

Bertrand HUBERT
Bruno PHILIPPONNAT
Olivier PAYANT
Moulay ZERHOUNI

FONDATIONS ET OUVRAGES EN TERRE

Manuel professionnel
de géotechnique du BTP

Préface de Gérard Philipponnat

● Éditions
EYROLLES



Bertrand HUBERT, Bruno PHILIPPONNAT,
Olivier PAYANT & Moulay ZERHOUNI

FONDATEMENTS ET OUVRAGES EN TERRE

Manuel professionnel de géotechnique du BTP

Les ingénieurs trouveront dans ce manuel professionnel comment résoudre les problèmes de **conception**, de **réalisation** et de **maintenance** d'un ouvrage, et ceux que pose l'aménagement d'un **site** dans son **interaction avec le sol**.

Formant une équipe de quatre spécialistes appartenant à trois générations de géotechniciens, les auteurs se sont appuyés sur la plus récente **normalisation** en géotechnique (dont la norme des missions d'ingénierie géotechnique), sur l'**Eurocode 7** (calcul géotechnique) et sur les normes nationales d'application qui en ont résulté, ainsi que la dernière **réglementation parasismique**.

La **première partie** contient les **bases** nécessaires aux études géotechniques : géologie, mécanique des sols, propriétés géotechniques des formations géologiques,

contexte hydrogéologique et caractérisation des paramètres de sol.

La **seconde partie** présente la **conception** et le **dimensionnement** des ouvrages géotechniques : fondations, améliorations de sols, soutènements, ouvrages en terre et aménagements de terrains, ouvrages hydrauliques.

Un **index de plus de 700 entrées** permet d'aller directement à l'information recherchée. D'abondantes **annexes** donnent accès aux sources et exposent en détail les principaux développements théoriques. Elles comprennent les **tableaux** et les **formulaires** usuels (corrélations, coefficients partiels, échelle stratigraphique, etc.). Les **références normatives** y sont également regroupées tandis que chacun des quinze chapitres est suivi de la **bibliographie** correspondante.

Normalisation en géotechnique – 1. Les sols et la géologie – 2. Propriétés physiques – 3. Propriétés hydrauliques – 4. Théorie de la consolidation – 5. Comportement mécanique – 6. Reconnaissance des sols – 7. Calcul géotechnique et Eurocode 7 – 8. Sollicitations sismiques – 9. Stabilité des pentes et des talus – 10. Actions des terres sur les soutènements – 11. Fondations superficielles – 12. Fondations profondes – 13. Ouvrages de soutènement – 14. Fondations mixtes, amélioration et renforcement des sols – 15. Conception et dimensionnement des ouvrages hydrauliques – Symboles et notations – Annexes – Liste des normes – Index

Géologue et ingénieur en géotechnique, **Bertrand Hubert** est, avec Gérard Philipponnat, le coauteur de la deuxième édition de *Fondations et ouvrages en terre*. Après avoir participé à la création de Solen – bureau d'études spécialisé notamment en géotechnique – il a rejoint le groupe Socotec comme spécialiste en sols et fondations. Membre de diverses sociétés savantes et de commissions techniques spécialisées, il s'est également vu confier des fonctions de représentation au sein d'associations professionnelles. À l'université de Franche-Comté et à l'université Paris-Sud (faculté des sciences d'Orsay) il a enseigné aux futurs ingénieurs la géotechnique et la géologie appliquée.

Pour refondre ce manuel technique de référence, il a réuni une équipe de spécialistes en géotechnique dont le parcours professionnel a été en grande partie associé à Solen.

Ingénieur de Centrale Lille et fils de Gérard Philipponnat, **Bruno Philipponnat** est actuellement président de Sogéo Expert, bureau d'études en géotechnique. Ancien secrétaire de l'USG (Union syndicale géotechnique), il enseigne l'ingénierie des ouvrages géotechniques à l'ENSIP (École nationale supérieure d'ingénieurs de Poitiers).

Ingénieur diplômé de Polytech Lille, **Olivier Payant** est un expert reconnu des problématiques de fondations et de soutènements pour les projets de génie civil et de bâtiment. Il a notamment exercé pendant 13 années au sein de la direction technique Construction de Socotec en tant que spécialiste sols et fondations avant d'intégrer le bureau d'études Terrasol (groupe Setec) en 2019.

Ingénieur TP d'Alger, ingénieur géotechnicien, docteur en mécanique des sols de l'École Centrale de Paris et membre de la direction technique de Fondasol, **Moulay Idriss Zerhouni** préside actuellement la commission de normalisation Reconnaissances et essais géotechniques (CNREG). Il enseigne la géotechnique à l'université Le Havre-Normandie et à l'école d'ingénieurs UniLasalle de Beauvais.

En couverture :

Sondage à la tarière hélicoïdale continue © Kornog

Analyse granulométrique par sédimentométrie © Sogéo Expert

Confection des cages d'armatures des pieux de fondation de gros diamètre pour un ensemble d'IGH à Abu Dhabi © Bertrand Hubert

Chantier d'amélioration de sol par inclusions rigides de sols traités au liant (*Deep Soil Mixing*) © Olivier Payant

Mise place du ferrailage du radier d'une tour de bureaux à Marseille © Pierre Janeix

Fondations et ouvrages en terre

Géotechnique du BTP

Bertrand HUBERT
Bruno PHILIPPONNAT
Olivier PAYANT
Moulay ZERHOUNI

Fondations et ouvrages en terre

Géotechnique du BTP

Nouvelle édition refondue

Préface de Gérard Philipponnat

ÉDITIONS EYROLLES
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Sauf mention contraire, les photographies et les schémas sont de l'auteur.
Droits réservés pour les autres illustrations.

Mise en pages: GraphieProd/Jean-Louis Liennard
Adaptation des schémas: Lionel Auvergne

Aux termes du Code de la propriété intellectuelle, toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle de la présente publication, faite par quelque procédé que ce soit (reprographie, microfilmage, scannérisation, numérisation...) sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. L'autorisation d'effectuer des reproductions par reprographie doit être obtenue auprès du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) – 20, rue des Grands-Augustins – 75006 Paris.

© Éditions Eyrolles, 2019
ISBN: 978-2-212-11890-2

Sommaire

Préface	XXVII
Avant-propos	XXIX
Introduction. Normalisation en géotechnique	1
CHAPITRE 1. Les sols et la géologie	11
CHAPITRE 2. Propriétés physiques des sols	33
CHAPITRE 3. Propriétés hydrauliques des sols	53
CHAPITRE 4. Théorie de la consolidation	81
CHAPITRE 5. Comportement mécanique des sols	97
CHAPITRE 6. Reconnaissance des sols	131
CHAPITRE 7. Calcul géotechnique et Eurocode 7	277
CHAPITRE 8. Sollicitations sismiques	297
CHAPITRE 9. Stabilité des pentes et des talus	313
CHAPITRE 10. Actions des terres sur les soutènements	347
CHAPITRE 11. Fondations superficielles	389
CHAPITRE 12. Fondations profondes	461
CHAPITRE 13. Ouvrages de soutènement	549
CHAPITRE 14. Fondations mixtes, amélioration et renforcement des sols	625
CHAPITRE 15. Conception et dimensionnement des ouvrages hydrauliques	679
Annexes	699

Table des matières

Préface	XXVII
Avant-propos	XXIX
INTRODUCTION. Normalisation en géotechnique	1
Introduction	1
1. Les organismes de normalisation	2
2. Les instances de normalisation en géotechnique	2
3. Les différents types de norme	3
4. Le panel normatif en géotechnique	4
4.1 Normes de conception – Les Eurocodes	5
4.2 Normes d’essais	6
4.3 Normes de classification et de spécification de produits	7
4.4 Normes d’exécution de travaux géotechniques spéciaux	8
4.5 Normes d’organisation	9
Conclusion	9
Bibliographie	10
CHAPITRE 1. Les sols et la géologie	11
1.1 Introduction	11
1.1.1 Géotechnique et géologie	11
1.1.2 Structure du globe terrestre	12
1.1.3 Histoire de la Terre	13
1.1.4 Mouvements des plaques lithosphériques	13
1.2 Minéralogie	14
1.2.1 Diversité minérale	14
1.2.2 Silicates	14
1.2.3 Spécificité des minéraux argileux	15
1.2.4 Minéraux non silicatés	16
1.3 Pétrologie	16

