

A large yellow crawler crane is the central focus, positioned on a construction site. Its long lattice boom extends diagonally across the frame. In the background, a city skyline with several tall skyscrapers is visible under a clear sky. The crane's cables and pulleys are clearly visible. The overall scene is a construction or industrial setting.

Amélioration et renforcement des sols

Tome

2

Sous la direction de

Laurent Briançon

Philippe Liausu

Claude Plumelle

Bruno Simon

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR

AMSOL

Avant-propos

Toute fondation, qu'elle soit celle d'un bâtiment ou d'un ouvrage de génie civil, doit répondre à trois objectifs : solidité, économie, maîtrise des risques.

À l'origine du développement des villes ou des infrastructures, l'implantation des ouvrages se faisait en recherchant le « bon sol », gage du respect de ces trois critères.

Depuis une cinquantaine d'années, le développement accéléré des mégapoles, des infrastructures, des surfaces industrielles et commerciales, a généralement nécessité, d'investir les zones littorales, les vallées ou plaines alluviales, ou des zones jusqu'ici délaissées. Les constructions dans ces nouveaux territoires imposent de s'accommoder le plus souvent de « mauvais sol », les zones de « bon sol » étant devenues rares ou déjà construites. La prise en compte des risques liés aux tremblements de terre dans les zones sismiques génère également de nouvelles contraintes de construction.

Dans ce contexte, il appartient à l'ingénierie géotechnique, acteur incontournable de tout projet de construction, de proposer au maître d'ouvrage la technique d'amélioration des sols la mieux adaptée pour bâtir son projet dans des conditions économiques acceptables, tout en maîtrisant les risques liés au sol.

Les entreprises ont toujours eu un rôle capital dans le développement des techniques d'amélioration et de renforcement des sols. Elles le maintiennent encore maintenant ; les entreprises françaises, dont beaucoup figurent parmi celles dont le savoir-faire et la technicité sont les mieux reconnues au monde, poursuivent toutes des activités de recherche-développement dont découlent les innovations, tant sur les technologies que sur le matériel mis en œuvre, qui leur permettent de proposer des solutions toujours plus performantes et/ou moins coûteuses.

Ce livre, en deux tomes, présente un panorama complet des techniques d'amélioration des sols, des plus usuelles aux plus novatrices. Il ouvre des perspectives sur celles qui sont en développement. Il capitalise, par ses auteurs et le choix de tous les autres contributeurs, les expériences acquises en entreprises, en bureaux d'étude ou en bureaux de contrôle, et le savoir des acteurs académiques. Il a également pour objectifs d'expliquer de manière simple aux maîtres d'ouvrage quels sont les enjeux de ces techniques, de détailler pour les géotechniciens d'entreprise et de bureaux d'étude les outils de conception sur sol amélioré ou renforcé, et enfin d'éclairer les entreprises sur la réalisation des travaux d'amélioration des sols.

Le tome 1 comporte neuf chapitres. Les deux premiers sont consacrés à la description, aux investigations et aux comportements des sols. Ils sont le socle de toute conception sérieuse d'un ouvrage nécessitant des travaux d'amélioration des sols. Le troisième chapitre développe les auscultations géotechniques qui doivent accompagner tout projet d'amélioration des sols. Les six chapitres suivants traitent les différentes techniques, sans adjuvants, ni inclusions ou injections.

Le tome 2 comporte neuf chapitres, il traite des techniques d'amélioration et de renforcement des sols avec adjuvants, inclusions ou par injection.

Chaque chapitre présente, après une introduction historique, la technique d'amélioration de sol, ses domaines d'application, ses avantages et ses limites. Il décrit ensuite le comportement du matériau amélioré ou renforcé, expose les moyens de calcul et décrit les paramètres pertinents des modèles. La conception et le dimensionnement des ouvrages définissent les critères à atteindre que ce soit en termes de résistance ou de limitation des déformations. Les références utiles aux normes, guides techniques ou états de l'art sont également explicitées tout comme les méthodes d'exécution qui sont détaillées aux différentes phases : travaux préparatoires, phases de chantier, mise en œuvre des matériels, mise en place d'adjuvants ou d'inclusions. Le suivi, les opérations de contrôle et l'instrumentation des ouvrages qui tiennent une place importante dans ces techniques d'amélioration des sols ont été particulièrement développés. Enfin, chaque chapitre se termine par des retours d'expérience, sur des ouvrages courants et exceptionnels, en France comme à l'étranger.

Ce livre a bénéficié d'une contribution très importante de l'ensemble de la profession : entreprises, bureaux d'études, bureaux de contrôles, industriels, experts, que les quatre rédacteurs remercient chaleureusement.

Cet ouvrage s'adresse aux géotechniciens des bureaux d'étude, des bureaux de contrôle ou des entreprises qui veulent se spécialiser dans le domaine des techniques d'amélioration et de renforcement des sols. Il sera utile aux décideurs et aux généralistes de la construction qui y trouveront une présentation simple et abondamment illustrée de chaque technique avec ses avantages et ses limites. Enfin, il apporte aux étudiants en fin de cursus de formation en géotechnique les éléments nécessaires à la connaissance approfondie du vaste domaine de l'amélioration et du renforcement des sols.

À propos des auteurs

Laurent Briançon a été maître de conférences à la chaire de géotechnique du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam) de 2003 à 2012. Il a ensuite exercé la fonction de directeur de projets en infrastructures dans la société Antea Group. Il est depuis 2014 maître de conférences à l'INSA de Lyon. Il a été également un des commissaires de l'exposition « Les dessous des grands travaux » présentée au Musée des arts et métiers (2013-2018). Il mène depuis 2003 une activité de recherche expérimentale dans les domaines de l'amélioration des sols (ASIRI - RUFEX) et des géosynthétiques (GEOINOV – PITAGOR). [Chapitres 3, 10, 12 et 16].

Philippe Liausu est ingénieur civil des Ponts et Chaussées (1975) et Master of Science Stanford University (1976). Il a exercé la plus grande partie de sa carrière au sein de l'entreprise Ménard, spécialisée dans les travaux d'amélioration et de renforcement des sols ; il y a occupé différents postes tels que responsable de la recherche et du développement, directeur technique et directeur général délégué jusqu'en 2015. Il a été colauréat du prix de l'innovation décerné par la FNTF pour le procédé Texsol en 2005. Parallèlement à sa carrière en entreprise, il a été actif dans différentes instances professionnelles telles que le Comité français de mécanique des sols, la FNTF et a été professeur de géotechnique à l'École supérieure des travaux publics de 1988 à 2008. [Chapitres 4 à 6, 9, 15 et 17].

Professeur honoraire du Cnam, **Claude Plumelle** a eu une carrière d'enseignant, d'ingénieur-conseil et de chercheur. Il a dirigé la chaire de géotechnique du Cnam de 1994 à 2005, période au cours de laquelle il a développé le cursus d'ingénieur géotechnicien de cet établissement et créé, avec l'université Pierre-et-Marie-Curie - UPMC (Paris 6), le master commun géologie-géotechnique. Dans ses activités en recherche-développement, il a été très impliqué dans les projets nationaux : Clouterre, Forever et ASIRI. [Chapitres 1, 2, 8 et 17].

Bruno Simon est ingénieur civil des Ponts et Chaussées (1975). Il a exercé comme ingénieur en géotechnique et fondations au sein des bureaux d'études spécialisés Mécasol, puis Terrasol, depuis 1987, dont il a été le directeur scientifique entre 2000 à 2014. Il a acquis une expérience approfondie de la conception des fondations et l'étude de l'interaction des ouvrages avec leur environnement, en France comme à l'étranger : ouvrages fortement chargés, structures complexes de soutènement, ouvrages maritimes et remblais sur sols compressibles. Il a été le directeur du Projet national de recherches sur le renforcement des sols par inclusions rigides mené entre 2005 et 2012 qui a abouti aux recommandations ASIRI, dont il a également assuré la coordination et l'édition en langues française et anglaise. [Chapitres 1, 2, 8, 11 et 12].

Remerciements

Les quatre auteurs remercient chaleureusement pour leur contribution éclairée, la mise à disposition de leurs retours d'expérience, leur relecture minutieuse, l'ensemble des entreprises, bureaux d'études, bureaux de contrôle, industriels, universitaires, experts qui ont participé à la concrétisation de ce projet.

Cet ouvrage a bénéficié tout au long de son élaboration du soutien logistique de Terrasol (groupe Setec). Les auteurs en remercient vivement Valérie Bernhardt, sa directrice générale.

Contributeurs

Philippe Delmas, professeur titulaire de la chaire de géotechnique du Cnam, [Chap. 12].

