



Tome

# Amélioration et renforcement des sols

Sous la direction de

Laurent Briançon

Philippe Liausu

Claude Plumelle

Bruno Simon

Préface de

Roger Frank

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 Briañon** 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 FNTP 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 FNTP 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

Préface.....	5
Sommaire .....	7
Avant-propos .....	9
À propos des auteurs .....	11
Sigles et abréviations.....	13
Liste des symboles .....	17
<b>PARTIE 1</b> <b>Prérequis</b> .....	35
<b>CHAPITRE 1</b> <b>Reconnaître et décrire le comportement des sols</b> .....	37
<b>1.1 Les normes géotechniques dans le cadre de l'amélioration des sols</b> .....	37
1.1.1 Notions générales.....	37
1.1.2 Conception et dimensionnement d'un ouvrage géotechnique .....	38
<b>1.2 Conception d'un projet d'amélioration des sols</b> .....	39
1.2.1 Ingénierie géotechnique.....	39
1.2.2 Étude géotechnique préalable (mission G1).....	40
1.2.3 Étude géotechnique de conception (mission G2) .....	42
<b>1.3 Réalisation du projet d'amélioration des sols</b> .....	42
1.3.1 Études géotechniques de réalisation .....	43
1.3.1.1 <i>Étude et suivi géotechniques d'exécution (mission G3)</i> .....	43
1.3.1.2 <i>Supervision géotechnique d'exécution (mission G4)</i> .....	44
1.3.2 Diagnostic (mission G5) .....	45
<b>1.4 Définitions, descriptions et classifications des sols</b> .....	45
1.4.1 Origines et formations des sols .....	45
1.4.2 Dénomination et descriptions des sols.....	49
1.4.2.1 <i>Sols grossiers minéraux (sable, grave)</i> .....	51
1.4.2.2 <i>Sols fins minéraux (argile, limon)</i> .....	52
1.4.2.3 <i>Sols organiques</i> .....	55
<b>1.5 Classification des sols</b> .....	59
1.5.1 La classification géotechnique des sols des LPC (Ifsttar).....	61
1.5.2 La classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme.....	67

1.5.2.1	<i>Essai Los Angeles</i> .....	70
1.5.2.2	<i>Essai Micro Deval à l'eau</i> .....	70
<b>1.6</b>	<b>Consolidation et fluage des sols</b> .....	71
1.6.1	Consolidation des sols.....	72
1.6.1.1	<i>Amplitude des déplacements de consolidation</i> .....	72
1.6.1.2	<i>Estimation du temps de consolidation</i> .....	76
1.6.2	Fluage des sols.....	81
1.6.2.1	<i>Généralités et définitions</i> .....	81
1.6.2.2	<i>L'apport de Bjerrum pour les argiles</i> .....	83
1.6.2.3	<i>L'apport de Mesri pour les tourbes</i> .....	87
1.6.2.4	<i>Temps de début du fluage</i> .....	88
1.6.2.5	<i>Exemple : tassements de la digue de la Palière</i> .....	90
<b>1.7</b>	<b>Lois de comportement des sols</b> .....	92
1.7.1	Loi élastique linéaire parfaitement plastique avec critère de rupture de Mohr-Coulomb.....	93
1.7.2	Loi élastique linéaire parfaitement plastique avec critère de rupture de Tresca .....	97
1.7.3	Modèle hyperbolique de type élasto-plastique avec écrouissage.....	99
1.7.4	Loi élasto-plastique avec écrouissage (Cam-Clay modifié) .....	102
1.7.5	Loi élasto-plastique avec écrouissage (Cam-Clay modifié) avec fluage ....	106
<b>1.8</b>	<b>Choix de la loi de comportement en fonction du type d'ouvrage</b> .....	106
1.8.1	Loi élastique linéaire.....	107
1.8.2	Loi élastique linéaire parfaitement plastique avec critère de rupture de Mohr-Coulomb.....	107
1.8.3	Modèle hyperbolique de type élasto-plastique avec écrouissage.....	107
1.8.4	Loi élasto-plastique avec écrouissage (Cam-Clay modifié) .....	107
1.8.5	Loi élasto-plastique avec écrouissage (Cam-Clay modifié) avec fluage ....	107
1.8.6	Application à la détermination de la cohésion non drainée $c_u$ .....	107
<b>1.9</b>	<b>Bibliographie</b> .....	113
<b>CHAPITRE 2</b>	<b>Investigations géotechniques</b> .....	115
<b>2.1</b>	<b>Organisation des investigations géotechniques</b> .....	115
2.1.1	Étude géotechnique préalable G1.....	115
2.1.2	Étude géotechnique de conception G2.....	116
<b>2.2</b>	<b>Étude géologique</b> .....	117
<b>2.3</b>	<b>Étude hydrogéologique</b> .....	118

<b>2.4</b>	<b>Reconnaissance géophysique</b> .....	121
2.4.1	Propriétés physiques des sols .....	122
2.4.1.1	<i>Vitesse de propagation des ondes élastiques</i> .....	122
2.4.1.2	<i>Résistivité électrique</i> .....	126
2.4.2	Méthode par sismique réfraction .....	129
2.4.3	Sismique en ondes de surface .....	131
2.4.4	Essais <i>cross-hole</i> , <i>down-hole</i> , <i>up-hole</i> .....	134
2.4.5	Méthode électrique .....	137
<b>2.5</b>	<b>Sondages géologiques</b> .....	140
2.5.1	Sondage carotté .....	140
2.5.2	Le forage destructif avec diagraphies instantanées .....	142
2.5.3	Autres types de forage destructifs .....	145
2.5.4	Pénétromètres .....	145
2.5.4.1	<i>Classification des sols d'après le pénétromètre (CPT)</i> .....	146
2.5.4.2	<i>Classification des sols d'après le piézocône (CPTU)</i> .....	149
2.5.4.3	<i>Cônes spéciaux</i> .....	153
2.5.4.4	<i>Cônes environnementaux</i> .....	153
<b>2.6</b>	<b>Essais de caractérisation géotechnique</b> .....	154
2.6.1	Caractéristiques physiques .....	154
2.6.2	Caractéristiques de déformation des sols grenus .....	158
2.6.3	Caractéristiques de consolidation des sols fins .....	158
2.6.3.1	<i>Généralités</i> .....	158
2.6.3.2	<i>Procédure pour le calage de la valeur de <math>\sigma'_p</math></i> .....	166
2.6.4	Paramètres des lois de fluage .....	168
2.6.5	Paramètres hydrauliques .....	168
2.6.6	Valeurs repères de caractéristiques de consolidation et fluage .....	173
2.6.7	Caractéristiques mécaniques .....	174
2.6.7.1	<i>Généralités</i> .....	174
2.6.7.2	<i>Exemples de modélisation des essais de laboratoire en vue de la conception des ouvrages géotechniques</i> .....	175
<b>2.7</b>	<b>Bibliographie</b> .....	185
<b>CHAPITRE 3</b>	<b>Auscultation géotechnique</b> .....	189
<b>3.1</b>	<b>Principaux paramètres mesurés</b> .....	189
3.1.1	Paramètres mécaniques .....	190
3.1.1.1	<i>Contrainte</i> .....	190
3.1.1.2	<i>Force</i> .....	190