1.3.1	Roches magmatiques	17
1.3.1.1	<i>Généralités</i>	17
1.3.1.2	<i>Classification</i>	17
1.3.1.3	<i>Structure des roches magmatiques</i>	18
1.3.2	Roches sédimentaires	18
1.3.2.1	<i>Généralités</i>	18
1.3.2.2	<i>Formation des roches sédimentaires</i>	19
1.3.2.3	<i>Classification</i>	21
1.3.2.4	<i>Stratigraphie</i>	23
1.3.3	Roches métamorphiques	23
1.3.3.1	<i>Généralités</i>	23
1.3.3.2	<i>Classification</i>	24
1.3.3.3	<i>Structure des roches métamorphiques</i>	24
1.4	Éléments de tectonique	25
1.4.1	Différents comportements des roches	25
1.4.2	Déformations ductiles	25
1.4.3	Déformations cassantes	26
1.4.4	Représentation des éléments structuraux	27
1.5	Disciplines apparentées à la géologie	27
1.5.1	Géomorphologie	27
1.5.2	Pédologie	28
1.6	Géologie et missions d'ingénierie géotechnique	29
1.6.1	Analyse préliminaire	29
1.6.2	Informations géologiques	30
1.6.3	Aléas géologiques	31
	Bibliographie	32
CHAPITRE 2.	Propriétés physiques des sols	33
2.1	Définition des sols – Notations	33
2.2	Structure des sols	33
2.2.1	Classification des grains solides	33
2.2.2	Structure et eau interstitielle	35
2.2.2.1	<i>Structure des sols pulvérulents</i>	35
2.2.2.2	<i>Structure des argiles</i>	36
2.3	Classification géotechnique des sols	38
2.3.1	Analyse granulométrique	38
2.3.2	Limites d'Atterberg – Activité des argiles	40
2.3.3	Valeur de bleu du sol	42
2.3.4	L'équivalent de sable	42
2.3.5	Teneur en matières organiques	43
2.3.6	Classifications des sols	43

2.4	Caractéristiques pondérales des sols	48
2.4.1	État remanié et non remanié – Représentation pondérale d'un sol	48
2.4.2	Principales caractéristiques des sols	49
2.4.3	Relations entre les paramètres pondéraux	50
	Bibliographie	52
CHAPITRE 3. Propriétés hydrauliques des sols		53
3.1	Introduction	53
3.1.1	Cycles de l'eau	53
3.1.2	Systèmes hydrologiques	54
3.1.2.1	<i>Identification</i>	54
3.1.2.2	<i>Bilan hydrique</i>	54
3.1.3	Différents états de l'eau dans les sols	55
3.1.4	Eaux souterraines	56
3.1.4.1	<i>Définitions</i>	56
3.1.4.2	<i>Nature géologique des aquifères</i>	56
3.1.4.3	<i>Types hydrodynamiques d'aquifères</i>	57
3.1.4.4	<i>Niveaux piézométriques</i>	58
3.2	Propriétés de l'eau libre	60
3.2.1	Écoulement linéaire – Loi de Darcy	60
3.2.2	Mesure en laboratoire du coefficient de perméabilité	62
3.2.2.1	<i>Conditions d'essai</i>	62
3.2.2.2	<i>Essai à charge constante</i>	62
3.2.2.3	<i>Essai à charge variable</i>	63
3.2.3	Ordre de grandeur du coefficient de perméabilité des sols	64
3.2.4	Sols lités – Définition de k_h et k_v	64
3.3	Écoulements souterrains	66
3.3.1	Écoulements permanents à deux dimensions en milieu homogène et isotrope	66
3.3.1.1	<i>Réseau d'écoulement</i>	66
3.3.1.2	<i>Calcul du débit à travers un massif de terre</i>	67
3.3.1.3	<i>Conditions aux limites en régime permanent</i>	68
3.3.2	Exemple de traitement informatique (code Plaxis)	68
3.3.3	Force d'écoulement	69
3.3.4	Mesure <i>in situ</i> de la perméabilité et des paramètres connexes	70
3.3.4.1	<i>Généralités</i>	70
3.3.4.2	<i>Écoulement en régime permanent – Formule de Dupuit</i>	71
3.3.4.3	<i>Écoulement en régime transitoire - Formule de Theis</i>	73
3.4	Eau capillaire	74
3.4.1	Définition de l'eau capillaire	74
3.4.2	Capillarité de l'eau – Loi de Jurin	74
3.4.3	Tube de section variable	75
3.4.4	Porométrie	76

3.4.5	Notion de succion – Ascension capillaire	76
3.4.6	Généralisation – Relation succion/teneur en eau	77
3.4.7	Profil hydrique	78
	Bibliographie	80
CHAPITRE 4. Théorie de la consolidation		81
4.1	Définition des contraintes dans un sol	81
4.2	Sols saturés	82
4.2.1	Contraintes normales	82
4.2.2	Contrainte tangentielle	83
4.2.3	Cas des sols partiellement saturés	83
4.3	Étude qualitative de la consolidation	84
4.3.1	Remarques préliminaires	84
4.3.1.1	<i>Définition</i>	84
4.3.1.2	<i>Condition d'application</i>	84
4.3.1.3	<i>Conditions initiales</i>	84
4.3.2	Tassement dans le temps sous une charge donnée	85
4.3.3	Tassement en fonction de la charge	87
4.4	Théorie mathématique de la consolidation unidimensionnelle	88
4.5	Consolidation d'une couche drainée par les deux faces	90
4.6	Cas particuliers	90
4.6.1	Multicouche compressible	90
4.6.2	Prise en compte du temps de chargement	91
4.7	Essai de compressibilité à l'œdomètre	92
4.7.1	Caractéristiques de compressibilité	92
4.7.2	Classification des sols vis-à-vis de la compressibilité	93
4.7.2.1	<i>Différents états de consolidation</i>	93
4.7.2.2	<i>Comportement des sols selon leur état de consolidation</i>	93
4.7.3	Consolidation secondaire	94
4.8	Applications pratiques de la consolidation	95
	Bibliographie	96
CHAPITRE 5. Comportement mécanique des sols		97
5.1	Introduction	97
5.2	Répartition des contraintes autour d'un point	98
5.2.1	Rappel de mécanique des milieux continus	98
5.2.2	Définition et conventions de signe	99
5.2.3	Propriétés du cercle de Mohr	99

5.3	Les sols et la théorie de l'élasticité	102
5.3.1	Rappel de quelques notions	102
5.3.2	Modules drainé et non drainé	103
5.3.3	Champs d'application de l'élasticité	103
5.3.3.1	<i>Divergences avec la théorie de l'élasticité</i>	103
5.3.3.2	<i>Différents modules d'élasticité</i>	103
5.3.4	Ordres de grandeur	106
5.3.5	Relation entre le module œdométrique et le module d'élasticité drainé	106
5.4	Les sols et la théorie de la plasticité	107
5.4.1	Courbe intrinsèque, critère de Mohr-Coulomb	107
5.4.2	État d'équilibre limite des sols pulvérulents	108
5.4.3	Sols cohérents – Théorème des états correspondants	110
5.4.4	Propriétés particulières de la droite intrinsèque et du cercle de Mohr	111
5.4.5	Directions conjuguées	112
5.5	Mesure des caractéristiques mécaniques des sols	112
5.5.1	Détermination des caractéristiques de plasticité ϕ et c	112
5.5.2	Conditions particulières d'essai	113
5.5.2.1	<i>Consolidation</i>	113
5.5.2.2	<i>Drainage</i>	113
5.5.2.3	<i>Vitesse d'essai</i>	113
5.5.3	Principales caractéristiques mécaniques d'un sol	114
5.5.3.1	<i>Caractéristiques apparentes</i>	114
5.5.3.2	<i>Caractéristiques effectives</i>	115
5.5.3.3	<i>Caractéristiques consolidées non drainées</i>	115
5.5.4	Exemples d'application pratique des différents essais	116
5.5.4.1	<i>Exemple d'application des caractéristiques apparentes Φ_{uu}, c_{uu} et effectives ϕ', c'</i>	116
5.5.4.2	<i>Exemple d'application du facteur d'augmentation de la cohésion λ_{cu}</i>	117
5.5.5	Essai de compression simple	118
5.5.6	Mesure des caractéristiques d'élasticité	118
5.6	Compléments sur la rhéologie des sols	119
5.6.1	Critères de rupture – État critique – Dilatance – Contractance	119
5.6.1.1	<i>Comportement des sables</i>	119
5.6.1.2	<i>Comportement des argiles</i>	120
5.6.2	Chemin des contraintes	122
5.6.3	Modèles rhéologiques	122
5.7	Liquéfaction des sols	124
5.7.1	Description du phénomène	124
5.7.2	Catégories de sols sensibles à la liquéfaction	124
5.7.3	Étude du risque de liquéfaction	125
	Bibliographie	130