Annette Esnault-Filet, chef de projet Étude et Développement, Soletanche Bachy [Chap. 13].

Nicolas Faure, responsable technique France, Uretex [Chap. 18].

André Jaubertou, consultant, précédemment ingénieur expert et formateur, Soletanche Bachy [Chap. 14 et 17].

Serge Lambert, directeur technique, Keller Fondations Spéciales [Chap. 10, 16 et 17].

Fabrice Mathieu, direction technique, marketing et matériel, ingénieur expert, Soletanche Bachy [Chap. 15].

Jean-Pierre Sanfratello, chef de service géotechnique, direction technique recherche et développement, Colas [Chap. 7].

Relecteurs

Abdelkader Abdelouhab (Texinov).

Patrick Berthelot (Bureau Veritas).

Luis Carpinteiro (Socotec).

Nicolas Denies (Centre scientifique et technique de la construction – CSTC).

Alain Guilloux (Terrasol).

Jérôme Racinais (Ménard).

Jean Robert Gauthey (Spie Fondations).

Grégory Scharff (Soletanche Bachy - Pieux).

Serge Varaksin (Ménard).

Table des matières

Sommaire	5
Avant-propos	7
À propos des auteurs	9
Sigles et abréviations.....	11
Liste des symboles	15

PARTIE 4

Traitements avec adjuvant ou inclusions pour sols pulvérulents et remblais	33
---	-----------

CHAPITRE 10

Colonnes ballastées	35
----------------------------------	-----------

10.1 Historique.....	35
-----------------------------	-----------

10.2 Principe de fonctionnement.....	37
---	-----------

10.2.1 Comportement mécanique	37
-------------------------------------	----

10.2.2 Effet drainant des colonnes.....	37
---	----

10.2.3 Comportement sous sollicitations sismiques.....	38
--	----

10.3 Domaine d'application	39
---	-----------

10.3.1 Type d'ouvrages.....	39
-----------------------------	----

10.3.2 Type de sol	39
--------------------------	----

10.4 Principe de mise en œuvre	40
---	-----------

10.4.1 Différentes méthodes.....	40
----------------------------------	----

10.4.1.1 Colonne ballastée par voie sèche et vibro-refoulement (lançage à l'air)...	41
---	----

10.4.1.2 Colonne ballastée par voie humide et vibro-substitution (lançage à l'eau) ..	43
---	----

10.4.1.3 Colonne ballastée pilonnée.....	44
--	----

10.4.1.4 Plate-forme et dispositions constructives.....	44
---	----

10.4.2 Cas des colonnes off-shore	45
---	----

10.4.2.1 Le tapis de ballast.....	45
-----------------------------------	----

10.4.2.2 L'alimentation du ballast par le bas à l'aide d'une trémie-réservoir unique.....	46
---	----

10.4.2.3 La pompe à graviers à double sas.....	48
--	----

10.4.3 Exécution.....	49
-----------------------	----

10.5 Avantages et limites de la technique.....	50
---	-----------

10.6	Dimensionnement	50
10.6.1	Domaine d'influence d'une colonne.....	50
10.6.2	Critères de dimensionnement.....	51
10.6.3	Rapport des concentrations de contrainte	51
10.6.4	Facteur de réduction du tassement	52
10.6.5	Justification par la méthode de Priebe	52
10.6.5.1	Détermination du facteur d'amélioration	52
10.6.5.2	Prise en compte des paramètres environnants	53
10.6.6	Cas particulier des semelles isolées et filantes.....	54
10.6.7	Augmentation de la résistance au cisaillement sous un talus de remblai ...	55
10.6.8	Rupture d'une colonne	55
10.6.8.1	Rupture par expansion latérale.....	56
10.6.8.2	Rupture par poinçonnement.....	56
10.6.8.3	Contraintes aux ELS et aux ELU	57
10.6.8.4	Rupture par cisaillement généralisé.....	57
10.7	Dimensionnement par modélisations numériques	58
10.7.1	Règles générales	58
10.7.2	Illustration sur un exemple	59
10.8	Contrôle et réception	62
10.9	Colonnes confinées	63
10.9.1	Principe de fonctionnement	63
10.9.2	Domaine d'application	65
10.9.2.1	Pour quels ouvrages.....	65
10.9.2.2	Type de sol.....	65
10.9.3	Principe de mise en œuvre.....	65
10.9.3.1	Matériau d'apport.....	65
10.9.3.2	Géosynthétique de confinement.....	65
10.9.4	Mode opératoire.....	65
10.9.5	Dimensionnement	67
10.9.6	Dimensionnement par modélisation numérique	68
10.9.7	Contrôle et réception.....	69
10.10	Retours d'expérience	70
10.10.1	Colonnes ballastées sous bâtiments.....	70
10.10.1.1	Bâtiment collectif « La Petite Venise » à Hochfelden (67).....	70
10.10.1.2	Amélioration du sol sous des semelles chargées à 4 MN : bâtiment Ikea à Saint-Martin-d'Hères (38).....	71

10.10.2	Colonnes ballastées sous dallage.....	72
10.10.3	Colonnes ballastées sous réservoir	74
10.10.4	Colonnes ballastées off-shore	76
10.10.5	Colonnes ballastées confinées.....	78
10.11	Bibliographie.....	79
CHAPITRE 11	Renforcement par inclusions rigides verticales	83
11.1	Historique.....	83
11.2	Mécanisme et fonctionnement.....	88
11.2.1	Principe	88
11.2.2	Description	89
11.2.2.1	<i>Inclusions rigides.....</i>	<i>89</i>
11.2.2.2	<i>Matelas de répartition.....</i>	<i>90</i>
11.2.2.3	<i>Les nappes de renforcement éventuel</i>	<i>91</i>
11.2.3	Fonctionnement	91
11.2.4	Domaines d'application.....	95
11.3	Critères de choix.....	97
11.3.1	Critères favorables intrinsèques	97
11.3.2	Critères favorables spécifiques vis-à-vis d'autres techniques.....	98
11.3.2.1	<i>Fondations profondes et fondations mixtes.....</i>	<i>98</i>
11.3.2.2	<i>Colonnes ballastées.....</i>	<i>100</i>
11.3.3	Critères potentiellement restrictifs.....	101
11.3.3.1	<i>Critères d'ordre général propres à la technique</i>	<i>101</i>
11.3.3.2	<i>Autres points à considérer dans certaines configurations spécifiques</i>	<i>102</i>
11.3.4	Points de recherches en cours	103
11.4	Modèles pour le dimensionnement	104
11.4.1	Définitions.....	104
11.4.2	Paramètres pertinents de performance	105
11.4.3	Dimensionnement des inclusions en référence au cadre général de l'EC 7	106
11.4.4	Étapes du dimensionnement	107
11.4.5	Modèles de calcul pour le dimensionnement	108
11.4.6	Autres approches : essais en vraie grandeur et modèles physiques	110
11.4.6.1	<i>Revue générale.....</i>	<i>110</i>
11.4.6.2	<i>Enseignements issus des expérimentations ASIRI utiles au dimensionnement.....</i>	<i>111</i>

11.4.7	Modèle analytique de la cellule élémentaire sous chargement vertical – modèle biphasique simplifié	120
11.4.7.1	Principe	120
11.4.7.2	Mise en équation	121
11.4.7.3	Loi d'interaction entre les deux domaines – loi de transfert	121
11.4.7.4	Conditions limites et résolution	123
11.4.7.5	Exemple d'application du modèle	125
11.4.7.6	Évaluation du modèle biphasique simplifié	126
11.4.7.7	Extension du modèle sous la pointe des inclusions	128
11.4.7.8	Prise en compte d'une nappe de renforcement dans le matelas de répartition	130
11.4.7.9	Détail des vérifications de cohérence	131
11.4.8	Modèles numériques	134
11.4.8.1	Intérêts et exigences des modèles numériques	134
11.4.8.2	Démarche d'élaboration et de validation du modèle	136
11.4.8.3	Revue des différents modèles	138
11.4.8.4	Revue et choix des lois de comportement	147
11.4.8.5	Phases successives de calcul	147
11.4.8.6	Exploitation des calculs	148
11.4.9	Modèles par homogénéisation du volume de sol renforcé	148
11.4.9.1	Méthode d'homogénéisation simplifiée	148
11.4.9.2	Modèle biphasique général	150
11.4.9.3	Modèle homogénéisé pour dimensionner un dallage	151
11.4.9.4	Modèle homogénéisé de la cellule élémentaire pour extension au cas d'une semelle sous chargement non uniquement vertical centré	153
11.5	Reconnaitances spécifiques adaptées	159
11.6	Conception de l'ouvrage	160
11.6.1	Conduite des justifications	160
11.6.2	Vérifications ELS	160
11.6.3	Vérifications ELU	162
11.6.3.1	Vérifications GEO	163
11.6.3.2	Vérifications STR	163
11.6.4	Autres vérifications	163
11.6.4.1	Contraintes de flexion dans les inclusions de rive	163
11.6.4.2	Valeurs limites des efforts en tête d'inclusion aux bords de la zone renforcée	167
11.6.4.3	Nappes horizontales de renforcement	168
11.7	Exécution des travaux	168
11.7.1	En lien avec les missions géotechniques normalisées G3 et G4	168