3.1.2	Paramètres géométriques .....	190
3.1.2.1	<i>Déplacement</i> .....	190
3.1.2.2	<i>Déformation</i> .....	190
3.1.2.3	<i>Inclinaison</i> .....	191
3.1.3	Paramètres environnementaux .....	191
3.1.3.1	<i>Température</i> .....	191
3.1.3.2	<i>Vibration</i> .....	191
<b>3.2</b>	<b>Plan d'auscultation</b> .....	191
<b>3.3</b>	<b>Suivi et exploitation des mesures</b> .....	192
<b>3.4</b>	<b>Principaux moyens de mesure</b> .....	192
3.4.1	Mesure du tassement .....	192
3.4.1.1	<i>Tassomètre magnétique en forage</i> .....	193
3.4.1.2	<i>Extensomètre multipoint en forage</i> .....	195
3.4.1.3	<i>Boule tassométrique</i> .....	195
3.4.1.4	<i>Suivi topométrique</i> .....	196
3.4.1.5	<i>Capteur de tassement hydraulique</i> .....	196
3.4.1.6	<i>Profilomètre</i> .....	197
3.4.1.7	<i>Inclinomètre horizontal</i> .....	198
3.4.2	Mesure de la variation de pression interstitielle .....	199
3.4.3	Mesure de la stabilité des talus .....	200
3.4.3.1	<i>Mise en œuvre des forages</i> .....	200
3.4.3.2	<i>Mesures</i> .....	201
<b>3.5</b>	<b>Mesures spécifiques</b> .....	203
3.5.1	Le transfert de charge .....	203
3.5.2	La déformation mesurée par fibres optiques .....	203
<b>3.6</b>	<b>Bibliographie</b> .....	205
<b>PARTIE 2</b>	<b>Traitements sans adjuvant pour sols pulvérulents et remblais</b> .....	207
<b>CHAPITRE 4</b>	<b>Compactage dynamique et substitution dynamique</b> .....	209
<b>4.1</b>	<b>Introduction</b> .....	209
4.1.1	Compactage dynamique .....	209
4.1.2	Substitution dynamique .....	209
<b>4.2</b>	<b>Mise en œuvre du compactage dynamique</b> .....	210
4.2.1	Description générale .....	210

4.2.2	Types de sols traitables par compactage dynamique.....	215
4.2.2.1	<i>Sols naturels</i> .....	215
4.2.2.2	<i>Sols anthropiques</i> .....	216
4.2.3	Mode de dévolution des travaux de compactage dynamique .....	217
4.2.4	Profondeur d'influence.....	217
<b>4.2.5</b>	<b>Exécution pratique du compactage dynamique</b> .....	219
4.2.5.1	Plateforme de travail .....	219
4.2.5.2	Distribution de l'énergie de compactage.....	220
<b>4.3</b>	<b>Contrôle qualité</b> .....	222
4.3.1	Essais d'enfoncement/soulèvement .....	222
4.3.2	Mesures de tassement.....	223
4.3.3	Mesures de pression interstitielle .....	224
4.3.4	Contrôle des caractéristiques mécaniques du sol par essais en place.....	224
4.3.5	Effet du temps après compactage.....	226
4.3.6	Mesures de vibrations.....	228
4.3.6.1	<i>Niveaux admissibles</i> .....	228
4.3.6.2	<i>Exemples de mesures et compilations</i> .....	229
4.3.6.3	<i>Effet des tranchées</i> .....	230
<b>4.4</b>	<b>Substitution dynamique ou plots ballastés pilonnés</b> .....	231
4.4.1	Principe de réalisation .....	231
4.4.2	Contrôles .....	232
4.4.3	Dimensionnement .....	233
<b>4.5</b>	<b>Retours d'expérience</b> .....	233
4.5.1	Compactage dynamique classique de sol sableux en place .....	233
4.5.2	Compactage haute énergie : Al Quoa .....	235
4.5.3	Effondrement de cavités karstiques : projet des autoroutes A71 et A72 en Allemagne.....	237
4.5.4	Combinaison du compactage dynamique et du vibrocompactage .....	237
4.5.5	Compactage dynamique sous-marin.....	240
4.5.6	Traitements de sols spéciaux.....	241
4.5.6.1	<i>Sols affaissables</i> .....	241
4.5.6.2	<i>Remblais hétérogènes</i> .....	243
4.5.7	Retours d'expérience de plots ballastés .....	246
4.5.7.1	<i>Du compactage dynamique à la substitution dynamique</i> .....	246
4.5.7.2	<i>Traitement combiné compactage dynamique / plots ballastés pour une centrale thermique et usine de dessalement</i> .....	247