CHAPITRE 6. Reconnaissance des sols	131
6.1 Investigations géotechniques	131
6.1.1 Documents de référence	131
6.1.1.1 <i>Préambule</i>	131
6.1.1.2 <i>Eurocode 7 NF EN 1997-2</i>	131
6.1.1.3 <i>Norme NF P 94 500</i>	132
6.1.1.4 <i>Recommandations de l'Union syndicale géotechnique – Syntec-Ingénierie</i>	132
6.1.1.5 <i>Normes d'essais</i>	132
6.1.2 Programme de l'étude géotechnique	132
6.1.2.1 <i>Modèle géologique préliminaire</i>	132
6.1.2.2 <i>Établissement du programme de reconnaissance</i>	133
6.1.2.3 <i>Diversité des techniques de reconnaissance</i>	134
6.1.2.4 <i>Maillage des sondages de reconnaissance</i>	134
6.1.2.5 <i>Profondeur d'investigation</i>	136
6.1.2.6 <i>Repérage et nivellement des sondages</i>	136
6.2 Géophysique	137
6.2.1 Principes généraux	137
6.2.2 Gravimétrie	137
6.2.2.1 <i>Principe</i>	137
6.2.2.2 <i>Applications</i>	138
6.2.2.3 <i>Mise en œuvre</i>	138
6.2.2.4 <i>Limites d'utilisation</i>	139
6.2.3 Méthodes sismiques	139
6.2.3.1 <i>Principe</i>	139
6.2.3.2 <i>Sismique réfraction</i>	140
6.2.4 Méthodes électriques	143
6.2.4.1 <i>Principe</i>	143
6.2.4.2 <i>Applications</i>	143
6.2.4.3 <i>Description des méthodes usuelles</i>	143
6.2.4.4 <i>Limites d'utilisation</i>	145
6.2.5 Électromagnétisme	145
6.2.5.1 <i>Principe</i>	145
6.2.5.2 <i>Applications</i>	145
6.2.5.3 <i>Mise en œuvre</i>	145
6.2.5.4 <i>Limites d'utilisation</i>	146
6.2.6 Domaines d'application des méthodes géophysiques	147
6.3 Sondages et forages	147
6.3.1 Introduction	147
6.3.1.1 <i>Définitions</i>	147
6.3.1.2 <i>Méthodes de prélèvement</i>	149
6.3.2 Différents types de forages	150
6.3.2.1 <i>Choix de la technique de forage</i>	150
6.3.2.2 <i>Sondages par puits, tranchée, fouille et galerie</i>	150

6.3.2.3	<i>Sondages carottés</i>	150
6.3.2.4	<i>Sondages semi-destructifs</i>	151
6.3.2.5	<i>Sondages destructifs</i>	152
6.3.3	Sondages carottés	152
6.3.3.1	<i>Objectifs</i>	152
6.3.3.2	<i>Techniques de carottage</i>	152
6.3.3.3	<i>Choix des techniques de carottage</i>	155
6.3.3.4	<i>Coupe de sondage</i>	155
6.3.4	Forages destructifs	158
6.3.4.1	<i>Introduction</i>	158
6.3.4.2	<i>Opérations liées à la foration</i>	158
6.3.4.3	<i>Techniques de foration</i>	160
6.3.4.4	<i>Choix des techniques de foration</i>	161
6.3.4.5	<i>Diagraphies instantanées</i>	162
6.3.5	Diagraphies différées	165
6.3.5.1	<i>Présentation</i>	165
6.3.5.2	<i>Différents types de diagraphies différées</i>	165
6.3.6	Géophysique de forage	165
6.3.6.1	<i>Généralités</i>	165
6.3.6.2	<i>Principales techniques</i>	167
6.4	Essais mécaniques <i>in situ</i>	167
6.4.1	Essais par battage	167
6.4.1.1	<i>Présentation</i>	167
6.4.1.2	<i>Essai de pénétration au carottier</i>	167
6.4.1.3	<i>Essai de pénétration dynamique</i>	170
6.4.2	Essai de pénétration statique (CPT) et piézocône	174
6.4.2.1	<i>Principe</i>	174
6.4.2.2	<i>Types d'appareil – Appareil normalisé</i>	174
6.4.2.3	<i>Résultats</i>	177
6.4.2.4	<i>Interprétation</i>	177
6.4.2.5	<i>Piezocône</i>	177
6.4.3	Essai au pressiomètre Ménard	179
6.4.3.1	<i>Présentation</i>	179
6.4.3.2	<i>Principe de l'essai</i>	179
6.4.3.3	<i>Appareillage</i>	179
6.4.3.4	<i>Mise en place de la sonde dans le sol</i>	181
6.4.3.5	<i>Réalisation de l'essai – Courbe brute</i>	182
6.4.3.6	<i>Résultats – Courbes corrigées</i>	183
6.4.3.7	<i>Présentation des résultats – Forage pressiométrique</i>	184
6.4.3.8	<i>Principes théoriques</i>	186
6.4.3.9	<i>Corrélation entre module pressiométrique et oedométrique – Coefficient rhéologique</i>	188
6.4.3.10	<i>Classification conventionnelle des sols</i>	189
6.4.3.11	<i>Module pressiométrique de rechargement</i>	189
6.4.4	Essai de cisaillement au phicomètre	190
6.4.4.1	<i>Présentation</i>	190

6.4.4.2	<i>Principe</i>	190
6.4.4.3	<i>Description de l'appareil</i>	190
6.4.4.4	<i>Interprétation – Domaine d'application</i>	192
6.4.4.5	<i>Comparaison avec les essais de laboratoire</i>	193
6.4.5	Essai scissométrique en place	194
6.4.5.1	<i>Présentation</i>	194
6.4.5.2	<i>Principe de l'essai</i>	194
6.4.5.3	<i>Appareillage et procédure d'essai</i>	195
6.4.5.4	<i>Résultats</i>	195
6.4.5.5	<i>Utilisation – Correction</i>	195
6.5	Instrumentation et suivi des ouvrages	197
6.6	Essais hydrauliques <i>in situ</i>	198
6.6.1	Introduction	198
6.6.2	Piézométrie	198
6.6.2.1	<i>Introduction</i>	198
6.6.2.2	<i>Types de piézomètres</i>	198
6.6.2.3	<i>Qualité des mesures</i>	200
6.6.3	Essais de perméabilité dans un forage à tube ouvert	200
6.6.3.1	<i>Principe</i>	200
6.6.3.2	<i>Réalisation de l'essai</i>	201
6.6.3.3	<i>Interprétation des résultats</i>	201
6.6.4	Essai de pression d'eau dans les roches	202
6.6.5	Essai de pompage	203
6.6.5.1	<i>Principe</i>	203
6.6.5.2	<i>Préparation de l'essai</i>	203
6.6.5.3	<i>Réalisation de l'essai</i>	204
6.6.5.4	<i>Interprétation des résultats</i>	204
6.6.6	Essai de perméabilité dans un forage en tube fermé	206
6.6.7	Essai d'infiltration	206
6.7	Essais de laboratoire	206
6.7.1	Introduction	206
6.7.2	Essais d'identification et de classification	207
6.7.2.1	<i>Analyse granulométrique par tamisage</i>	207
6.7.2.2	<i>Analyse granulométrique par sédimentation</i>	209
6.7.2.3	<i>Teneur en eau</i>	212
6.7.2.4	<i>Masse volumique des particules solides</i>	214
6.7.2.5	<i>Limites de consistance d'Atterberg</i>	216
6.7.2.6	<i>Masse volumique apparente des sols fins</i>	224
6.7.2.7	<i>Indice des vides e_{min} et e_{max} et indice de densité relative</i>	226
6.7.2.8	<i>Teneur en carbonate</i>	228
6.7.2.9	<i>Teneur en matières organiques</i>	230
6.7.2.10	<i>Coefficient de fragmentabilité</i>	231
6.7.2.11	<i>Coefficient de dégradabilité</i>	232
6.7.2.12	<i>Valeur de bleu de méthylène du sol</i>	232