11.7.2	Plate-forme de travail	168
11.7.3	Inclusions rigides	170
11.7.3.1	Exécution	170
11.7.3.2	Préparation de la tête des inclusions	171
11.7.3.3	Prescriptions géométriques de diamètre et maille	172
11.7.4	Matelas de répartition	174
11.7.4.1	Choix et critères de mise en œuvre	174
11.7.4.2	Procédure d'exécution	175
11.7.4.3	Épaisseur minimale et débord	176
11.7.5	Nappes de renforcement	177
11.7.6	Gestion des interfaces	177
11.8	Suivis, contrôles et instrumentations	178
11.8.1	Contrôles	178
11.8.1.1	Essais de chargement statique sur inclusion isolée	178
11.8.1.2	Essais d'information	184
11.8.1.3	Essais de contrôle du fût	184
11.8.1.4	Contrôles d'implantation et d'altimétrie	186
11.8.1.5	Matelas de répartition	187
11.8.1.6	Nappes de renforcement	187
11.8.2	Instrumentation	187
11.9	Retours d'expérience	190
11.9.1	Un exemple d'ouvrage courant	190
11.9.2	Des ouvrages exceptionnels	192
11.9.2.1	Pont de Rion-Antirion	192
11.9.2.2	LGV SEA – remblais de la Virvée	198
11.10	Bibliographie	210
CHAPITRE 12	Géosynthétiques	217
12.1	Notions de base	217
12.1.1	Différentes familles de géosynthétiques	217
12.1.1.1	Géotextiles	217
12.1.1.2	Produits apparentés	218
12.1.1.3	Barrières géosynthétiques essentiellement imperméables	218
12.1.1.4	Géocomposites	219
12.1.2	Principales fonctions des géosynthétiques	220
12.1.2.1	Séparation	220
12.1.2.2	Filtration	220

12.1.2.3	<i>Protection</i>	221
12.1.2.4	<i>Renforcement</i>	221
12.1.2.5	<i>Drainage</i>	221
12.1.2.6	<i>Anti-érosion</i>	221
12.1.2.7	<i>Étanchéité</i>	222
12.1.3	Domaines d'application	222
12.2	Géosynthétiques de renforcement	222
12.2.1	Caractéristiques nominales	223
12.2.2	Facteurs d'influence (coefficients de réduction)	225
12.2.2.1	<i>Résistance à l'endommagement</i>	225
12.2.2.2	<i>Comportement au fluage</i>	225
12.2.2.3	<i>Résistance au vieillissement chimique</i>	225
12.2.3	Caractéristiques admissibles à long terme	226
12.3	Mécanismes de renforcement des sols	227
12.3.1	Traction	227
12.3.1.1	<i>Description</i>	227
12.3.1.2	<i>Caractérisation en laboratoire</i>	227
12.3.2	Frottement	231
12.3.2.1	<i>Description</i>	231
12.3.2.2	<i>Caractérisation en laboratoire</i>	231
12.3.3	Ancrage	233
12.3.3.1	<i>Description</i>	233
12.3.3.2	<i>Caractérisation en laboratoire</i>	234
12.3.4	Effet membrane	234
12.4	Ouvrages renforcés	235
12.4.1	Remblais sur sol compressible	235
12.4.1.1	<i>Conception et principes de dimensionnement</i>	235
12.4.1.2	<i>Principes de mise en œuvre</i>	237
12.4.2	Plateforme de transfert de charge sur inclusions rigides	237
12.4.2.1	<i>Conception</i>	237
12.4.2.2	<i>Prise en compte d'une nappe de renforcement dans le matelas de répartition au-dessus d'inclusions rigides</i>	238
12.4.2.3	<i>Équilibre d'une bande de renforcement</i>	240
12.4.2.4	<i>Introduction des géogrilles dans le modèle biphasique simplifié</i>	245
12.4.2.5	<i>Vérifications STR du renforcement d'un matelas sur inclusions rigides</i>	246
12.4.2.6	<i>Autres vérifications sur les nappes de renforcement au-dessus d'inclusions rigides</i>	248
12.4.2.7	<i>Principes de mise en œuvre</i>	250

12.5	Instrumentation des géosynthétiques	253
12.6	Normalisation et contrôles	253
12.7	Bibliographie	254
PARTIE 5	Traitements par injection	257
CHAPITRE 13	Méthodes biologiques	259
13.1	Historique	259
13.2	Types de biosol	260
13.2.1	Biocalcification	260
13.2.2	Biofilm, biopolymères et <i>Extracellular Polymeric Substances</i> (EPS)	260
13.2.3	Biogaz	261
13.2.4	Processus d'amélioration des sols par des vers marins	261
13.3	Biocalcification	261
13.3.1	Principe de la biocalcification	261
13.3.2	Propriétés	263
13.3.3	Domaines d'application	266
13.3.4	Avantages et limites de la technique	267
13.3.5	Conception	267
13.3.6	Mise en œuvre	268
13.3.7	Contrôles	268
13.4	Retours d'expérience	269
13.4.1	Biocalcification de graviers lâches (Pays-Bas, 2010)	269
13.4.2	Mur de soutènement en remblai renforcé (France, 2014)	270
13.4.2.1	Contexte du projet	270
13.4.2.2	Principe et résultats du plot d'essai	271
13.5	Bibliographie	272
CHAPITRE 14	Injections ciment et chimiques	275
14.1	Historique	275
14.2	Principe de fonctionnement des injections	276
14.2.1	Injection par imprégnation	277
14.2.2	Injection par claquage	277

14.3 Domaines d'application	277
14.3.1 Travaux d'étanchéité	278
14.3.2 Travaux de consolidation	278
14.4 Avantages et limites de la technique	279
14.5 Coulis	279
14.5.1 Coulis à base de liants hydrauliques en suspension	279
14.5.1.1 Suspension bentonite ciment	281
14.5.1.2 Suspension de coulis rigidifié bentonite ciment	281
14.5.1.3 Suspension de ciment ou liants hydrauliques ultra fins et adjuvants	281
14.5.2 Coulis à base de produits chimiques en solution	281
14.5.2.1 Gels et suspensions de silice	281
14.5.2.2 Coulis à base de résines ou autres produits chimiques	284
14.5.3 Propriétés des coulis	285
14.5.3.1 Caractéristiques rhéologiques des coulis	285
14.5.3.2 Coulis à base de liants hydrauliques en suspension	286
14.5.3.3 Coulis à base de produits chimiques en solution	292
14.6 Conception du projet	294
14.6.1 Étude géotechnique préalable G1	294
14.6.1.1 Investigations géologiques	294
14.6.1.2 Investigations hydrogéologiques	295
14.6.1.3 Investigations géotechniques	295
14.6.2 Étude géotechnique de conception G2	295
14.7 Mise en œuvre des coulis	298
14.7.1 Principe de l'injection	298
14.7.2 Maillage de forage	298
14.7.2.1 Rayon d'action des coulis à base de liants hydrauliques	299
14.7.2.2 Déviation des forages	299
14.7.2.3 Disposition des forages	300
14.7.3 Méthodes de forage	301
14.7.4 Équipement des forages	302
14.7.5 Fabrication des coulis	303
14.7.5.1 Stockage des produits	303
14.7.5.2 Dosage des constituants d'un coulis	304
14.7.5.3 Préparation des coulis	305
14.7.5.4 Transport et injection des coulis	305
14.7.6 Paramètres d'injection	305

