ les phases décrites en 2. devraient se succéder mais se chevauchent souvent, ce qui rend nécessaire un dialogue permanent entre le bureau d'étude et la maîtrise d'œuvre</li> <li>→ un rapport doit être établi à l'issue de chaque phase de la reconnaissance</li> <li>→ les résultats doivent être présentés avec les hypothèses précises adoptées pour les calculs</li> <li>→ les résultats doivent faire apparaître un zonage du site en entités homogènes (nature et épaisseur du sol)</li> <li>→ les conclusions doivent définir les différentes solutions envisageables pour la construction dans chaque zone, avec l'analyse de leurs avantages et de leurs inconvénients</li> </ul>
<b>5. Points divers</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• implantation des sondages</li>   <li>• localisation</li>   <li>• réseaux</li> <li>• autorisations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ un système spécifique de repérage en altitude des bornes ou repères fixes doit être défini</li> <li>→ la reconnaissance doit être effectuée sur l'axe du projet et sur des profils transversaux</li> </ul>

## 6.2.2 Commandes d'instrumentation et de suivi

CLAUSES DU MARCHÉ	COMMENTAIRES
<b>1. Objet des travaux</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• définition des travaux</li> <li>• consistance du marché <ul style="list-style-type: none"> <li>– fourniture et mise en place de l'instrumentation</li> <li>– suivi de l'instrumentation</li> <li>– prestation intellectuelle</li> <li>– rapports</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ donner le contexte général des travaux à réaliser (longueur, épaisseur, volume)</li> <li>→ penser au délai de livraison du matériel</li> <li>→ penser au point fixe de référence pour les tassomètres</li> <li>→ le choix des appareillages dépend des objectifs de l'instrumentation (définis lors de la préparation du projet)</li> <li>→ des rapports manuscrits intermédiaires sont utiles</li> </ul>
<b>2. Programme des travaux d'instrumentation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• mise en place</li> <li>• contrôle</li> <li>• organisation</li> <li>• journal de chantier</li> <li>• fin des travaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ contrôle du fonctionnement des appareils avant et après la pose</li> <li>→ déterminer des fréquences de lecture et des délais de réponse pour la suite à donner</li> <li>→ un plan de récolement est nécessaire pour informer l'entreprise de terrassement de la position des appareils de mesure qu'elle doit respecter</li> </ul>
<b>3. Implantation et piquetage</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• système de référence</li> <li>• plan d'exécution</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ attention aux bornes de références dans les zones de sols compressibles (prendre des points fixes stables, sur des pieux d'ouvrages d'art, etc.)</li> <li>→ à fournir par le maître d'œuvre : profils en long et en travers, vue en plan...</li> </ul>
<b>4. Mode d'exécution</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tassomètre de surface</li> <li>• tassomètre de profondeur</li> <li>• tassomètres multipoints</li> <li>• sonde de pression interstitielle</li> <li>• inclinomètre</li> <li>• capteur de pression totale</li> <li>• tiges ou plaques de nivellement</li> <li>• repère de référence (micropieu)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ référence à un tassomètre fixe (pieu, ...)</li> <li>→ idem</li> <li>→ à prolonger lors de la construction du remblai (prévoir une protection)</li> <li>→ en particulier près des ouvrages d'art</li> <li>→ pour suivi topographique ordinaire</li> <li>→ par profil (des deux côtés)</li> <li>→ peut servir de repère fixe pour les tassements</li> </ul>
<b>5. Phasage des mesures</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pendant la construction du remblai</li> <li>• après</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ période capitale. Contact permanent ou présence du représentant du bureau d'étude</li> <li>→ fréquence dégressive des mesures, suivant les problèmes à résoudre</li> <li>→ il est prudent de fixer un délai d'intervention en réponse à une demande de mesure.</li> </ul>
<b>6. Rapport d'analyse</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• intermédiaire</li> <li>• définitif</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ si le problème est difficile, dépouillement immédiat pour aide à la décision</li> <li>→ faire un bilan phase par phase</li> <li>→ le rapport final est établi après la synthèse des études et leur recalage par rapport aux résultats trouvés sur le site</li> </ul>
<b>7. Délais des travaux</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pose des appareils</li> <li>• mesures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ prévoir les pistes d'accès et les abris</li> <li>→ les mesures peuvent se prolonger pendant une longue période, après la mise en service des ouvrages portés par les remblais</li> </ul>