6.7.3	Essais mécaniques de résistance, de compressibilité et de déformation des sols	233
6.7.3.1	<i>Essai de compression uniaxiale</i>	233
6.7.3.2	<i>Essais de cisaillement rectiligne à la boîte</i>	234
6.7.3.3	<i>Essais de cisaillement à l'appareil triaxial de révolution</i>	239
6.7.3.4	<i>Essai de compressibilité à l'œdomètre avec chargement par paliers</i>	251
6.7.3.5	<i>Essai de gonflement à l'œdomètre par chargement de plusieurs éprouvettes</i>	261
6.7.3.6	<i>Essai de dessiccation – Détermination de la limite de retrait effective</i>	262
6.7.4	Essais hydrauliques de perméabilité	264
6.7.4.1	<i>Mesure du coefficient de perméabilité – Principaux dispositifs</i> ..	264
6.7.4.2	<i>Mesure de la perméabilité – Essai à charge constante – Essai à charge variable</i>	266
6.7.5	Essais de compactage et de portance	267
6.7.5.1	<i>Essai de détermination des références de compactage Proctor</i>	267
6.7.5.2	<i>Indice portant IPI et CBR</i>	270
6.8	Choix des techniques d'investigation	271
	Bibliographie	274
CHAPITRE 7.	Calcul géotechnique et Eurocode 7	277
7.1	Présentation générale – Bases du calcul géotechnique	277
7.2	Justification par la méthode observationnelle	279
7.3	Justification par la méthode prescriptive	280
7.4	Justification sur la base d'essais de chargement	280
7.5	Justification par le calcul	280
7.5.1	Préambule – Fiabilité des modèles de calcul	280
7.5.2	Principe	281
7.5.3	Situations et actions	281
7.5.3.1	<i>Situations</i>	281
7.5.3.2	<i>Actions</i>	281
7.5.4	Valeurs caractéristiques	282
7.5.4.1	<i>Valeur caractéristique d'une action</i>	282
7.5.4.2	<i>Valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques</i>	282
7.5.4.3	<i>Valeurs caractéristiques des données géométriques</i>	283
7.5.4.4	<i>Modèle géotechnique</i>	284
7.5.5	Valeurs de calcul	284
7.5.5.1	<i>Définition</i>	284
7.5.5.2	<i>Valeur de calcul d'une action</i>	284
7.5.5.3	<i>Niveaux d'eau</i>	287
7.5.5.4	<i>Facteurs de modèle</i>	287
7.5.6	Combinaisons d'actions – Sollicitations	288

7.5.7	Différents types d'états limites ultimes	288
7.5.8	Approches de calcul et facteurs partiels	290
7.5.8.1	<i>Les trois approches de calcul</i>	290
7.5.8.2	<i>Principaux paramètres partiels</i>	291
7.5.8.3	<i>Approche retenue par l'annexe nationale française</i>	291
7.5.9	Justifications suivant les différents états limites	292
7.5.9.1	<i>Vérifications aux états limites ultimes</i>	292
7.5.9.2	<i>Vérifications aux états limites de service</i>	294
7.5.9.3	<i>Exemple de détermination de l'effet d'une action</i>	295
	Bibliographie	296
CHAPITRE 8. Sollicitations sismiques		297
8.1	Préambule	297
8.2	Effet d'un séisme	297
8.3	Réglementation sismique	298
8.4	Action sismique	299
8.5	Paramètres définissant l'action sismique	301
8.5.1	Zonage sismique de la France	301
8.5.2	Classes de sol	303
8.5.3	Coefficient de sol	305
8.5.4	Coefficient topographique	305
8.5.5	Catégorie d'importance des ouvrages	306
8.6	Justification des ouvrages géotechniques sous sollicitations sismiques	307
8.6.1	Préambule	307
8.6.2	Justification des fondations	308
8.6.3	Justification des talus et soutènement	308
8.6.4	Justifications sous sollicitations sismiques	309
	Bibliographie	312
CHAPITRE 9. Stabilité des pentes et des talus		313
9.1	Introduction – Classification des mouvements de terrain	313
9.1.1	Pentes naturelles	314
9.1.2	Talus artificiels	314
9.2	Description des principaux types de mouvement	314
9.2.1	Écroulements et chutes de pierres	314
9.2.2	Glissements	314
9.2.2.1	<i>Glissement plan</i>	314
9.2.2.2	<i>Glissement rotationnel simple</i>	315
9.2.2.3	<i>Glissement rotationnel complexe</i>	315

9.2.3	Fluage et solifluxion	316
9.2.3.1	<i>Fluage</i>	316
9.2.3.2	<i>Solifluxion</i>	316
9.2.4	Coulées boueuses	316
9.2.5	Talus en déblai et talus en remblai sur sols non compressibles	317
9.2.6	Talus en remblai sur sols compressibles	317
9.2.7	Stabilité sous les soutènements	318
9.2.8	Digues et barrages en terre	318
9.3	Stabilité en rupture circulaire avec coefficient de sécurité global	318
9.3.1	Préambule	318
9.3.2	Méthode des tranches de Fellenius	318
9.3.2.1	<i>Stabilité selon un cercle donné</i>	318
9.3.2.2	<i>Recherche du coefficient de sécurité minimal</i>	321
9.3.3	Prise en compte des nappes et des écoulements	323
9.3.3.1	<i>Nappe statique</i>	323
9.3.3.2	<i>Prise en compte des écoulements au-dessus du niveau aval</i>	323
9.3.3.3	<i>Prise en compte des écoulements en dessous du niveau aval</i>	324
9.3.4	Méthodes des tranches de Bishop	325
9.3.4.1	<i>Méthode détaillée</i>	325
9.3.4.2	<i>Méthode de Bishop simplifiée</i>	325
9.3.5	Choix de la méthode de calcul	326
9.3.6	Choix du coefficient global de sécurité	326
9.4	Stabilité en rupture circulaire aux états limites – Calcul aux Eurocodes	327
9.5	Stabilité des pentes en rupture plane	328
9.5.1	Pente indéfinie – Rupture selon un plan parallèle à la pente	328
9.5.1.1	<i>Décomposition des forces</i>	328
9.5.1.2	<i>Coefficient de sécurité global</i>	329
9.5.1.3	<i>Calcul aux états limites</i>	330
9.5.2	Pente de hauteur finie	330
9.6	Stabilité en rupture non circulaire	331
9.7	Abaques et formules	331
9.7.1	Talus dans un sol pulvérulent	332
9.7.1.1	<i>Sans écoulement</i>	332
9.7.1.2	<i>Avec écoulement</i>	332
9.7.2	Talus dans un sol homogène cohérent	333
9.7.2.1	<i>Sols purement cohérents – Abaques de Taylor</i>	333
9.7.2.2	<i>Sols cohérents à frottement interne</i>	335
9.7.3	Talus verticaux	336
9.8	Choix des caractéristiques mécaniques	338
9.9	Stabilité en zone sismique	340
9.9.1	Préambule	340
9.9.2	Principe du modèle statique équivalent	341