<b>4.6</b>	<b>Conclusion</b> .....	252
4.6.1	Critères favorables .....	252
4.6.2	Limites de la méthode .....	252
4.6.3	Limite entre compactage dynamique et renforcement par plots ballastés pilonnés .....	253
<b>4.7</b>	<b>Bibliographie</b> .....	254
<b>CHAPITRE 5 Vibrocompactage</b> .....		
<b>5.1</b>	<b>Introduction et historique</b> .....	257
<b>5.2</b>	<b>Mode de dévolution et conception des travaux de vibrocompactage</b> .....	259
<b>5.3</b>	<b>Mise en œuvre</b> .....	260
5.3.1	Équipement utilisé .....	260
5.3.2	Exécution du vibrocompactage .....	262
<b>5.4</b>	<b>Principes et limites</b> .....	263
5.4.1	Fonctionnement .....	263
5.4.2	Champ d'application .....	264
5.4.3	Efficacité .....	266
5.4.4	Incorporation pendant le traitement .....	266
<b>5.5</b>	<b>Reconnaisances spécifiques</b> .....	267
5.5.1	Objectifs des reconnaissances préliminaires .....	267
5.5.2	Méthodes de reconnaissances adaptées aux chantiers de vibrocompactage .....	268
5.5.3	Autres méthodes de reconnaissances .....	269
5.5.4	Densité des reconnaissances .....	269
5.5.5	Interprétation des résultats .....	269
<b>5.6</b>	<b>Contrôles</b> .....	270
5.6.1	Planche d'essais .....	270
5.6.2	Contrôles en cours de travaux .....	272
5.6.3	Contrôles après compactage .....	272
5.6.3.1	<i>Méthodes de contrôle</i> .....	272
5.6.3.2	<i>Densité des contrôles</i> .....	273
5.6.3.3	<i>Effet du temps sur les résultats mesurés après compactage</i> .....	274
<b>5.7</b>	<b>Retours d'expérience</b> .....	274
5.7.1	Compactage de remblais hydrauliques sableux à Hong Kong .....	274
5.7.2	Terminal à conteneurs dans le port de Dakar .....	282
5.7.3	Cas des sables carbonatés .....	287

<b>5.8 Conclusion</b> .....	288
5.8.1 Critères favorables .....	288
5.8.2 Limites de la méthode .....	288
<b>5.9 Bibliographie</b> .....	289
<b>CHAPITRE 6 Compactage à l'explosif</b> .....	293
<b>6.1 Introduction et historique</b> .....	293
<b>6.2 Mise en œuvre du compactage à l'explosif</b> .....	294
6.2.1 Domaine d'application .....	294
6.2.2 Description générale de la méthode.....	295
6.2.3 Théorie .....	297
6.2.4 Établissement d'un projet .....	297
6.2.5 Contrôle des travaux .....	298
6.2.5.1 <i>En cours des travaux</i> .....	298
6.2.5.2 <i>Après compactage</i> .....	298
6.2.6 Effets des tirs sur l'environnement.....	298
<b>6.3 Retours d'expérience</b> .....	299
6.3.1 Chantiers expérimentaux français .....	299
6.3.1.1 <i>Sète</i> .....	300
6.3.1.2 <i>Le Verdon-sur-Mer</i> .....	303
6.3.2 Projet du barrage de Jebba au Nigéria .....	304
6.3.3 Consolidation d'une zone de glissement de terrain en Pologne.....	306
<b>6.4 Conclusion</b> .....	311
6.4.1 Critères favorables .....	311
6.4.2 Limites de la méthode .....	312
<b>6.5 Bibliographie</b> .....	312
<b>PARTIE 3 Traitements sans adjuvant pour sols cohérents</b> .....	315
<b>CHAPITRE 7 Remplacement, allègement, compensation</b> .....	317
<b>7.1 Remplacement</b> .....	317
7.1.1 Présentation .....	317
7.1.2 Avantages et limites .....	318
7.1.3 Conception du remblai technique de substitution.....	318
7.1.4 Exécution du remblai technique de substitution.....	319

7.1.5	Contrôles des caractéristiques du remblai technique de substitution .....	319
7.1.6	Retour d'expérience de remplacement.....	320
7.1.6.1	<i>Plateforme de stockage de nacelles d'éoliennes pour Alstom à Montoir-de-Bretagne (44)</i> .....	320
<b>7.2</b>	<b>Allègement et compensation</b> .....	<b>323</b>
7.2.1	Historique.....	324
7.2.2	Principes d'utilisation.....	324
7.2.3	Avantages et limites .....	324
7.2.4	Matériaux allégés.....	326
7.2.4.1	<i>Propriétés générales</i> .....	326
7.2.4.2	<i>Focus sur le polystyrène expansé (EPS)</i> .....	326
7.2.5	Conception, dimensionnement.....	328
7.2.5.1	<i>Conception des ouvrages</i> .....	328
7.2.5.2	<i>Méthodes de calcul</i> .....	329
7.2.6	Mise en œuvre .....	329
7.2.7	Retours d'expérience de remblais EPS sur sols compressibles .....	332
7.2.7.1	<i>Culée d'ouvrage en remblai EPS (déviation d'Auneau, 2013)</i> .....	332
7.2.7.2	<i>Autoroute de contournement de Kingston (Jamaïque)</i> .....	335
<b>7.3</b>	<b>Bibliographie</b> .....	<b>337</b>
<b>CHAPITRE 8</b>	<b>Préchargement avec remblais, avec ou sans drains</b> .....	<b>339</b>
<b>8.1</b>	<b>Historique</b> .....	<b>339</b>
<b>8.2</b>	<b>Présentation de la technique et domaines d'application</b> .....	<b>340</b>
8.2.1	Technique de préchargement.....	340
8.2.2	Domaines d'application.....	342
8.2.3	Méthodes d'exécution .....	342
8.2.4	Avantages et limites des techniques de préchargement.....	343
<b>8.3</b>	<b>Modes d'action des techniques de préchargement sur les sols mous</b> .....	<b>343</b>
8.3.1	Déplacements : amplitude et vitesse.....	344
8.3.2	Résistance du sol et rupture des massifs de sol mou .....	346
<b>8.4</b>	<b>Comportement des sols mous sous chargement vertical</b> .....	<b>347</b>
8.4.1	Construction du remblai de préchargement.....	347
8.4.1.1	<i>Évolution de la surpression interstitielle</i> .....	348
8.4.1.2	<i>Évolution des déplacements</i> .....	350