14.7.7	Mode et matériel d'injection	305
14.7.7.1	Mode d'injection	305
14.7.7.2	Matériel obturateur	306
14.7.7.3	Matériels de mesure des paramètres	307
14.7.8	Acquisition, restitution et gestion des paramètres d'injection	307
14.7.8.1	Généralités	307
14.7.8.2	Moyens matériels et logiciels	307
14.8	Contrôles	310
14.8.1	Essais de convenance	310
14.8.2	Contrôles pendant l'injection	311
14.8.2.1	Fabrication du coulis	311
14.8.2.2	Contrôle des paramètres d'injections	311
14.8.2.3	Contrôle des déplacements	312
14.8.2.4	Résurgences	312
14.8.3	Contrôles de réception	312
14.8.3.1	Méthodes géophysiques	313
14.8.3.2	Sondages mécaniques in situ	313
14.8.3.3	Essais en laboratoire sur échantillons	313
14.8.3.4	Contrôle direct in situ	313
14.8.3.5	Essais d'eau	313
14.9	Retour d'expérience	313
14.9.1	Shepherd's Bush station	313
14.9.1.1	Présentation du projet	313
14.9.1.2	Essais de laboratoire	314
14.9.1.3	Plot d'essai	317
14.10	Bibliographie	318
CHAPITRE 15	DeepMixingMethod(DMM)	321
15.1	Historique	321
15.2	Descriptions des différentes méthodes	323
15.2.1	Méthode par voie sèche	323
15.2.2	Méthode par voie humide	324
15.3	Documents de référence	324
15.3.1	EuroSoilStab (2002)	324
15.3.2	Design manual for excavation support using deep mixing technology (2005)	325

15.3.3	Norme NF EN 14679 (2005) : Exécution de travaux géotechniques spéciaux – Colonnes de sol traité	325
15.3.4	Federal Highway Administration design manual : Deep mixing for embankment and foundation support (2013).....	325
15.3.5	DMM	325
15.3.6	RUFEX	326
15.3.7	Manuel des parois « soilmix » : « Handboek soilmix-wanden »	326
15.3.8	Cahiers des charges techniques.....	326
15.4	Présentation des différentes techniques de DMM	326
15.4.1	Terminologie des termes de DMM.....	327
15.4.2	Description des technologies DMM	327
15.4.3	Outils rotatifs à axe vertical : colonnes.....	328
15.4.3.1	<i>Outils mécaniques</i>	328
15.4.3.2	<i>Outils mécaniques avec une assistance « jet »</i>	330
15.4.4	Outils rotatifs à axe horizontal : panneaux.....	331
15.4.5	Tranchées continues	332
15.4.6	Traitement de toute la masse de sol.....	332
15.5	Différentes géométries des installations de DMM	334
15.5.1	Colonnes.....	334
15.5.2	Barrettes	334
15.5.3	Écrans.....	335
15.5.4	Réseaux tridimensionnels ou caissons	335
15.5.5	Anneaux	335
15.5.6	Blocs	336
15.6	Domaines d'application de la DMM	337
15.6.1	Travaux terrestres.....	337
15.6.2	Travaux maritimes	338
15.7	Avantages et limites de la méthode	339
15.7.1	Avantages	339
15.7.2	Limites	339
15.7.3	Critères de choix par rapport à d'autres techniques.....	340
15.8	Le matériau soilmix	341
15.8.1	Différents types de sol non pollués et pollués.....	342
15.8.1.1	<i>Sols naturels non pollués</i>	342

15.8.1.2	Sols pollués.....	343
15.8.2	Différents types de liants	346
15.8.2.1	Ciments	346
15.8.2.2	Chaux.....	348
15.8.2.3	Autres liants.....	348
15.8.2.4	Choix des liants	349
15.8.3	Caractéristiques hydro-mécaniques du matériau soilmix	351
15.8.3.1	Résistance à la compression simple	351
15.8.3.2	Modules de Young et coefficient de Poisson	351
15.8.3.3	Paramètres plastiques de la loi de Mohr Coulomb	352
15.8.3.4	Perméabilité	353
15.8.3.5	Durabilité du soilmix.....	354
15.9	Conception et dimensionnement de l'ouvrage.....	357
15.9.1	Principes et références.....	357
15.9.2	Application de la NF P 94-500 à la conception d'un projet DMM.....	358
15.9.3	Investigations géotechniques spécifiques pour DMM	359
15.9.4	Étude de formulation.....	359
15.9.5	Valeurs cibles des caractéristiques du soilmix.....	359
15.9.6	Calculs des ouvrages géotechniques.....	359
15.9.6.1	Détermination de f_{ck}	359
15.9.6.2	Exemple de détermination de f_{ck}	361
15.10	Exécution des ouvrages géotechniques	362
15.10.1	Définition des paramètres du matériau soilmix	362
15.10.1.1	Modèle en voie sèche	363
15.10.1.2	Modèle en voie humide.....	364
15.10.1.3	Tableau de synthèse.....	365
15.10.2	Facteurs d'influence des caractéristiques du matériau soilmix.....	366
15.10.2.1	Types et caractéristiques des sols.....	366
15.10.2.2	Types et quantités de liants	366
15.10.2.3	Teneur en eau totale du matériau	367
15.10.2.4	Indice de malaxage	368
15.10.2.5	Temps de cure	369
15.10.3	Plate-forme de travail	371
15.10.4	Exécution des technologies DMM	371
15.10.4.1	Colonnes par voie sèche.....	371
15.10.4.2	Colonnes par voie humide	372
15.10.4.3	Stabilisation de masse	373
15.10.4.4	Cutter Soil Mixing.....	374

15.10.4.5	<i>Tranchées continues</i>	374
15.10.4.6	<i>Autres colonnes spéciales</i>	376
15.11	Contrôles pendant et après la construction	376
15.11.1	Contrôle qualité pendant les phases d'exécution	377
15.11.2	Contrôles après construction	380
15.12	Ouvrages courants	382
15.12.1	Autoroute A14 – Le Mesnil-le-Roi	382
15.12.1.1	<i>Présentation du projet</i>	382
15.12.1.2	<i>Conception du projet</i>	383
15.12.1.3	<i>Réalisation des colonnes</i>	384
15.12.1.4	<i>Essai préalable et contrôles</i>	385
15.12.1.5	<i>Conclusion</i>	387
15.12.2	Projet autoroutier en France	387
15.12.2.1	<i>Présentation du projet</i>	387
15.12.2.2	<i>Conception du projet</i>	389
15.12.2.3	<i>Justification technique</i>	390
15.12.2.4	<i>Réalisation des travaux</i>	393
15.13	Ouvrage exceptionnel : LPV 111 à La Nouvelle-Orléans	397
15.13.1	Présentation du projet	397
15.13.2	Conditions géologiques et géotechniques	398
15.13.3	Conception et préparation du projet	398
15.13.4	Sélection de la méthode de construction	398
15.13.5	Préparation du projet	399
15.13.5.1	<i>Essais en laboratoire</i>	399
15.13.5.2	<i>Plots d'essai</i>	400
15.13.6	Conception du projet	401
15.13.6.1	<i>Analyse des stabilités</i>	402
15.13.6.2	<i>Analyse des tassements</i>	402
15.13.6.3	<i>Remblai de surélévation de la nouvelle digue</i>	404
15.13.6.4	<i>Dimensionnement des murs de renforcement et caractéristiques du solmix</i> ...	404
15.13.7	Production et méthode	406
15.13.8	Contrôles et réception	407
15.13.8.1	<i>Suivi et contrôles pendant l'exécution</i>	407
15.13.8.2	<i>Contrôles après construction</i>	408
15.13.8.3	<i>Résultats des essais de compression simple R_c</i>	408
15.14	Bibliographie	409

CHAPITRE 16	Jetgrouting	415
16.1	Historique	415
16.2	Principe de fonctionnement	416
16.3	Domaine d'application	417
16.3.1	Amélioration	417
16.3.2	Étanchement	418
16.3.3	Structure	419
16.3.4	Reprise en sous-œuvre	419
16.4	Techniques	420
16.4.1	Simple jet	420
16.4.2	Double jet	420
16.4.3	Triple jet	420
16.4.4	Efficacité	421
16.5	Matériaux	422
16.6	Géométrie	422
16.7	Exécution	423
16.8	Avantages et limites de la technique	424
16.9	Dimensionnement	426
16.9.1	Énergie du jet	426
16.9.2	Étanchement	427
16.9.3	Diamètre	427
16.10	Contrôle et réception	427
16.10.1	Diagraphie en forage	427
16.10.2	Contrôle du coulis	430
16.10.3	Contrôle de la résistance du mélange sol/ciment	431
16.10.4	Analyse des rejets	432
16.10.5	Contrôle de la géométrie	432
16.10.5.1	<i>Méthodes destructives</i>	432
16.10.5.2	<i>Méthodes non destructives</i>	432
16.10.6	Essais de perméabilité	434
16.11	Retours d'expérience	435
16.11.1	Bouchon injecté	435