9.10 Confortement des talus	342
9.10.1 Principe	342
9.10.2 Modification de la pente	342
9.10.3 Drainage	343
9.10.4 Renforcement	345
Bibliographie	346
CHAPITRE 10. Actions des terres sur les soutènements	347
10.1 Introduction	347
10.2 États d'équilibre limite	347
10.2.1 Définitions	347
10.2.1.1 <i>Sol au repos</i>	347
10.2.1.2 <i>Équilibre limite de butée</i>	348
10.2.1.3 <i>Équilibre limite de poussée</i>	349
10.2.2 Étude d'un cas simple	349
10.2.2.1 <i>Valeurs de K_a et K_p</i>	349
10.2.2.2 <i>Résultante des efforts sur l'écran</i>	350
10.2.2.3 <i>Volume plastifié</i>	350
10.2.3 Plan de l'étude détaillée de la poussée et de la butée	351
10.2.3.1 <i>Étude d'un milieu pulvérulent pesant en équilibre limite</i>	351
10.2.3.2 <i>Étude d'un milieu non pesant surchargé</i>	352
10.2.3.3 <i>Influence de la cohésion</i>	352
10.2.3.4 <i>Cas général</i>	352
10.2.4 Étude du milieu pesant pulvérulent	352
10.2.4.1 <i>Équilibres limites de Rankine</i>	352
10.2.4.2 <i>Équilibres limites généraux</i>	355
10.2.5 Étude d'un milieu non pesant surchargé et pulvérulent	358
10.2.5.1 <i>Hypothèses</i>	358
10.2.5.2 <i>Étude de l'équilibre de poussée</i>	359
10.2.5.3 <i>Étude de l'équilibre de la butée</i>	360
10.2.6 Milieux cohérents	361
10.2.6.1 <i>Prise en compte de la cohésion</i>	361
10.2.6.2 <i>Rugosité (contact écran-sol)</i>	362
10.2.6.3 <i>Influence de la cohésion sur le coefficient de sécurité</i>	363
10.2.7 Étude particulière du milieu purement cohérent	363
10.2.8 Tableaux récapitulatifs	364
10.3 Détermination pratique des poussées et butées sur les écrans	365
10.3.1 Simplifications – Rugosité – Diagramme de pression des terres	365
10.3.1.1 <i>Remarques préliminaires</i>	365
10.3.1.2 <i>Rugosité – Inclinaison de la contrainte</i>	366
10.3.1.3 <i>Diagramme de pression des terres</i>	370
10.3.1.4 <i>Calcul pratique des contraintes de poussée et de butée</i>	371

10.3.2	Coin de Coulomb	371
10.3.2.1	<i>Principe</i>	371
10.3.2.2	<i>Milieu pesant pulvérulent non surchargé</i>	371
10.3.2.3	<i>Action de la surcharge</i>	372
10.3.3	Sols stratifiés	372
10.3.4	Présence d'une nappe	374
10.3.5	Talus et risberme	374
10.3.5.1	<i>Surface libre de forme quelconque</i>	374
10.3.5.2	<i>Talus limités en amont de l'écran</i>	375
10.3.5.3	<i>Risberme</i>	376
10.3.6	Surcharges	377
10.3.6.1	<i>Préambule</i>	377
10.3.6.2	<i>Surcharge uniforme semi-infinie</i>	378
10.3.6.3	<i>Surcharge partielle de longueur infinie</i>	378
10.3.6.4	<i>Surcharges locales</i>	380
10.3.7	Tranchées blindées	381
10.3.7.1	<i>Détermination de la pression des terres</i>	381
10.3.7.2	<i>Action des surcharges</i>	383
10.3.8	Méthode de Culmann	383
10.4	Sollicitations sismiques	384
10.4.1	Principe général du calcul statique équivalent	384
10.4.2	Paramètres et formules de calcul de E_d	386
	Bibliographie	388
CHAPITRE 11.	Fondations superficielles	389
11.1	Description, comportement et principes de justifications	389
11.1.1	Définitions	389
11.1.2	Comportement d'une semelle chargée	390
11.1.2.1	<i>Comportement sous charge verticale</i>	390
11.1.2.2	<i>Influence de l'encastrement</i>	391
11.1.2.3	<i>État de saturation du sol</i>	391
11.1.2.4	<i>Comportement sous charge excentrée</i>	392
11.1.2.5	<i>Comportement sous charge inclinée</i>	393
11.1.2.6	<i>Comportement en bord de pente</i>	394
11.1.3	Principes de justification d'une semelle superficielle	394
11.2	Capacité portante du sol	395
11.2.1	Comportement du sol à la rupture	395
11.2.2	Formulation générale et coefficients de sécurité	396
11.2.3	Méthodes fondées sur les propriétés de cisaillement du sol	399
11.2.3.1	<i>Méthode analytique – Conditions drainées</i>	399
11.2.3.2	<i>Méthode analytique – Conditions non drainées</i>	402
11.2.3.3	<i>Méthode analytique – Prise en compte de la proximité d'un talus</i>	402
11.2.3.4	<i>Méthodes numériques</i>	402

11.2.4	Méthode basée sur les données mesurées <i>in situ</i>	402
11.2.4.1	<i>Méthode pressiométrique</i>	403
11.2.4.2	<i>Méthode à partir d'essais au pénétromètre statique</i>	409
11.2.4.3	<i>Pénétromètre dynamique</i>	411
11.2.4.4	<i>Essais de pénétration au carottier – SPT</i>	411
11.2.5	Semelles superficielles ancrées dans un bicouche	413
11.2.5.1	<i>Présence d'une couche d'argile en profondeur</i>	413
11.2.5.2	<i>Présence d'un substratum rigide en profondeur</i>	414
11.3	Excentrement admissible des charges	414
11.4	Glissement	415
11.5	Justifications sous sollicitations sismiques	416
11.5.1	Portance sous sollicitations sismiques	417
11.5.2	Glissement sous sollicitations sismiques	420
11.5.2.1	<i>Fondations situées au-dessus de la nappe phréatique</i>	420
11.5.2.2	<i>Fondations situées en dessous de la nappe phréatique</i>	420
11.6	Estimation des tassements	421
11.6.1	Méthodologie – Contraintes de contact sous la fondation	421
11.6.2	Détermination du tassement par la théorie de l'élasticité – Coefficient de réaction du sol	422
11.6.3	Détermination du tassement par la méthode d'intégration par tranches	425
11.6.3.1	<i>Principe</i>	425
11.6.3.2	<i>Répartition des contraintes en profondeur sous une charge ponctuelle</i>	425
11.6.3.3	<i>Répartition des contraintes en profondeur sous une semelle souple</i>	426
11.6.3.4	<i>Contrainte dans l'angle d'un rectangle et au centre d'une semelle circulaire</i>	427
11.6.3.5	<i>Effet radier</i>	428
11.6.3.6	<i>Diagramme de répartition des contraintes en profondeur – Méthode des tranches</i>	428
11.6.3.7	<i>Tassement total – Correction de A. W. Skempton et L. Bjerrum</i>	430
11.6.3.8	<i>Semelle rigide</i>	432
11.6.4	Calcul des tassements par la méthode pressiométrique	432
11.6.4.1	<i>Formule générale</i>	432
11.6.4.2	<i>Valeurs de E_c et E_d</i>	433
11.6.5	Calcul des tassements à partir du pénétromètre statique	435
11.6.5.1	<i>Méthode de Schmertmann</i>	435
11.6.5.2	<i>Utilisation de corrélation</i>	436
11.6.6	Calcul des tassements à partir du SPT	436
11.6.7	Tassements admissibles	437
11.6.7.1	<i>Tassement total et tassement différentiel</i>	437
11.6.7.2	<i>Estimation des tassements totaux</i>	438
11.6.7.3	<i>Estimation des tassements différentiels</i>	438
11.6.7.4	<i>Tassements admissibles</i>	438