**Page laissée blanche intentionnellement**

## Chapitre

## 7

## Bibliographie

## OUVRAGES TECHNIQUES

- *Remblais sur argiles molles*. Leroueil S., Magnan J.-P., Tavenas F - Paris : Technique et Documentation - Lavoisier, 342 pages. 1985.
- *Remblais et fondations sur sols compressibles*. Sous la direction de J.-P. Magnan - Paris : Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées - épuisé - nouvelle édition en 2001.
- *Réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique*. SETRA-LCPC - Sept. 1992.
- *Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques (CFG)* :
  - fascicule : Recommandations pour l'emploi des géotextiles dans les voies de circulation provisoire, les voies à faible trafic et les couches de forme (1981)
  - fascicule : Recommandations pour l'emploi des géotextiles sous remblais sur sols compressibles (1985)
- *Utilisation de structures alvéolaires ultra-légères en remblai routier* - Guide technique LCPC - Oct. 1992.
- *Utilisation de polystyrène expansé en remblai routier* - Guide technique. LCPC-SETRA de J.-P. Magnan - 1990.
- Note d'information technique LCPC : *Amélioration des sols de fondation - Choix des méthodes d'exécution* - D. Queyroi, D. Chaput, G. Pilot - 1985.
- *Matériaux légers pour remblais*. AIPCR- Association Mondiale de la Route - 287 pages - 1997.
- *Remblais routiers sur sols compressibles - Étude et construction* - G.Pilot, D. Chaput, D. Queyroi - 1988 - Diffusé par la Documentation française - Éditeur : Ministère de la coopération et du développement.
- Thématique du bulletin de liaison LCPC : *Remblais légers en polystyrène expansé* - 1985.
- Rapport de laboratoire LPC GT 17 - *Le Pneusol*.
- Rapport de recherche LPC RR148 - *Mise en œuvre de remblais hydrauliques. Application aux constructions routières*.
- Note d'information SETRA-LCPC - CD 47 - *Le Pneusol* - 1989.
- Note d'information SETRA-LCPC - CD 54 - *Remblais ultra légers sur sols compressibles* - 1990.
- *L'eau et la route* - Guide technique - SETRA - 6 volumes - B93481 à B93485 et B9741 - 1997.
- *Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil* - CCTG applicable au marché public de travaux - Fascicule 62 - Titre V - 1993.

## NORMES

- AFNOR : recueil de normes géotechniques (tome 1 : *Essais en laboratoire*; tome 2 : *Essais sur site*; tome 3 : *Justification des ouvrages et exécution des travaux*) - Déc 1998.

## DOCUMENTS RELATIFS À L'ORGANISATION DE LA QUALITÉ

- *Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassement* - Guide SETRA-LCPC.
- *Guide pour la commande et le contrôle des reconnaissances géotechniques de tracé* (en cours d'édition au LCPC).

**Page laissée blanche intentionnellement**

**Page laissée blanche intentionnellement**



## ÉTUDE ET RÉALISATION DES REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES

### GUIDE TECHNIQUE

Ce guide technique, élaboré par les services techniques de l'Administration, en collaboration étroite avec les bureaux d'études, a pour objectif d'apporter aux maîtres d'œuvre et aux projeteurs les éléments d'information sur la conception d'un projet et la réalisation des travaux de construction de remblais sur sols compressibles.

Ce guide présente successivement les différentes techniques de reconnaissances, les domaines d'application, les choix des techniques de construction des remblais, le contrôle du chantier et de l'ouvrage fini et propose une organisation de la démarche d'assurance qualité.

*This technical guide, drawn up by the Administration Technical Departments, in close cooperation with consultant engineers, aims to provide project engineers and designers with information on project designing and construction work for embankments on compressible soils.*

*This guide successively presents the different ground survey techniques, fields of application, choices of embankment construction techniques, inspection of the worksite and finished works, and proposes a method of organising the quality assurance approach.*

---

Document disponible sous la référence D 0034  
au prix de 150 F (22,87 €)

au bureau de vente du SETRA  
46, avenue Aristide Briand  
BP 100  
F-92225 BAGNEUX CEDEX  
Téléphone : 01 46 11 31 53  
Télécopie : 01 46 11 35 55  
Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>

à l'IST-Diffusion – LCPC  
58, boulevard Lefebvre  
F-75732 Paris CEDEX 15  
Téléphone : 01 40 40 52 26  
Télécopie : 01 40 43 54 95  
Internet : <http://www.lcpc.fr>

---

ISBN : 2-11-091783-0  
ISSN : 1151-1516