8.4.2	Après la construction.....	351
8.4.2.1	<i>Évolution de la surpression interstitielle</i> .....	351
8.4.2.2	<i>Évolution des déplacements</i> .....	353
<b>8.5</b>	<b>Modèles et moyens de calcul, déformations et déplacements</b> .....	<b>354</b>
8.5.1	Tassements durant la construction.....	354
8.5.2	Déplacements horizontaux durant la construction .....	355
8.5.3	Tassements de consolidation après la construction.....	355
8.5.3.1	<i>Cas du sol normalement consolidé</i> .....	357
8.5.3.2	<i>Cas du sol surconsolidé</i> .....	357
8.5.3.3	<i>Calcul de la diffusion de la contrainte verticale</i> .....	359
8.5.3.4	<i>Influence des modifications de géométrie du modèle</i> .....	361
8.5.4	Déplacements horizontaux de consolidation après la construction .....	363
8.5.5	Vitesse de consolidation .....	364
8.5.5.1	<i>Cas d'un chargement de grandes dimensions (remblai)</i> .....	364
8.5.5.2	<i>Cas d'un chargement de faibles dimensions (semelles)</i> .....	368
8.5.6	Déplacements de fluage.....	371
8.5.6.1	<i>Rappels des définitions du fluage</i> .....	371
8.5.6.2	<i>Estimation des déplacements de fluage</i> .....	372
8.5.6.3	<i>Surcharge excédentaire pour anticiper le fluage</i> .....	372
<b>8.6</b>	<b>Modèles et moyens de calcul : vérifications vis-à-vis de la rupture du massif de sols mous de fondation</b> .....	<b>378</b>
8.6.1	Coefficients de sécurité .....	378
8.6.2	Choix des paramètres de calcul.....	379
8.6.3	Vérifications vis-à-vis du poinçonnement par abaques.....	380
8.6.3.1	<i>Cas d'un substratum à faible profondeur et d'une cohésion constante</i> .....	381
8.6.3.2	<i>Cas d'un substratum à faible profondeur et d'une cohésion variable</i> .....	381
8.6.4	Vérifications vis-à-vis de la rupture rotationnelle .....	384
8.6.4.1	<i>Vérification par abaques dans les cas simples</i> .....	384
8.6.4.2	<i>Vérification par logiciels dans les cas courants ou complexes</i> .....	387
<b>8.7</b>	<b>Préchargement avec réseaux de drains</b> .....	<b>399</b>
8.7.1	Objectifs.....	399
8.7.2	Caractéristiques des drains utilisés .....	401
8.7.2.1	<i>Drains de sable</i> .....	401
8.7.2.2	<i>Drains préfabriqués</i> .....	402
8.7.3	Dimensionnement du réseau de drains verticaux .....	405
8.7.3.1	<i>Consolidation radiale</i> .....	406
8.7.3.2	<i>Prise en compte de la capacité des drains et du remaniement</i> .....	409

<b>8.8</b>	<b>Conception de l'ouvrage</b> .....	410
8.8.1	Choix des critères de conception du projet .....	410
8.8.2	Choix des coupes et paramètres de calcul.....	410
8.8.3	Calcul du tassement sous l'ouvrage fini .....	411
8.8.4	Calcul du tassement après livraison de l'ouvrage.....	411
8.8.5	Calcul de la hauteur de remblai à mettre en place pour anticiper le tassement de consolidation et le tassement secondaire (fluage) en accord avec les critères du projet.....	412
8.8.6	Analyse de la stabilité du remblai .....	413
<b>8.9</b>	<b>Exécution des travaux</b> .....	415
8.9.1	Travaux préparatoires.....	415
8.9.2	Installation des drains préfabriqués .....	416
8.9.3	Mise en place du remblai de préchargement.....	418
8.9.4	Suivi de la consolidation .....	418
8.9.5	Enlèvement du remblai excédentaire.....	418
<b>8.10</b>	<b>Suivis, contrôles, instrumentation</b> .....	418
8.10.1	Plan d'auscultation et d'instrumentation.....	419
8.10.2	Mesure des déplacements .....	420
8.10.2.1	<i>Tassements</i> .....	420
8.10.2.2	<i>Déplacements horizontaux</i> .....	421
8.10.3	Mesure des pressions interstitielles .....	421
8.10.4	Vérification de la stabilité du massif de sol mou durant l'édification du remblai.....	421
8.10.5	Mesure de la stabilité des talus .....	421
8.10.6	Suivi et exploitation des mesures.....	421
8.10.6.1	<i>Suivi des mesures</i> .....	421
8.10.6.2	<i>Méthodes d'extrapolation des mesures acquises à une date donnée</i> .....	423
<b>8.11</b>	<b>Retours d'expérience</b> .....	425
8.11.1	Ouvrage courant : dallage d'un entrepôt.....	425
8.11.1.1	<i>Présentation</i> .....	425
8.11.1.2	<i>Conditions géotechniques</i> .....	425
8.11.1.3	<i>Choix de la solution</i> .....	425
8.11.1.4	<i>Dimensionnement de la solution</i> .....	426
8.11.1.5	<i>Réalisation des travaux</i> .....	427
8.11.1.6	<i>Suivi de la consolidation et des tassements</i> .....	427
8.11.2	Terminal France du tunnel sous la Manche.....	427
8.11.2.1	<i>Présentation</i> .....	427
8.11.2.2	<i>Contexte géotechnique</i> .....	429
8.11.2.3	<i>Principes de l'amélioration par préchargement</i> .....	431