11.7 Déplacements et rotations – Coefficients de raideurs	440
11.8 Fondations des machines vibrantes	442
11.8.1 Introduction	442
11.8.2 Réponse d'une machine vibrante	443
11.8.2.1 <i>Principes du calcul</i>	443
11.8.2.2 <i>Paramètres « dynamiques » du sol</i>	445
11.8.2.3 <i>Tassements dus aux vibrations</i>	446
11.9 Dispositions constructives	447
11.9.1 Règle des 3 pour 2	447
11.9.2 Protection contre le gel	447
11.9.3 Dispositions constructives spécifiques relatives aux sols gonflants et rétractables	449
11.10 Fondations semi-profondes	450
11.10.1 Définition et description des sollicitations	450
11.10.2 Fondations semi-profondes soumises à une charge verticale centrée ...	451
11.10.2.1 <i>Réaction verticale normale à la base</i>	451
11.10.2.2 <i>Frottement vertical sur les faces latérales</i>	451
11.10.3 Fondations semi-profondes soumises à un effort d'arrachement	451
11.10.3.1 <i>Domaine d'application – Types de massif étudiés</i>	451
11.10.3.2 <i>Détermination de l'effort d'arrachement à la rupture Q_{fi}</i>	452
11.10.4 Fondations semi-profondes soumises à un effort latéral	453
11.10.4.1 <i>Réaction normale frontale horizontale</i>	453
11.10.4.2 <i>Frottement horizontal à la base de la fondation</i>	454
11.10.4.3 <i>Frottement horizontal sur les faces latérales</i>	454
11.10.5 Déplacement et rotation d'une fondation semi-profonde	454
11.10.6 Situations de calcul et vérifications	454
11.10.7 Exemples de fondations semi-profondes soumises à des efforts latéraux et de renversements	455
11.10.7.1 <i>Méthode de M. Cassan</i>	455
11.10.7.2 <i>Méthode du réseau d'état</i>	456
11.10.7.3 <i>Méthode simplifiée</i>	457
Bibliographie	459
CHAPITRE 12. Fondations profondes	461
12.1 Descriptions, comportement et principes de justifications	461
12.1.1 Définitions	461
12.1.2 Comportement des fondations profondes	461
12.1.2.1 <i>Comportement sous charge axiale</i>	461
12.1.2.2 <i>Comportement sous sollicitations transversales</i>	464
12.1.2.3 <i>Pieu soumis à des efforts parasites et divers</i>	465
12.2 Principes de justifications	465
12.2.1 Vérifications aux états limites	465

12.2.2	Classement des différents types de fondations profondes	465
12.2.3	Matériaux constitutifs des fondations profondes	466
12.2.3.1	<i>Paramètres de calcul des matériaux béton, béton armé, coulis ou mortier à base de ciment</i>	467
12.2.3.2	<i>Agressivité des eaux et des sols pour les bétons</i>	469
12.2.3.3	<i>Structures métalliques en acier de construction</i>	473
12.2.3.4	<i>Agressivité des eaux et des sols pour le métal</i>	474
12.2.4	Capacités portantes limites sous charges verticales	477
12.2.4.1	<i>Données théoriques et expérimentales de dimensionnement sous charge verticale – Méthode par essais de laboratoire</i>	477
12.2.4.2	<i>Détermination de la charge limite sous charges verticales à partir d'essais mécaniques in situ</i>	480
12.2.5	États limites de portance et de traction	495
12.2.5.1	<i>Portance d'une fondation profonde isolée (ELU, compression)</i> ..	495
12.2.5.2	<i>Résistance de traction d'une fondation profonde isolée (ELU, traction)</i>	496
12.2.5.3	<i>Fondation profonde isolée sous charge axiale de compression à l'ELS (ELS, compression)</i>	496
12.2.5.4	<i>Fondation profonde isolée sous charge axiale de traction à l'ELS (ELS, traction)</i>	497
12.2.6	Méthodes de calcul sous chargement axial	497
12.2.6.1	<i>Méthode de calcul à partir d'essais de pieux</i>	498
12.2.6.2	<i>Procédure du pieu modèle</i>	499
12.2.6.3	<i>Procédure du modèle de terrain</i>	502
12.2.6.4	<i>Présence d'une couche sous-jacente peu résistante</i>	505
12.2.6.5	<i>Réduction du frottement axial limite sous effort de traction</i>	507
12.3	Tassement des pieux	508
12.4	Portance d'un groupe de pieux	509
12.4.1	Comportement d'un groupe de pieux	509
12.4.2	Effet de groupe lié au rapprochement des pieux	510
12.4.3	Effet de groupe lié au comportement du bloc	511
12.4.4	Tassement d'un groupe de fondations profondes	511
12.5	Résistance de traction d'un groupe de fondations profondes	512
12.5.1	Combinaisons d'actions et coefficients de sécurité	513
12.5.2	Résistance mobilisable par le groupe de fondations profondes	513
12.5.2.1	<i>Volume unitaire associé en sol homogène à frottement interne prédominant</i>	515
12.5.2.2	<i>Volume unitaire associé en sol homogène à cohésion prédominante</i>	515
12.5.2.3	<i>Réduction du volume d'influence</i>	515
12.5.3	Résistances mobilisables complémentaires	516
12.6	Pieux soumis à des sollicitations non verticales en tête	517
12.6.1	Nature des sollicitations	517
12.6.2	Lois d'interaction sol-pieu	517

12.6.3	Résolution dans le domaine élastique	520
12.6.3.1	Équations générales	520
12.6.3.2	Pieu à géométrie et inertie constantes et sol homogène	521
12.6.3.3	Applications pratiques	522
12.7	Efforts parasites sur les pieux	523
12.7.1	Frottement négatif	523
12.7.1.1	Description du phénomène	523
12.7.1.2	Méthode de calcul	524
12.7.1.3	Application pratique	527
12.7.1.4	Frottement négatif sur les pieux d'un groupe	529
12.7.2	Fluage latéral d'une couche compressible	530
12.7.2.1	Description du phénomène	530
12.7.2.2	Méthode de Tschebotarioff	531
12.7.2.3	Principe de la méthode en $g(z)$	531
12.7.3	Flambement des pieux	533
12.7.3.1	Méthode de M. Mandel	533
12.7.3.2	Pieu avec hauteur libre	534
12.7.3.3	Prise en compte d'un défaut de forme	534
12.7.3.4	Vérification du non-flambement d'un micropieu	534
12.8	Contrôle de l'intégrité des pieux	536
12.9	Considérations parasismiques	539
12.9.1	Détermination des ressorts de pieux	540
12.9.1.1	Matrice de rigidité	540
12.9.1.2	Matrice de souplesse	541
12.9.1.3	Détermination des termes de la matrice de souplesse	541
12.9.1.4	Détermination de la raideur verticale sous sollicitations sismiques	544
12.9.2	Détermination des effets cinématiques	544
12.9.2.1	Déplacement en surface	544
12.9.2.2	Profil du $g(z)$ dans le cas d'un sol monocouche	544
12.9.2.3	Profil du $g(z)$ dans le cas d'un sol bicouche	545
12.9.3	Justification de dimensionnement	546
12.9.3.1	Capacité portante et de traction	546
12.9.3.2	Reprise d'efforts horizontaux et de moments	546
	Bibliographie	547
CHAPITRE 13.	Ouvrages de soutènement	549
13.1	Préambule – Classification des soutènements	549
13.2	Critères de choix	550
13.3	Murs de soutènement	552
13.3.1	Remarque préliminaire – Notion d'écran fictif	552
13.3.2	Définition des actions	553
13.3.3	Approche de calcul et combinaisons d'actions	554