16.11.2	Amélioration du sol sous un réservoir GNL	436
16.12	Bibliographie	438
CHAPITRE 17	Injection solide	441
17.1	Historique	441
17.2	Principe de fonctionnement	442
17.3	Domaines d'application	444
17.3.1	Amélioration des sols	444
17.3.2	Renforcement de structures, reprise en sous-œuvre	445
17.4	Avantages et limites de la technique	446
17.5	Conception et dimensionnement	448
17.5.1	Maillage	448
17.5.2	Pression d'injection et débit	448
17.5.3	Taux d'incorporation	449
17.6	Exécution	450
17.6.1	Matériau	451
17.6.2	Matériel	453
17.6.3	Exécution de l'injection solide	455
17.7	Contrôles et réception	455
17.7.1	Suivi et contrôles pendant l'exécution	455
17.7.1.1	<i>Contrôles sur le mortier</i>	455
17.7.1.2	<i>Enregistrements des paramètres de forage</i>	455
17.7.1.3	<i>Enregistrements des paramètres d'injection</i>	456
17.7.1.4	<i>Suivi de l'évolution du traitement</i>	457
17.7.1.5	<i>Suivi des déplacements du sol et des ouvrages avoisinants</i>	458
17.7.2	Contrôles de réception	458
17.8	Retours d'expérience	459
17.8.1	Chantier expérimental du CEBTP	459
17.8.1.1	<i>Présentation de l'expérimentation</i>	459
17.8.1.2	<i>Conditions géotechniques initiales</i>	459
17.8.1.3	<i>Caractéristiques du mortier</i>	460
17.8.1.4	<i>Exécution des colonnes d'injection solide</i>	462
17.8.1.5	<i>Contrôles et réception</i>	463
17.8.1.6	<i>Excavations des colonnes de mortier</i>	467

17.8.2	Fondations d'éoliennes à Ouainville	468
17.8.2.1	Présentation.....	468
17.8.2.2	Conditions géotechniques initiales.....	468
17.8.2.3	Mise en œuvre.....	470
17.8.2.4	Contrôles et réception	472
17.8.3	Complexe de GNL de Fos-sur-Mer	474
17.8.3.1	Présentation.....	474
17.8.3.2	Conditions géotechniques initiales.....	475
17.8.3.3	Mise en œuvre.....	476
17.8.3.4	Contrôles et réceptions.....	479
17.9	Bibliographie	480
CHAPITRE 18	Injection de résine expansive	483
18.1	Historique	483
18.2	Principes de l'injection de résine expansive	483
18.3	Domaines d'application et limites d'emploi	486
18.3.1	Amélioration des caractéristiques mécaniques.....	486
18.3.2	Réduction de la perméabilité	488
18.3.3	Traitement des sols sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement	488
18.3.4	Relevage des ouvrages	489
18.3.5	Limites d'emploi.....	489
18.4	Valorisation et cadre contractuel	490
18.4.1	Critères de performance	490
18.4.1.1	Contexte géotechnique.....	490
18.4.1.2	Résines employées.....	491
18.4.2	Critères temporels et logistiques	492
18.4.3	Critères financiers	492
18.4.4	Engagements contractuels.....	492
18.4.5	Garanties	493
18.5	Propriétés de la résine expansive	493
18.5.1	Propriétés physiques.....	494
18.5.2	Caractéristiques mécaniques	496
18.5.3	Caractéristiques hydrauliques	497
18.5.4	Durabilité.....	499

18.6	Diffusion de la résine dans le sol	499
18.6.1	Sols grossiers	499
18.6.2	Sols fins	500
18.7	Dimensionnement	501
18.7.1	Sols grossiers	501
18.7.2	Sols fins	502
18.7.3	Outils de prédimensionnement	505
18.8	Concevoir un projet d'injection de résine expansive	505
18.8.1	Éléments géotechniques	505
18.8.2	Considérations structurelles (interaction ouvrage – résine)	506
18.8.3	Projet d'injection	506
18.8.3.1	Définition de la zone de traitement	506
18.8.3.2	Distribution des points d'injection	507
18.9	Mise en œuvre	510
18.9.1	Percements et positionnement des tubes	510
18.9.2	Injections	512
18.10	Suivis et contrôles	512
18.10.1	Contrôles produits	512
18.10.2	Contrôles de la structure	513
18.10.3	Contrôles du sol injecté	513
18.10.4	Éléments de suivi d'exécution	514
18.11	Retours d'expérience	515
18.11.1	Bâtiments	515
18.11.1.1	Maison individuelle	515
18.11.1.2	Immeuble	517
18.11.2	Surface commerciale	520
18.11.3	Travaux publics et génie civil	523
18.11.3.1	Station d'épuration	523
18.11.3.2	Infrastructure routière	527
18.12	Bibliographie	529

Annexes	531
ANNEXE A1	Inclusions rigides verticales – Modèle numérique : points principaux à arrêter
	533
A1.1	Choix du type d'éléments pour inclusions
	533
A1.1.1	Éléments poutre
	533
A1.1.2	Éléments volumiques
	533
A1.1.3	Éléments <i>embedded piles</i>
	534
A1.2	Interfaces le long des inclusions
	536
A1.3	Comportement en pointe
	537
A1.3.1	Paramètres contrôlant le comportement en pointe
	537
A1.3.2	Finesse du maillage à la base des inclusions
	537
A1.3.3	Spécificités des chemins de contrainte le long du fût et sous la pointe
	539
A1.4	Influence des couches placées sous la base des inclusions
	540
A1.4.1	Extension du modèle sous la base de la zone renforcée
	540
A1.4.2	Comportement du massif sous le volume renforcé
	541
A1.5	Calcul en petites déformations ou grandes déformations
	543
A1.6	Bibliographie
	543
ANNEXE A2	Inclusions rigides verticales – Modèle par homogénéisation sous un dallage : méthodes des moments additionnels
	545
A2.1	Terme [mb] : influence des inclusions rigides sur un dallage continu
	545
A2.1.1	Modèle de la cellule élémentaire
	545
A2.1.2	Détail du calcul annexe du terme [mb] à partir des résultats du modèle biphasique simplifié de la cellule élémentaire
	549
A2.2	Terme [ma] : calcul du dallage continu sur sol homogénéisé
	550
A2.3	Terme [mc] : interaction entre les inclusions rigides et les joints
	553
A2.4	Combinaison des termes [ma], [mb] et [mc]
	554
A2.5	Bibliographie
	554
ANNEXE A3	Inclusions rigides verticales – Conception de l'ouvrage : vérifications G EO
	555
A3.1	Cas général
	555

A3.1.1	Facteurs partiels de sécurité (approche 2).....	555
A3.1.2	Stratégie de la vérification GEO	556
A3.1.3	Modèles enveloppes 1, 2 et 3 pour le cas général des ouvrages autres que les remblais.....	556
A3.1.3.1	Modèle enveloppe 1	556
A3.1.3.2	Modèle enveloppe 2	559
A3.1.3.3	Modèle enveloppe 3	560
A3.2	Cas des remblais sur inclusions rigides.....	565
A3.2.1	Facteurs partiels de sécurité (approche 3).....	566
A3.2.2	Modèles enveloppes 1, 2 et 3 pour les remblais sur inclusions	567
A3.2.2.1	Modèle enveloppe 1	567
A3.2.2.2	Modèle enveloppe 2	568
A3.2.2.3	Modèle enveloppe 3	569
A3.3	Bibliographie.....	571

ANNEXE A4	Inclusions rigides verticales – Conception de l'ouvrage : vérifications STR.....	573
A4.1	Inclusions.....	573
A4.1.1	Résistance vis-à-vis de la compression simple ou de la flexion composée	573
A4.1.1.1	Valeurs de référence	573
A4.1.1.2	Contraintes maximales à l'ELU.....	575
A4.1.1.3	Contraintes maximales à l'ELS.....	576
A4.1.2	Résistance vis-à-vis de la flexion composée	576
A4.1.3	Observations sur les modèles de référence pour le calcul des contraintes en flexion composée dans une section circulaire non armée.....	576
A4.1.3.1	Modèle de la lunule.....	577
A4.1.3.2	Modèle du segment circulaire simple uniformément chargé	577
A4.1.3.3	Modèle du segment circulaire simple soumis à une contrainte normale variant linéairement	578
A4.1.4	Résistance vis-à-vis du cisaillement	581
A4.1.4.1	Cas d'une inclusion armée	581
A4.1.4.2	Cas d'une inclusion non armée entièrement comprimée.....	581
A4.1.5	Résistance vis-à-vis du flambement	582
A4.2	Matériaux traités aux liants hydrauliques	582
A4.3	Nappe de renforcement du matelas.....	583
A4.4	Bibliographie.....	583