8.11.2.4	<i>Conduite des études d'exécution</i> .....	431
8.11.2.5	<i>Déroutement du chantier</i> .....	432
8.11.2.6	<i>Suivi et contrôles du préchargement</i> .....	433
8.11.2.7	<i>Enseignements</i> .....	435
<b>8.12</b>	<b>Bibliographie</b> .....	435
<b>CHAPITRE 9 Consolidation atmosphérique</b> .....		
<b>9.1</b>	<b>Historique</b> .....	439
<b>9.2</b>	<b>Mise en œuvre</b> .....	440
9.2.1	Remblaiement de la zone à consolider .....	440
9.2.2	Installation d'un réseau de drains préfabriqués .....	441
9.2.3	Réalisation des drains horizontaux .....	441
9.2.4	Réalisation des tranchées périphériques d'étanchéité .....	442
9.2.5	Pose de la membrane sur l'emprise du sol à consolider .....	442
9.2.6	Connexion des pompes et début du pompage sous vide .....	443
9.2.7	Arrêt du pompage après obtention du degré de consolidation requis .....	443
<b>9.3</b>	<b>Principe de la consolidation atmosphérique</b> .....	444
<b>9.4</b>	<b>Dimensionnement</b> .....	447
<b>9.5</b>	<b>Avantages et limites de la méthode</b> .....	448
<b>9.6</b>	<b>Retours d'expérience</b> .....	449
9.6.1	Construction de l'autoroute A837 entre Saintes et Rochefort (France) .....	449
9.6.1.1	<i>Présentation</i> .....	449
9.6.1.2	<i>Conditions géotechniques</i> .....	449
9.6.1.3	<i>Choix de la solution</i> .....	450
9.6.1.4	<i>Mise en œuvre</i> .....	451
9.6.1.5	<i>Suivi et contrôle géotechnique</i> .....	453
9.6.2	Consolidation accélérée de vases molles pour l'usine EADS A380 de Hambourg .....	455
9.6.2.1	<i>Présentation</i> .....	455
9.6.2.2	<i>Conditions géotechniques</i> .....	456
9.6.2.3	<i>Problématique du projet</i> .....	457
9.6.2.4	<i>Méthode de construction</i> .....	457
9.6.2.5	<i>Déroutement des travaux d'amélioration de sols</i> .....	458
9.6.2.6	<i>Suivi des tassements après la fin des travaux</i> .....	463
<b>9.7</b>	<b>Bibliographie</b> .....	464
	Index .....	467

Dans le tome 2 :

**PARTIE 4 Traitements avec adjuvant ou inclusions pour sols pulvérulents et remblais**

**CHAPITRE 10 Colonnes ballastées**

- 10.1 Historique
- 10.2 Principe de fonctionnement
- 10.3 Domaine d'application
- 10.4 Principe de mise en œuvre
- 10.5 Avantages et limites de la technique
- 10.6 Dimensionnement
- 10.7 Dimensionnement par modélisations numériques
- 10.8 Contrôle et réception
- 10.9 Colonnes confinées
- 10.10 Retours d'expérience
- 10.11 Bibliographie

**CHAPITRE 11 Renforcement par inclusions rigides verticales**

- 11.1 Historique
- 11.2 Mécanisme et fonctionnement
- 11.3 Critères de choix
- 11.4 Modèles pour le dimensionnement
- 11.5 Reconnaissances spécifiques adaptées
- 11.6 Conception de l'ouvrage
- 11.7 Exécution des travaux
- 11.8 Suivis, contrôles et instrumentations
- 11.9 Retours d'expérience
- 11.10 Bibliographie

**CHAPITRE 12 Géosynthétiques**

- 12.1 Notions de base
- 12.2 Géosynthétiques de renforcement

- 12.3 Mécanismes de renforcement des sols
- 12.4 Ouvrages renforcés
- 12.5 Instrumentation des géosynthétiques
- 12.6 Normalisation et contrôles
- 12.7 Bibliographie

## **PARTIE 5 Traitements par injection**

### **CHAPITRE 13 Méthodes biologiques**

- 13.1 Historique
- 13.2 Types de biosol
- 13.3 Biocalcification
- 13.4 Retours d'expérience
- 13.5 Bibliographie

### **CHAPITRE 14 Injections ciment et chimiques**

- 14.1 Historique
- 14.2 Principe de fonctionnement des injections
- 14.3 Domaines d'application
- 14.4 Avantages et limites de la technique
- 14.5 Coulis
- 14.6 Conception du projet
- 14.7 Mise en œuvre des coulis
- 14.8 Contrôles
- 14.9 Retour d'expérience
- 14.10 Bibliographie

### **CHAPITRE 15 Deep Mixing Method (DMM)**

- 15.1 Historique
- 15.2 Descriptions des différentes méthodes
- 15.3 Documents de référence
- 15.4 Présentation des différentes techniques de DMM

- 15.5 Différentes géométries des installations de DMM
- 15.6 Domaines d'application de la DMM
- 15.7 Avantages et limites de la méthode
- 15.8 Le matériau soilmix
- 15.9 Conception et dimensionnement de l'ouvrage
- 15.10 Exécution des ouvrages géotechniques
- 15.11 Contrôles pendant et après la construction
- 15.12 Ouvrages courants
- 15.13 Ouvrage exceptionnel : LPV 111 à La Nouvelle-Orléans
- 15.14 Bibliographie

## **CHAPITRE 16** Jet grouting

- 16.1 Historique
- 16.2 Principe de fonctionnement
- 16.3 Domaine d'application
- 16.4 Techniques
- 16.5 Matériaux
- 16.6 Géométrie
- 16.7 Exécution
- 16.8 Avantages et limites de la technique
- 16.9 Dimensionnement
- 16.10 Contrôle et réception
- 16.11 Retours d'expérience
- 16.12 Bibliographie

## **CHAPITRE 17** Injection solide

- 17.1 Historique
- 17.2 Principe de fonctionnement
- 17.3 Domaines d'application
- 17.4 Avantages et limites de la technique
- 17.5 Conception et dimensionnement

- 17.6 Exécution
- 17.7 Contrôles et réception
- 17.8 Retours d'expérience
- 17.9 Bibliographie

## **CHAPITRE 18 Injection de résine expansive**

- 18.1 Historique
- 18.2 Principes de l'injection de résine expansive
- 18.3 Domaines d'application et limites d'emploi
- 18.4 Valorisation et cadre contractuel
- 18.5 Propriétés de la résine expansive
- 18.6 Diffusion de la résine dans le sol
- 18.7 Dimensionnement
- 18.8 Concevoir un projet d'injection de résine expansive
- 18.9 Mise en œuvre
- 18.10 Suivis et contrôles
- 18.11 Retours d'expérience
- 18.12 Bibliographie

## **ANNEXES**

**ANNEXE A1** Inclusions rigides verticales – Modèle numérique : points principaux à arrêter

**ANNEXE A2** Inclusions rigides verticales – Modèle par homogénéisation sous un dallage : méthodes des moments additionnels

**ANNEXE A3** Inclusions rigides verticales – Conception de l'ouvrage : vérifications GEO

**ANNEXE A4** Inclusions rigides verticales – Conception de l'ouvrage : vérifications STR

**ANNEXE A5** Géosynthétiques : vérifications des nappes de renforcement au-dessus d'inclusions rigides

## Compactage à l'explosif

### 6.1 Introduction et historique

Le compactage à l'explosif est une méthode de traitement de sol essentiellement destinée à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sables saturés lâches.