13.3.4	Justification d'un mur de soutènement sous sollicitations statiques	555
13.3.4.1	<i>Démarche générale</i>	555
13.3.4.2	<i>Stabilité générale (ELU)</i>	556
13.3.4.3	<i>Résistance structurelle (ELU)</i>	557
13.3.4.4	<i>Portance du sol support (ELU et ELS)</i>	557
13.3.4.5	<i>Limitation de l'excentrement (ELU et ELS)</i>	558
13.3.4.6	<i>Glissement sur la base du mur (ELU)</i>	558
13.3.4.7	<i>Autres vérifications</i>	559
13.3.5	Justification d'un mur de soutènement sous séisme (Eurocode 8)	559
13.4	Écrans de soutènement	559
13.4.1	Classification, fonctionnement et méthodes de calcul	559
13.4.2	Déformations admissibles de la paroi	562
13.4.3	Méthode élastoplastique	562
13.4.3.1	<i>Principe</i>	562
13.4.3.2	<i>Détermination du coefficient de réaction horizontal</i>	564
13.4.3.3	<i>Autres paramètres liés au sol</i>	566
13.4.3.4	<i>Produit d'inertie de la paroi</i>	566
13.4.3.5	<i>Poussée et butée sur une paroi discontinue</i>	567
13.4.3.6	<i>Butons et tirants</i>	568
13.4.3.7	<i>Tirants d'ancrages</i>	569
13.4.3.8	<i>Autres paramètres</i>	570
13.4.3.9	<i>Phasage</i>	570
13.4.3.10	<i>Calcul</i>	571
13.4.4	Dimensionnement des parois à la rupture (MEL)	571
13.4.4.1	<i>Principe</i>	571
13.4.4.2	<i>Vérification de la fiche</i>	573
13.4.4.3	<i>Vérification de la contre-butée (approche simplifiée)</i>	573
13.4.4.4	<i>Calcul à la rupture d'un rideau ancré en tête et encastré en pied</i>	574
13.4.5	Justification d'un écran de soutènement sous sollicitations statiques (NF P94-282)	575
13.4.5.1	<i>Démarche générale</i>	575
13.4.5.2	<i>Stabilité générale (ELU)</i>	576
13.4.5.3	<i>Défaut de butée (ELU)</i>	577
13.4.5.4	<i>Résistance structurelle (ELS et ELU)</i>	578
13.4.5.5	<i>Stabilité du fond de fouille (ELU)</i>	580
13.4.5.6	<i>Poinçonnement et capacité portante du sol support (ELU et ELS)</i>	580
13.4.5.7	<i>Stabilité du massif d'ancrage (ELU)</i>	581
13.4.5.8	<i>Résistance des ancrages (ELU et ELS)</i>	584
13.4.5.9	<i>Résistance de l'appui (ELU et ELS)</i>	589
13.4.5.10	<i>Ruines d'origine hydraulique (ELU)</i>	589
13.4.6	Justification d'un écran de soutènement sous séisme (Eurocode 8)	589
13.5	Massifs de sols renforcés et parois clouées	590
13.5.1	Classification des ouvrages en remblai renforcé	590
13.5.2	Description d'une paroi clouée	592

13.5.3	Justification sous sollicitations statiques	594
13.5.3.1	<i>Démarche générale</i>	594
13.5.3.2	<i>Écran fictif</i>	596
13.5.3.3	<i>Mobilisation des efforts dans les renforcements</i>	596
13.5.3.4	<i>Actions et sollicitations</i>	596
13.5.3.5	<i>Stabilité générale (ELU)</i>	597
13.5.3.6	<i>Stabilité externe (ELU)</i>	598
13.5.3.7	<i>Stabilité interne (ELU)</i>	601
13.5.3.8	<i>Stabilité mixte (ELU)</i>	620
13.5.3.9	<i>États limites de services – Déformations</i>	622
13.5.4	Justification sous sollicitations sismiques	623
	Bibliographie	624

CHAPITRE 14.	Fondations mixtes, amélioration et renforcement des sols	625
14.1	Présentation générale	625
14.2	Fondations mixtes	626
14.2.1	Principe	626
14.2.2	Définitions et hypothèses	626
14.2.3	Détermination de la charge limite d'une fondation mixte pour $H \geq B_S$	627
14.2.4	Estimation des tassements – Cas général $H \geq B_S$	628
14.2.4.1	<i>Principe – Compressibilité de la fondation mixte</i>	628
14.2.4.2	<i>Lois charge-déformation</i>	628
14.2.5	Cas particulier des pieux courts : $H < B_S$	630
14.3	Amélioration et renforcement des sols d'assise	631
14.3.1	Introduction	631
14.3.2	Procédés de substitution	632
14.3.2.1	<i>Principe</i>	632
14.3.2.2	<i>Domaine d'application</i>	633
14.3.2.3	<i>Mise en œuvre</i>	633
14.3.2.4	<i>Avantages, inconvénients, limites</i>	633
14.3.2.5	<i>Principe de dimensionnement</i>	634
14.3.2.6	<i>Contrôles d'exécution</i>	634
14.3.3	Procédés par traitement dans la masse	634
14.3.3.1	<i>Préchargement</i>	634
14.3.3.2	<i>Vibrocompactage ou vibroflottation</i>	639
14.3.3.3	<i>Compactage dynamique</i>	641
14.3.3.4	<i>Injection solide</i>	644
14.3.4	Procédés par inclusion de matériaux d'apport	646
14.3.4.1	<i>Inclusions souples par colonnes ballastées</i>	646
14.3.4.2	<i>Inclusions souples par plots ou puits ballastés</i>	651
14.3.4.3	<i>Autres types d'inclusions souples</i>	652

14.3.4.4	<i>Inclusions rigides en béton ou mortier de petit diamètre</i>	653
14.3.4.5	<i>Inclusions rigides de sols traités aux liants</i>	661
14.3.4.6	<i>Inclusions rigides réalisées par jet</i>	663
14.3.4.7	<i>Inclusions composites</i>	667
14.3.5	Procédés par traitement du sol	667
14.3.5.1	<i>Traitement des sols aux liants</i>	667
14.3.5.2	<i>Injections</i>	668
14.3.6	Autres procédés	671
14.3.7	Amélioration du sol et génie parasismique	671
14.3.7.1	<i>Généralités</i>	671
14.3.7.2	<i>Amélioration du sol dans la masse</i>	672
14.3.7.3	<i>Inclusions souples</i>	673
14.3.7.4	<i>Inclusions rigides</i>	674
	Bibliographie	676

CHAPITRE 15.	Conception et dimensionnement des ouvrages hydrauliques	679
15.1	Généralités sur les ouvrages hydrauliques	679
15.2	Étude du débit d'écoulement sous ou à travers un ouvrage	680
15.2.1	Généralités	680
15.2.2	Écran vertical dans une couche perméable	680
15.2.2.1	<i>Solution analytique pour un écran vertical sans fouille</i>	680
15.2.2.2	<i>Écran vertical avec ou sans fouille dans une couche perméable d'épaisseur limitée</i>	681
15.2.3	Batardeaux avec ou sans fouille de longueur infinie	682
15.2.3.1	<i>Définition des batardeaux larges et étroits</i>	682
15.2.3.2	<i>Batardeaux larges avec ou sans fouille</i>	683
15.2.3.3	<i>Batardeaux étroits sans fouille</i>	683
15.2.3.4	<i>Batardeaux étroits avec fouille</i>	683
15.2.4	Batardeaux avec ou sans fouille de longueur finie	683
15.2.4.1	<i>Batardeaux circulaires, carrés ou rectangulaires</i>	683
15.2.4.2	<i>Rideaux parallèles</i>	684
15.2.5	Tranchées et canaux	685
15.2.5.1	<i>Fouille de longueur finie à la surface d'une couche perméable épaisse</i>	685
15.2.5.2	<i>Débit de fuite d'un canal</i>	685
15.3	Drainage et rabattement	686
15.3.1	Techniques diverses	686
15.3.2	Règles des filtres	687
15.4	Rupture du fond de fouille d'origine hydraulique	688
15.4.1	Généralités	688
15.4.2	Soulèvement hydraulique global du terrain (UPL)	688
15.4.3	Soulèvement hydraulique des particules de sol – Boulance (HYD) ...	688

15.4.4 Rupture par érosion interne – Suffusion	689
15.4.5 Rupture par érosion régressive (renard hydraulique)	689
15.4.6 Stabilité du fond de fouille (renard solide)	690
15.5 Digue et barrages en terre	692
15.5.1 Principaux types de barrages en terre	692
15.5.2 Réseaux d'écoulement	693
15.5.2.1 Détermination de la surface phréatique	693
15.5.2.2 Débit, pression interstitielle, règle de Lane	694
15.5.3 Stabilité des talus	696
15.5.3.1 Types de vérification	696
15.5.3.2 Stabilité en fin de construction	696
15.5.3.3 Stabilité en régime permanent	697
15.5.3.4 Vidange rapide	697
Bibliographie	698
Symboles et notations	699
Annexes	729
Annexe A – Norme NF P94-500 du 30 novembre 2013	729
Annexe B – Échelle stratigraphique internationale	734
Annexe C – Équation générale de l'écoulement permanent	737
Annexe D – Force d'écoulement	739
Annexe E – Résolution mathématique de la théorie de la consolidation d'après Terzaghi et Froehlich	742
Annexe F – Cercle de Mohr	746
Annexe G – Corrélations entre paramètres de sol	748
Annexe H – Coefficients de sécurité partiels de l'EC7	759
Annexe I – Méthode des tranches de Bishop	775
Annexe J – Liste des normes du domaine géotechnique	777
Index	783

PRÉFACE

À un stade ou un autre, un projet de construction quel qu'il soit est toujours confronté à la géotechnique. Il faut bien fonder toutes les constructions! Les routes, voies ferrées, installations portuaires entraînent des terrassements parfois gigantesques.