ANNEXE A5	Géosynthétiques : vérifications des nappes de renforcement au-dessus d'inclusions rigides	585
A5.1	Transfert de la poussée latérale d'un talus à la nappe de renforcement.....	585
A5.2	Transfert vers les têtes d'inclusion	586
A5.2.1	En section courante d'ouvrage	586
A5.2.2	En rive du volume renforcé par inclusions	587
A5.2.2.1	<i>Absence de talus</i>	587
A5.2.2.2	<i>Présence de talus</i>	588
A5.3	Transfert entre lés adjacents d'une nappe	588
A5.4	Bibliographie.....	589
	Index	591

Dans le tome 1 :

PARTIE 1 **Prérequis**

CHAPITRE 1 **Reconnaître et décrire le comportement des sols**

- 1.1 Les normes géotechniques dans le cadre de l'amélioration des sols
- 1.2 Conception d'un projet d'amélioration des sols
- 1.3 Réalisation du projet d'amélioration des sols
- 1.4 Définitions, description et classifications des sols
- 1.5 Classification des sols
- 1.6 Consolidation et fluage des sols
- 1.7 Lois de comportement des sols
- 1.8 Choix de la loi de comportement en fonction du type d'ouvrage
- 1.9 Bibliographie

CHAPITRE 2 **Investigations géotechniques**

- 2.1 Organisation des investigations géotechniques
- 2.2 Étude géologique

- 2.3 Étude hydrogéologique
- 2.4 Reconnaissance géophysique
- 2.5 Sondages géologiques
- 2.6 Essais de caractérisation géotechnique
- 2.7 Bibliographie

CHAPITRE 3 Auscultation géotechnique

- 3.1 Principaux paramètres mesurés
- 3.2 Plan d'auscultation
- 3.3 Suivi et exploitation des mesures
- 3.4 Principaux moyens de mesure
- 3.5 Mesures spécifiques
- 3.6 Bibliographie

PARTIE 2 Traitement sans adjuvant pour sols pulvérulents et remblais

CHAPITRE 4 Compactage dynamique et substitution dynamique

- 4.1 Introduction
- 4.2 Mise en œuvre du compactage dynamique
- 4.3 Contrôle qualité
- 4.4 Substitution dynamique ou plots ballastés pilonnés
- 4.5 Retours d'expérience
- 4.6 Conclusion
- 4.7 Bibliographie

CHAPITRE 5 Vibrocompactage

- 5.1 Introduction et historique
- 5.2 Mode de développement et conception des travaux de vibrocompactage
- 5.3 Mise en œuvre
- 5.4 Principes et limites
- 5.5 Reconnaissance spécifique
- 5.6 Contrôles

5.7 Retours d'expérience

5.8 Conclusion

5.9 Bibliographie

CHAPITRE 6 Compactage à l'explosif

6.1 Introduction et historique

6.2 Mise en œuvre du compactage à l'explosif

6.3 Retours d'expérience

6.4 Conclusion

6.5 Bibliographie

PARTIE 3 Traitement sans adjuvant pour sols cohérents

CHAPITRE 7 Remplacement, allègement, compensation

7.1 Remplacement

7.2 Allègement et compensation

7.3 Bibliographie

CHAPITRE 8 Préchargement avec remblais, avec ou sans drains

8.1 Historique

8.2 Présentation de la technique et domaines d'application

8.3 Modes d'action des techniques de préchargement sur les sols mous

8.4 Comportement des sols mous sous chargement vertical

8.5 Modèles et moyens de calcul, déformation et déplacements

8.6 Modèles et moyens de calcul : vérifications vis-à-vis de la rupture du massif des sols mous de fondation

8.7 Préchargement avec réseaux de drains

8.8 Conception de l'ouvrage

8.9 Exécution des travaux

8.10 Suivi, contrôles, instrumentation

8.11 Retours d'expérience

8.12 Bibliographie

CHAPITRE 9 Consolidation atmosphérique

- 9.1 Historique
- 9.2 Mise en œuvre
- 9.3 Principes de la consolidation atmosphérique
- 9.4 Dimensionnement
- 9.5 Avantages et limites de la méthode
- 9.6 Retours d'expérience
- 9.7 Bibliographie

Renforcement par inclusions rigides verticales

11.1 Historique

Le renforcement des sols par inclusions rigides verticales est sans conteste une technique héritée de celle, très ancienne, consistant à enfoncer un grand nombre de pieux bois, régulièrement espacés, dans les zones marécageuses pour pouvoir y créer des cheminements permanents en surface.

La plus vieille chaussée en bois de Grande-Bretagne a été découverte⁽¹⁾ dans une tourbière du Somerset en 1970 ; elle a pu être datée de 3 800 av. J.-C. (fig. 11.1). Elle combinait, d'une manière extrêmement ingénieuse, différentes pièces de bois en chêne : un « rail » longitudinal posé à la surface du sol et des éléments inclinés, enfoncés dans la tourbe, s'appuyant sur celui-ci pour former des croix régulièrement espacées. Des planches horizontales, d'une longueur de 3 m et dont certaines pouvaient atteindre une largeur de 40 cm, reposaient par des encoches sur ces croix 40 cm au-dessus de la surface du sol. Certaines planches étaient stabilisées par des éléments verticaux plus fins qui les traversaient pour s'enfoncer dans la tourbe et l'argile sous-jacente.

Cette disposition a ceci de remarquable qu'elle permettait de faire supporter la charge appliquée aux planches à la fois par le « rail » posé à la surface de la tourbe et par les éléments inclinés, ancrés. Ce soin à répartir une charge entre la surface du sol et des éléments résistants fichés plus profondément est à l'évidence une application primitive des principes du renforcement des sols par inclusions rigides ; elle peut même d'ailleurs en indiquer une extension possible en exploitant les capacités d'éléments non verticaux !

L'archéologie a révélé d'autres exemples intéressants, plus récents. En France, des fouilles à proximité du village de Benais (Indre-et-Loire) ont permis de relever au travers d'une vallée humide, et sur une longueur d'environ 200 m, les vestiges d'une chaussée romaine⁽²⁾ datant de l'an 8 av. J.-C. L'assise carrossable était faite d'un empierrement de « perrons » (pierres

(1) Coles et Coles, 1986.

(2) Lecompte, 1990.

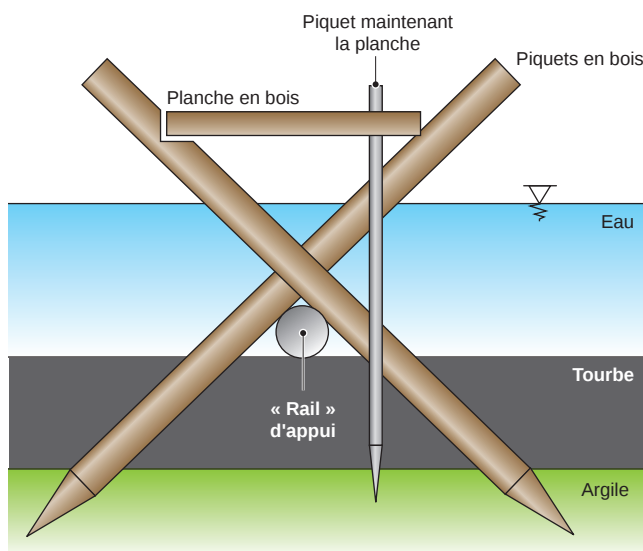


Fig. 11.1. Reconstitution de la Sweet Track (d'après Richerman, 2010, wikimedia.org)

siliceuses) épais d'une trentaine de centimètres. Les pierres étaient disposées de chant et des pieux profondément enfouis dans le substrat sableux avaient été incorporés et encastrés entre celles-ci. Au total 27 pieux ont pu être dénombrés, dont certains étaient encore associés à l'empierrement. Ces pieux de chêne mesuraient en moyenne 1 m de long et 30 cm de diamètre. Leur pointe avait été biseautée afin de faciliter leur enfoncement. Il a même été retrouvé une concentration de 3 alignements de 2 pieux, espacés les uns des autres de 1,60 m à 1,70 m. Cet exemple illustre l'association d'éléments verticaux rigides fichés dans le sol selon un espacement régulier avec une couche d'empierrement qui, en les recouvrant, assure une redistribution des charges appliquées à la chaussée sur la tête des éléments verticaux, d'une part, et sur le sol entre ceux-ci, d'autre part. C'est le principe de tous les ouvrages sur sol renforcé associant un réseau régulier d'inclusions rigides verticales et une couche granulaire formant matelas de répartition.