Sous l'action de la charge placée au sein du massif, les grains sont brusquement soulevés, tandis que se développent des surpressions interstitielles et que se produit une dislocation de la structure initialement lâche (photo 6.1). À la suite de ce bref mouvement, les grains se remettent ensuite en place les uns par rapport aux autres dans un état plus dense. Du fait de la perméabilité élevée des sables, les surpressions interstitielles se dissipent rapidement, de sorte que le tassement se stabilise en très peu de temps.



Photo 6.1. Vue d'un chantier de compactage à l'explosif au moment du tir, Gdansk – Pologne  
(© Ménard Polska)

Ce procédé a été développé à partir des années 1930, d'abord essentiellement en URSS, puis aux États-Unis où des premières applications réussies sont signalées dès 1936 et 1941. Dans les années 1970 et 1980, cette méthode a fait l'objet de recherches et d'applications, en URSS par le professeur Ivanov de l'université de Leningrad, en Pologne sous l'impulsion du professeur Dembicki de l'université de Gdansk, en Roumanie pour le traitement de lœss affaissables, ainsi qu'aux États-Unis par l'armée américaine. En dehors de l'Europe, de l'URSS et de l'Amérique du Nord, peu d'applications notables de cette méthode sont enregistrées, à l'exception de celle du barrage de Jebba au Nigéria.

Pour ce qui est de la France, le nombre de réalisations reste très limité et revêt surtout la forme de chantiers expérimentaux comme celui du port de Sète (34) à la fin des années 1970 et celui de Verdon-sur-Mer (33) au début des années 1980.

On constate donc, que bien qu'utilisée depuis plus de 80 ans, cette méthode de compactage à l'explosif n'est pas encore acceptée de façon universelle et reste relativement confidentielle et ce, malgré son faible coût et son efficacité pour les grandes profondeurs. Son caractère empirique et la réticence à utiliser des produits sensibles tels que les explosifs en sont sûrement les premières causes.

## 6.2 Mise en œuvre du compactage à l'explosif

### 6.2.1 Domaine d'application

Les sols qui peuvent être efficacement traités par compactage à l'explosif sont essentiellement des sables lâches saturés, possédant moins de 20 % de fines correspondant au fuseau B de la fig. 6.1.

Ces couches sableuses peuvent être des alluvions en place ou des remblais sableux mis en œuvre par voie hydraulique.

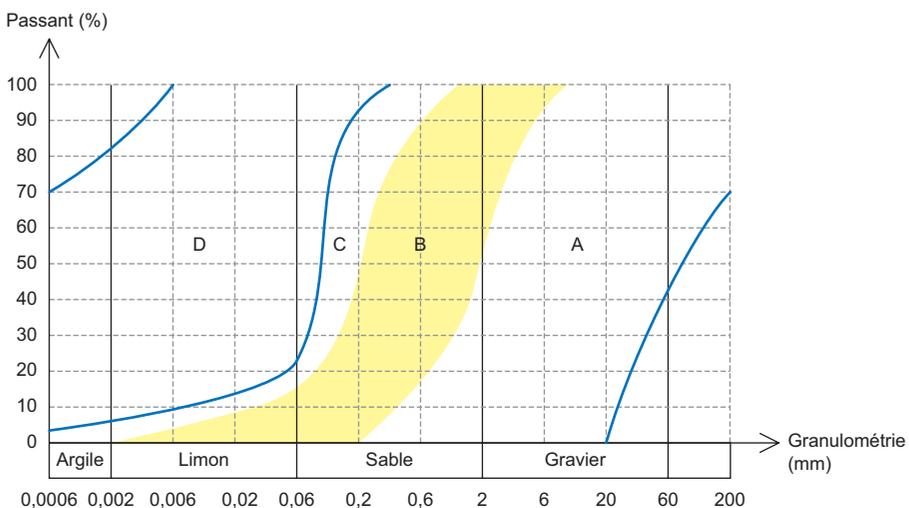
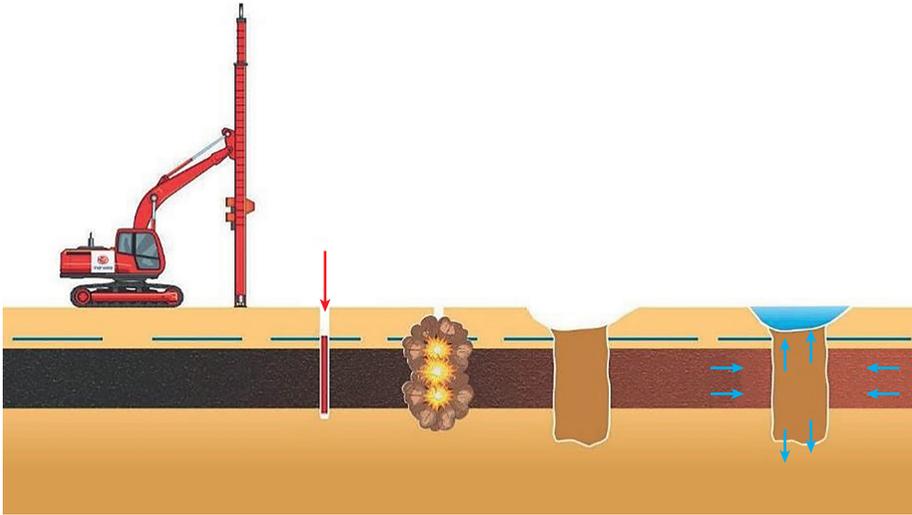


Fig. 6.1. Fuseau granulométrique des sables densifiables à l'explosif (source : Synduex<sup>(1)</sup>)

(1) Syndicat national des entrepreneurs de Travaux Publics spécialisés dans l'utilisation de l'explosif.