En 2006, Auvinet et Rodriguez⁽³⁾ ont signalé l'exemple d'un aqueduc qui alimentait en eau potable le centre de la cité aztèque de Tenochtitlán (maintenant Mexico) depuis la colline de Chapultepec. Les inclusions rigides étaient des pieux en bois relativement courts et le matelas de répartition était constitué par un mélange de sable volcanique et de fragments de roche volcanique stabilisés par de la chaux (fig. 11.2).

D'autres analogies peuvent également être trouvées avec l'utilisation combinée des pieux bois et d'empierrements pour préparer l'assise de fondation d'ouvrages d'art. Ainsi en 1806, Cessart⁽⁴⁾ relate dans son compte-rendu des travaux qu'il a conduits autour de 1770 pour la construction du pont de Saumur sur la Loire comment après avoir fait battre 116 pilotes de fondation au droit de la culée sud, il s'est déterminé : « *avant de les faire recéper, à faire verser,*

(3) Auvinet et Rodriguez, 2006.

(4) Cessart, 1806.

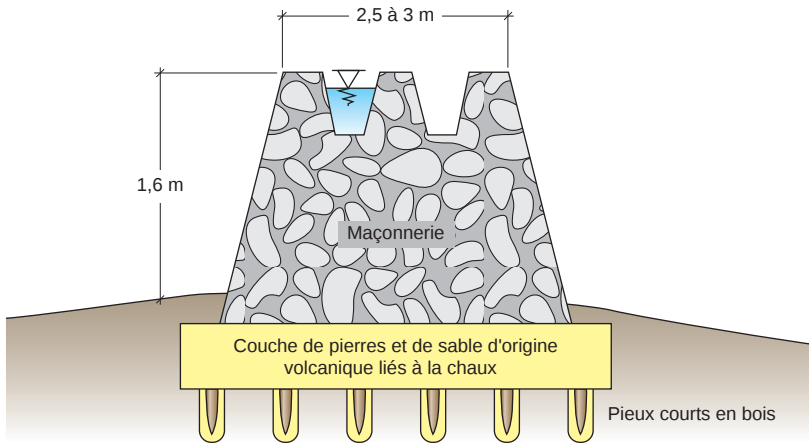


Fig. 11.2. Reconstitution de l'aqueduc aztèque Chapultepec-Tenochtitlán, vers 1465
(d'après Auvinet et Rodriguez, 2006)

entre les pilots sur 2 pieds d'épaisseur seulement, du moellon dur, bien battu avec des masses de fer disposées à cet effet. [...] Il entra environ 28 toises cubes de moellon, ..., la masse restante de 544,320 livres consolidait parfaitement la tête des 116 pilots de fondation ».

Cependant, ce n'est qu'à partir des années 1960 que la technique de renforcement par inclusions rigides verticales a été réellement redécouverte, identifiée et développée comme une technique spécifique.

Plusieurs exemples appliqués dès cette période à la construction d'immeubles ont été décrits à Mexico ; ils ont pour caractéristique commune de chercher à réduire les conséquences des tassements importants subis au centre de Mexico du fait des pompages profonds, en exploitant le phénomène de frottement négatif qui se développe contre des éléments de fondations profondes (pieux). Les exemples de la figure 11.3 illustrent comment une désolidarisation partielle a pu être obtenue entre des bâtiments et des éléments de fondation profonde ancrés sur un niveau résistant, en mobilisant ce phénomène de frottement négatif : sur le schéma de gauche, entre le réseau B des pieux inférieurs et le réseau A de pieux courts non descendus au niveau résistant, sur celui de droite, entre le radier reposant directement sur le sol et le réseau des pieux ancrés sur le sol résistant. La possibilité de retransmettre des charges du sol qui tasse vers des éléments rigides ancrés sur un niveau résistant par simple frottement est la clé de ces dispositions originales de fondation. Cette capacité est également exploitée dans tous les ouvrages fondés sur inclusions rigides.

En Europe, les premières applications documentées sont datées des années 1970. Bjerrum⁽⁵⁾ évoque dans un état de l'art la technique des pieux de décharge (*relief piles*) largement utilisée sous les remblais en Scandinavie, un pays où les zones compressibles abondent. Développée à l'origine en Suède, cette technique a été ensuite utilisée en Norvège. Elle permet de résoudre les problèmes de tassement des remblais à proximité des ouvrages d'art et également ceux rencontrés lorsque la capacité des sols est insuffisante pour supporter les remblais.

(5) Bjerrum, 1972.

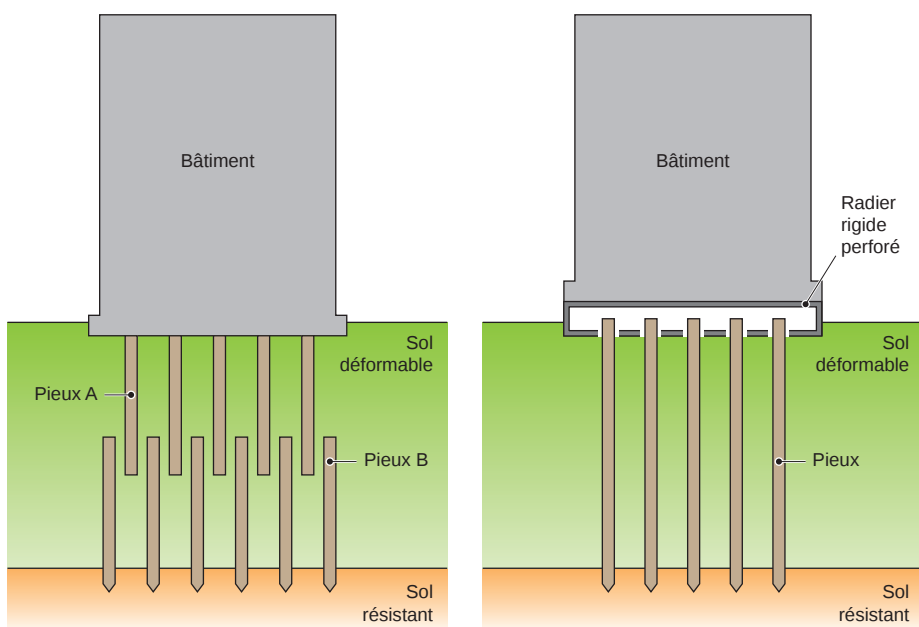


Fig. 11.3. Exemples de désolidarisation partielle de bâtiments
(d'après Auvinet et Rodriguez, 2006)

Constructions des années 1960 à Mexico avec des pieux reposant sur un niveau résistant.

La figure 11.4 présente le principe de fonctionnement des pieux de décharge tel qu'il a été exposé par Kjellmann en 1942. Les pieux sont conçus pour reprendre la fraction de la charge du remblai qui ne peut pas être portée par l'argile molle. La règle de dimensionnement suivie est d'avoir un coefficient de sécurité au glissement dans l'argile supérieur ou égal à l'unité sous la charge résiduelle transmise au sol, et ce, en ignorant les pieux. Les pieux sont généralement en bois. Parfois une dalle en béton armé est posée à leur tête ou bien ils sont recouverts par une couche de sable compacté pour assurer le transfert de la charge du remblai vers les pieux. Dans beaucoup de cas cependant, aucune mesure particulière n'est adoptée et il est considéré que le transfert de charge vers le pieu peut se faire par simple frottement du sol contre celui-ci (frottement négatif du type décrit ci-avant).

En France, l'intérêt pour cette technique fait suite aux travaux sur le frottement négatif menés par Combarieu⁽⁶⁾. Beaucoup d'applications ont été faites depuis lors. Les premières ont surtout concerné des remblais à proximité d'ouvrages d'art. La technique s'est ensuite progressivement étendue à d'autres types d'ouvrages représentant des charges de grande emprise au sol, tels que les réservoirs de stockage, les bassins de station d'épuration ou les dallages industriels. Dans ces dernières applications, les charges concentrées des poteaux ou des murs porteurs sont également souvent supportées par une fondation composite, comprenant une semelle superficielle en béton armé, une couche granulaire intermédiaire et un nombre suffisant d'inclusions sous celle-ci.

(6) Combarieu, 1974, 1988.