Dans certains cas plus rares, répertoriés en Pologne notamment, la méthode a pu être utilisée en présence de couches de sols argileux cohérents. Dans ce cas, l'explosion d'une charge linéaire dans la couche d'argile va générer une augmentation brutale de surpression interstitielle qui amorcera un processus de consolidation. Si cette couche argileuse est surmontée par du sable, celui-ci va s'effondrer dans la cavité résultant du tir et ainsi créer un drain de sable qui permettra de drainer et accélérer la consolidation de la couche argileuse, ainsi qu'on peut le voir sur la figure 6.2.



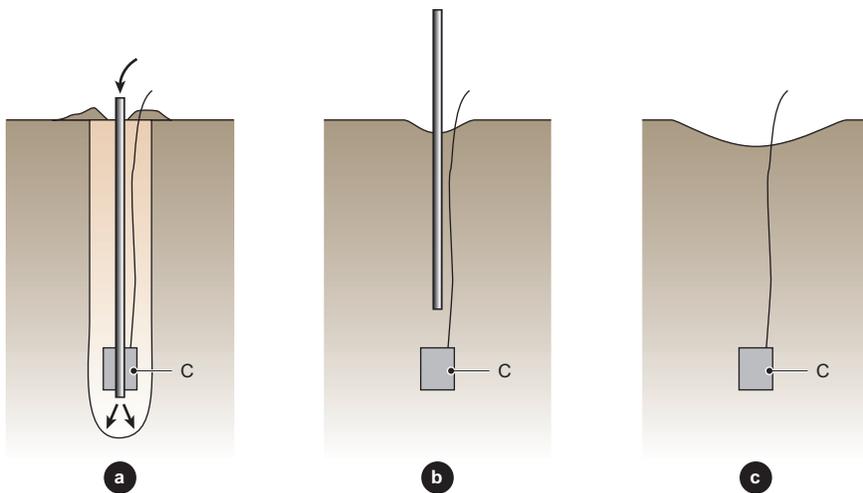
**Fig. 6.2. Réalisation de colonnes de sable dans une couche argileuse par des explosifs**  
(source : Ménard Polska)

### 6.2.2 Description générale de la méthode

Le principe général de la méthode consiste à placer des charges explosives dans des forages réalisés dans le volume de sol à compacter. Dans les sables saturés, ce forage peut être effectué facilement par lancement (fig. 6.3). Les charges sont généralement placées à des profondeurs comprises entre la moitié et les trois quarts de la profondeur à traiter. Comme on peut le voir sur la figure 6.4, l'espacement des forages disposés en grille régulière est compris entre 5 et 10 m et le traitement se fait en plusieurs phases séquentielles séparées par un temps de repos du terrain.

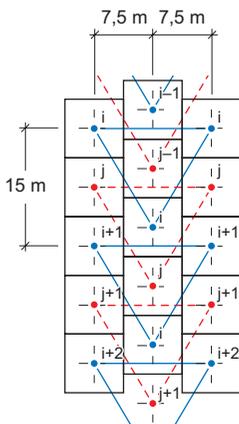
Pour chaque phase, la mise à feu des charges à différentes profondeurs se fait de façon différée.

La quantité d'explosif de chaque charge individuelle est en général comprise entre un et quelques kilogrammes. La quantité totale d'explosif à prévoir par mètre cube traité est évidemment très variable suivant l'état initial du sol et la compacité visée après traitement : elle se situe généralement dans une fourchette de 30 à 120 g/m<sup>3</sup>.



**Fig. 6.3. Mise en place des explosifs** (d’après brevet Lyman, 1942)

- a) Lançage de la charge C au moyen d’un tube
- b) Retrait du tube
- c) Le sable s’est éboulé sur la charge C



**Fig. 6.4. Maillage typique de traitement** (d’après Carpentier *et al.*, 1985)

L’effet du compactage à l’explosif est plus prononcé en profondeur où des indices de densité de 0,7 à 0,8 peuvent être obtenus, tandis que les couches supérieures où la contrainte verticale due au poids des terres est plus faible sont moins bien compactées.

Il peut donc être nécessaire de prévoir, en complément, un compactage de ces couches supérieures par une autre méthode.

### 6.2.3 Théorie

La détonation d'une charge explosive enterrée entraîne deux ébranlements :

- une onde de plastification qui génère un état de contrainte de faible durée correspondant à l'expansion d'une cavité sphérique, avec une proportion importante de cisaillements et même de tractions, qui détruisent le squelette solide du sol ;
- un train d'ondes élastiques (voir § 2.4.1) qui prennent naissance en tous les points de la frontière de l'extension de l'onde de plastification et qui comprennent à partir de chaque source :
  - une onde de compression, encore appelée « onde P », laquelle circule essentiellement dans la phase liquide et qui, par ses pulsations, a tendance à détruire le squelette solide du sol ;
  - une onde de cisaillement, encore appelée « onde S », de plus faible vitesse de propagation, qui circule de particule en particule et qui tend, aidée par la gravité, à redéposer les particules solides dans un état plus dense que l'état initial.

#### REMARQUE

À ces deux types d'ondes de volume, s'ajoutent des ondes de réflexion et de réfraction sur les interfaces de couches, ainsi qu'une onde de surface. Nous les mentionnons simplement pour mémoire.

La première manifestation de la densification de la couche traitée est l'affaissement quasi-instantané du niveau de la surface du sol. À chaque nouveau tir, l'abaissement du sol augmente, mais de plus en plus faiblement. Prugh<sup>(2)</sup> a donné par exemple les proportions suivantes : 65 % d'abaissement à la première passe, 25 % à la deuxième passe, etc.

Suivant l'état initial du terrain et la compacité finale obtenue, le pourcentage de tassement, rapporté à la hauteur de sol compacté, se situe dans une fourchette comprise entre 2 et 10 %.

Après chaque tir, on constate une remontée d'eau et de gaz en surface, généralement par les trous des sondages antérieurs, et qui forme de véritables petits geysers.

### 6.2.4 Établissement d'un projet

Il n'existe pas de théorie permettant de déterminer précisément à l'avance la quantité d'explosif à prévoir, ainsi que les paramètres de mise en œuvre (maillage, décalage entre les tirs, phasage, etc.). C'est donc l'expérience acquise sur des chantiers déjà réalisés dans des conditions similaires qui permet d'estimer tous ces paramètres pour un projet donné.

Les principaux paramètres d'un projet de densification par explosifs sont :

- la maille des charges ;
- la quantité d'explosif par forage ;
- le nombre de passes ;
- l'incidence éventuelle des tirs sur le voisinage.

On commence généralement le chantier par une planche d'essais qui a essentiellement pour but de tester la disposition des charges dans le sol afin de maximiser le tassement induit par les tirs et de permettre une dissipation relativement rapide des surpressions interstitielles.

(2) Prugh, 1963.

## 6.2.5 Contrôle des travaux

### 6.2.5.1 En cours des travaux

Les principaux paramètres à contrôler en cours de travaux sont :

- Le tassement induit par les tirs : comme dans toute méthode de compactage, c'est une réduction de l'indice des vides du sol qui est visée et l'amélioration des caractéristiques mécaniques du terrain sera d'autant plus importante que ce tassement sera élevé. Ce tassement se décompose en un tassement immédiat, prépondérant pour des sables propres, et un tassement différé consécutif à la dissipation des surpressions interstitielles provoquées par les tirs. La mesure de ce tassement se fait très facilement par simple nivellement topographique de la plate-forme après chaque passe de tirs.
- Les surpressions interstitielles induites par les tirs : bien que la dissipation soit généralement assez rapide lorsqu'on traite des matériaux sableux propres, il peut être nécessaire de suivre ces surpressions grâce à des piézomètres préalablement installés dans le volume de sol traité.
- L'incidence des tirs sur l'environnement<sup>(3)</sup>.

### 6.2.5.2 Après compactage

L'objectif de ce type de traitement étant d'améliorer les caractéristiques mécaniques du sol, des essais géotechniques *in situ* de contrôle sont réalisés après compactage de façon à contrôler l'amélioration effectivement obtenue vis-à-vis des spécifications du contrat.

Pour des sols sableux, ces essais peuvent être des pénétromètres statiques (CPT), des pénétromètres dynamiques (de type SPT) ou des pressiomètres (PMT).

Pour des méthodes de type dynamique comme les explosifs, et au même titre que pour le compactage dynamique ou le vibrocompactage, il est important de savoir que ces essais doivent être réalisés après un temps de repos du terrain et après dissipation totale des surpressions interstitielles.

Les résultats géotechniques mesurés immédiatement après la fin des travaux sont généralement inférieurs aux résultats que l'on pourrait mesurer quelques semaines ou mois après. On pourra se reporter à ce qui a été exposé au § 4.3.5 du chapitre sur le compactage dynamique.

## 6.2.6 Effets des tirs sur l'environnement

Comme toutes les techniques d'amélioration des sols provoquant des ébranlements, la densification des sables par explosifs est une source potentielle de dommages pour le voisinage.

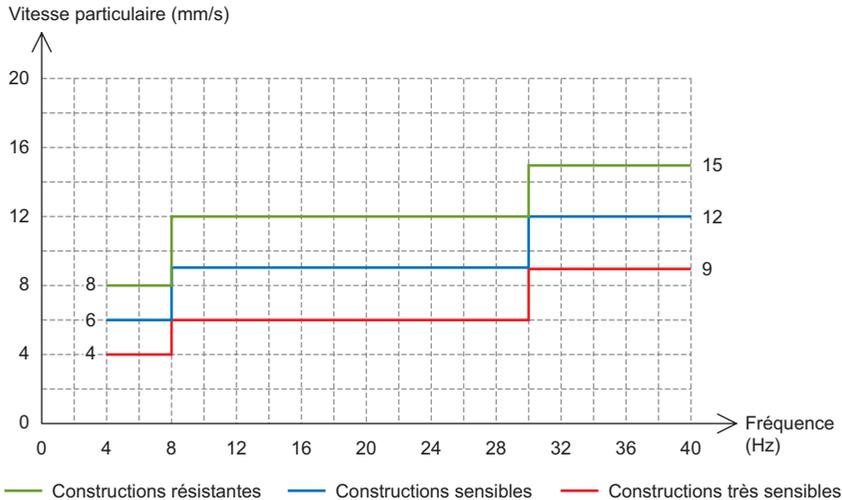
On cale habituellement les risques de dommages à une structure sur la vitesse particulière maximale enregistrée sur les éléments composant cette structure. Les règles les plus récentes édictées pour limiter les nuisances provoquées par les établissements industriels classés<sup>(4)</sup> bien que non opposables réglementairement aux activités du domaine du bâtiment et des travaux publics, sont traduites sur la figure 6.5. Cette figure donne les valeurs-limites de la

(3) Ce point est spécifiquement abordé dans le § 6.2.6.

(4) Circulaire du 23 juillet 1986 (ministère de l'Environnement, 1986).

vitesse particulière en fonction de la fréquence observée, pour des vibrations à impulsions répétées à intervalles assez courts, mais dont la durée d'une émission est inférieure à 500 millisecondes et l'espacement entre deux émissions successives supérieur à une seconde.

Ces valeurs limites sont valables pour chacune des trois composantes du mouvement.



**Fig. 6.5. Vitesses particulières admissibles sur les structures**

Au voisinage d'établissements industriels classés pour des vibrations impulsionnelles à impulsions répétées (ministère de l'Environnement, circulaire du 23 juillet 1986)

Pour estimer à l'avance la charge maximale d'un tir en fonction de la distance des structures critiques ou des habitants voisins, l'expérience montre que la vitesse particulière est une fonction de  $\frac{L}{\sqrt{Q}}$  où  $Q$  est la charge et  $L$  la distance entre le point où l'on cherche à estimer le niveau de vibrations et le point de tir. On donne sur la figure 6.6 l'allure de la fonction, pour laquelle on a malheureusement très peu de données dans le cas de la densification des sables lâches.

## 6.3 Retours d'expérience

### 6.3.1 Chantiers expérimentaux français

Ces chantiers ont fait l'objet de publications<sup>(5)</sup> dont sont reprises les données qui suivent ci-après.

(5) Simon, 1980 ; Gambin, 2004.