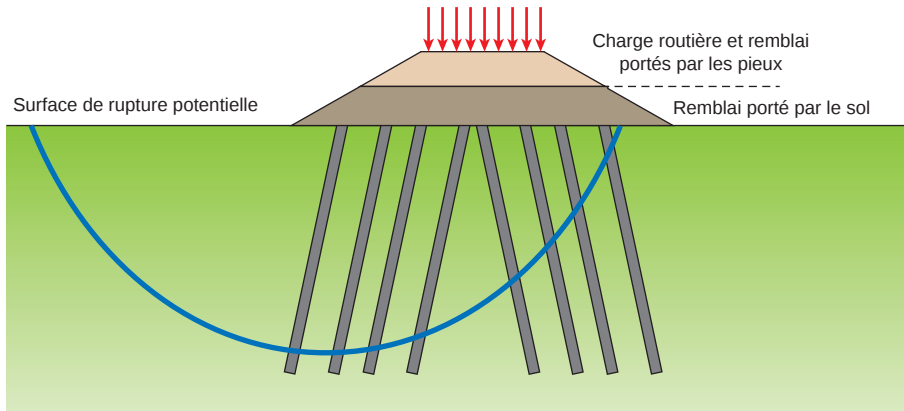


Fig. 11.4. Principe des pieux de décharge pour améliorer la stabilité des remblais sur argile molle exposé par Kjellmann en 1942 (d'après Bjerrum, 1972)

Cet essor très important constaté depuis les années 1990 est le fruit des efforts que les entreprises spécialisées ont consacrés au développement de matériels puissants et performants qui ont permis de diminuer considérablement le prix de revient des inclusions. Le refoulement du sol en place par un outil adapté permettant de réaliser à la remontée une colonne de béton frais de propriétés contrôlées est la technique de réalisation actuellement la plus souvent mise en œuvre.

Ces développements d'ordre technique et un champ d'application plus large englobant des ouvrages des types les plus divers ont mis en lumière la nécessité d'accompagner l'essor de ce mode innovant de renforcement des sols par une meilleure compréhension des mécanismes de fonctionnement afin de pouvoir proposer des règles de dimensionnement adaptées. Cette démarche a justifié le projet national de recherche ASIRI⁽⁷⁾ conduit à l'initiative de l'Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (Irex) entre 2005 et 2011. Ce projet de recherche collaborative a réuni 39 acteurs professionnels et universitaires : entreprises, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, laboratoires et bureaux d'études. Il a permis de conduire un programme expérimental conséquent qui s'est appuyé sur des ouvrages instrumentés dédiés, des modèles physiques en centrifugeuse ou en chambre d'étalonnage et le suivi d'ouvrages réels. De nombreuses modélisations ont été conduites en parallèle pour évaluer les capacités de différentes méthodes à appréhender correctement les observations. Cet ensemble de travaux est la base à partir de laquelle ont pu être élaborées en 2012 les Recommandations ASIRI pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides.

D'autres pays ont également publié durant les dix dernières années des recommandations couvrant tout ou partie des applications de cette technique : il convient de citer plus particulièrement les documents britannique British Standard BS8006 (2010), allemand EBGE0 (2010) et hollandais CUR 226 (2016).

(7) Amélioration des sols par inclusions rigides.

11.2 Mécanisme et fonctionnement

11.2.1 Principe

Ce procédé a pour objectif de renforcer le sol lorsque celui-ci est de capacité portante insuffisante ou trop compressible pour supporter l'ouvrage sans des tassements inadmissibles vis-à-vis des conditions de fonctionnement.

La technique des inclusions rigides verticales permet de transférer la charge apportée en surface par l'ouvrage vers une couche de sol plus résistante et moins compressible. Le principe consiste à associer au minimum :

- un réseau régulier d'inclusions rigides verticales ancrées sous les niveaux compressibles, étendu à la totalité de l'emprise chargée ;
- une couche de matériau coiffant les têtes de ces inclusions, granulaire le plus souvent, dénommée matelas de répartition.

Ces dispositions peuvent être mises en œuvre sous un remblai (fig. 11.5a) ou sous un ouvrage étendu comme un radier ou un dallage (fig. 11.5b).

Le matelas de répartition est indispensable à la qualification de renforcement de sols par « inclusions rigides ». En l'absence d'un matelas de répartition, une solution associant radier (ou semelle) et inclusions doit être assimilée soit à une fondation profonde (si on ignore la réaction du sol sous la semelle), soit à une fondation mixte (si la réaction du sol sous la semelle est considérée en plus de celle des inclusions). La conception d'une fondation mixte n'est pas couverte par les Recommandations ASIRI qui traitent exclusivement du renforcement par inclusions rigides.

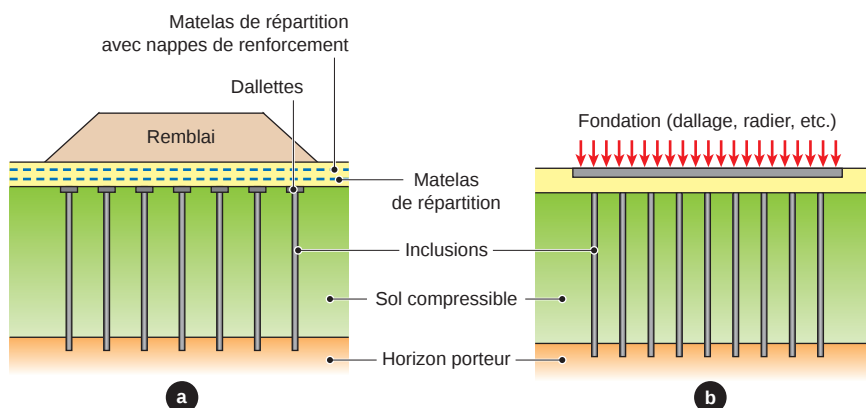


Fig. 11.5. Constituants d'une fondation sur inclusions rigides

Parfois, d'autres éléments sont également utilisés en complément, seuls ou combinés. Il s'agit des :

- dalles disposées sur les têtes d'inclusions pour élargir la surface de contact avec le matelas ;
- nappes de renforcement horizontales déployées dans le matelas de répartition ; celles-ci peuvent être constituées de une ou plusieurs nappes géosynthétiques ou de treillis métalliques (chapitre 12).

Amélioration et renforcement dessols

Tome 2

Cet ouvrage, constitué de deux tomes richement illustrés et en couleur, a pour objectif d'expliquer les techniques d'amélioration des sols, de détailler les outils de conception sur sol amélioré ou renforcé et les travaux d'amélioration des sols.

Chaque chapitre présente une technique d'amélioration de sol, ses domaines d'application, ses avantages et ses limites. Le comportement du matériau amélioré ou renforcé est décrit, les moyens de calcul sont exposés et les paramètres des modèles sont précisés.

Les méthodes d'exécution sont détaillées pour chaque étape : travaux préparatoires, chantier, mise en œuvre des matériaux, mise en place d'adjuvants ou d'inclusions. Le suivi, les opérations de contrôle et l'instrumentation des ouvrages sont également développés. Des retours d'expérience, concernant des ouvrages courants et exceptionnels, concluent chaque présentation.

Le **premier tome** présente les étapes d'investigations, d'études et d'auscultations géotechniques préalables à toute conception et à tout projet d'amélioration. Il détaille également les différentes techniques d'amélioration des sols sans adjuvants, ni inclusions ou injections.

Le **second tome** complète cette revue détaillée en abordant les techniques avec adjuvants, inclusions ou par injection.

Cet ouvrage s'adresse aux géotechniciens de bureaux d'études, de bureaux de contrôle et des entreprises qui souhaitent se spécialiser dans le domaine des techniques d'amélioration et de renforcement des sols. Il sera utile aux décideurs et aux généralistes de la construction qui y trouveront les points forts et les limites de chaque technique. Enfin, il apportera aux étudiants en fin de cursus de géotechnique les éléments nécessaires à la connaissance approfondie de l'amélioration et du renforcement des sols.

Sous la direction de **Laurent Briançon, Philippe Liausu, Claude Plumelle et Bruno Simon.**

Sommaire

Partie 4 ▶ Traitements avec adjuvant ou inclusions pour sols pulvérulents et remblais :

- 10. Colonnes ballastées.
- 11. Renforcement par inclusions rigides verticales.
- 12. Géosynthétiques.

Partie 5 ▶ Traitements par injections :

- 13. Méthodes biologiques.
- 14. Injections ciment et chimiques.
- 15. *Deep Mixing Method* (DMM).
- 16. *Jetgrouting*.
- 17. Injections solides.
- 18. Injection de résine expansive.

Dans le tome 1

Reconnaître et décrire le comportement des sols, investigations et auscultations géotechniques, traitements sans adjuvant pour sols pulvérulents et remblais, compactage dynamique et substitution dynamique, vibrocompactage, compactage à l'explosif, remplacement, allègement, compensation, préchargement avec remblais, avec ou sans drains, consolidation atmosphérique.



978-2-281-14130-6

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR

Photographie de couverture :
© Ph. Liausu

ISSN 2262-5089
ISBN 978-2-281-14212-9



9 782281 142129