Que ce soit les bureaux d'études, les entrepreneurs ou les contrôleurs, les ingénieurs qui participent à l'acte de construire ont besoin de s'appuyer sur des bases solides pour accomplir leurs missions.

Comme dans toute discipline, il convient de comprendre qualitativement les phénomènes abordés. Comment s'attaquer à un problème de stabilité de pente sans comprendre physiquement le mécanisme d'un glissement de terrain ? Cette partie descriptive est essentielle.

Dans un deuxième temps, il convient de quantifier le problème et de mettre en œuvre des solutions constructives adaptées et, pour cela, disposer des méthodes de calculs actuellement utilisées.

Dans l'esprit des précédentes éditions, cet ouvrage a pour objet de répondre à ces objectifs. La complémentarité des quatre auteurs, avec lesquels j'ai eu le plaisir de former une équipe très soudée, est, de ce point de vue, remarquable. Ce sont tous les quatre des hommes de terrain qui mettent chaque jour leurs connaissances au service de réalisations concrètes.

Bertrand Hubert, docteur en géologie, a acquis au cours de sa carrière tant en bureau d'études de sol qu'en qualité de spécialiste sols et fondations de l'Agence Nationale Construction de Socotec une grande expérience. Il aborde les sujets avec son œil de géologue car la nature ne se résume pas uniquement à des équations.

Moulay Zerhouni, docteur en mécanique des sols de l'École centrale de Paris qui a fait toute sa carrière dans de grands bureaux de géotechnique (Sopena, Solen, Arcadis et maintenant Fondasol), maîtrise totalement les méthodes de calcul.

Bruno Philipponnat, ingénieur IDN (Centrale Lille), qui par ailleurs me fait la grande joie d'être mon fils, s'est d'abord spécialisé dans la maîtrise d'œuvre d'ouvrages géotechniques. Il dirige maintenant le bureau de géotechnique et de maîtrise d'œuvre Sogeo Expert et le laboratoire Mageo.

Olivier Payant, ingénieur diplômé de Polytech Lille, est un expert reconnu des problématiques de fondations et de soutènements pour les projets de génie civil et de bâtiment. Il a notamment exercé pendant treize années au sein de la Direction Technique Construction de Socotec en tant que spécialiste sols et fondations, avant d'intégrer le bureau d'études Terrasol (groupe Setec) en 2019.

L'esprit que j'avais essayé de donner à l'ouvrage éponyme que j'avais publié en 1978 puis refondu avec l'aide précieuse de Bertrand Hubert en 1997 a été parfaitement conservé. Un travail énorme de mise à jour et de complément a été fait par les quatre co-auteurs, en particulier vis-à-vis des méthodes de calcul, rendues conformes aux Eurocodes.

Que ce soit les étudiants, les ingénieurs d'études ou les autres participants à l'acte de construire, ils trouveront tous ici un outil de travail précieux pour les aider à résoudre les problèmes liés à la géotechnique auxquels ils seront confrontés.

Gérard Philipponnat

Ingénieur ETP

Professeur honoraire
au Centre des hautes études
de la construction

AVANT-PROPOS

En visite chez des confrères structuralistes, il m'arrive de trouver encore sur des bureaux d'ingénieurs le « petit livre vert » de Gérard Philipponnat et d'entendre certains anciens élèves au Centre des hautes études de la construction parler de l'enseignement en géotechnique que ce dernier y dispensait.

De ses cours, il avait su tirer un ouvrage traitant des applications pratiques de la géotechnique, destiné aux ingénieurs et techniciens du domaine de la construction. Ouvrage pratique, clair, cohérent et didactique qui eut un succès dans le milieu des bureaux d'études, des entreprises et aussi auprès des étudiants.

Gérard Philipponnat, après son arrivée au sein du bureau d'études Sopena, envisagea la mise à jour de *Fondations et ouvrages en terre* à laquelle il me fit l'honneur de m'associer. Une vingtaine d'années ayant passé et après de multiples retirages, au vu de l'évolution de la normalisation dans le domaine de la géotechnique, avec notamment la mise en pratique des Eurocodes et les normes nationales d'application qui en ont résulté, sans oublier la nouvelle réglementation parasismique, il est apparu nécessaire de donner une suite à ce que beaucoup de praticiens appelaient la Bible en géotechnique, quitte à oser ce blasphème.

Sachant la rude tâche en laquelle cette refonte allait consister, je fis appel à certains de mes anciens collègues, dont j'avais pu, en travaillant à leur côté, apprécier les compétences : Bruno Philipponnat, Olivier Payant et Moulay Zerhouni.

Si nous avons souhaité garder le titre « fétiche » de *Fondations et ouvrages en terre*, c'est bien sûr en hommage à son inventeur, mais aussi afin de montrer que l'esprit pratique de ce manuel était préservé. Les anciens utilisateurs ne seront donc pas décontenancés par cette nouvelle mouture, où le canevas de l'ouvrage initial a été repris.

La première partie présente les bases nécessaires à l'étude du comportement théorique des sols sollicités par la construction d'ouvrages ou l'action d'efforts d'origine naturelle. Dans l'optimisation technique et économique d'un projet de construction, bâtiment ou ouvrage de génie civil, il n'est pas d'éléments qui puissent présenter des variations aussi importantes que ceux liés à la géologie, ou l'hydrogéologie, d'où la préséance accordée à ces disciplines. Sur la base des propriétés géotechniques des sols, caractéristiques physiques et mécaniques, et des données hydrauliques, les relations fondamentales de la mécanique des sols constituent le socle des calculs de dimensionnement des ouvrages. L'adéquation et la qualité des investigations, indispensables à la caractérisation des paramètres géotechniques applicables aux calculs, conditionnent l'évaluation correcte des risques ainsi que la pertinence du dimensionnement des ouvrages géotechniques. En conséquence, le chapitre relatif aux méthodes de reconnaissance des sols, aux essais *in situ* et de laboratoire est particulièrement développé. La partie

concernant les essais de laboratoire, trop souvent délaissés au profit des essais sur les sols en place, a été notablement privilégiée.

La deuxième partie est consacrée aux différents ouvrages géotechniques dans leur conception et leur dimensionnement :

- les ouvrages en terre et aménagements de terrains ;
- les fondations, superficielles et profondes, ainsi que les fondations mixtes ;
- les ouvrages de soutènements ;
- l'amélioration et le renforcement des sols ;
- les ouvrages hydrauliques.

Les méthodes de calcul dont l'ingénieur aura le plus couramment besoin ont été développées, dans le respect des méthodes décrites dans les textes de l'Eurocode 7 et des annexes d'application nationale qui lui ont été associées. Par ailleurs, il n'était pas possible d'ignorer que le Plan Séisme a étendu à plus de la moitié des communes du territoire français l'application des normes de construction parasismique. Une partie de cet ouvrage traite donc du génie parasismique et on y trouvera les grandes lignes de conception et de dimensionnement des ouvrages géotechniques vis-à-vis du risque sismique.

En complément d'un index des termes techniques, le lecteur trouvera également à travers un glossaire l'outil lui permettant de s'y retrouver dans la profusion des symboles et notations utilisés dans cet ouvrage, le plus souvent issus des documents normatifs.

En complément des références bibliographiques rassemblant les différents documents source utilisés pour chaque chapitre, les normes spécifiques au domaine de la géotechnique, en vigueur à la date de rédaction de cet ouvrage et utilisées dans le cadre de cet ouvrage, ont été réunies en adoptant un mode de classement basé sur leur codification identifiant leur origine et leur statut.

Parmi les annexes, on trouvera diverses démonstrations et résolutions mathématiques relatives à des développements purement théoriques. Par ailleurs, bien que les corrélations entre paramètres géotechniques doivent être utilisées avec précaution, elles peuvent néanmoins s'avérer très utiles en phase d'avant-projet et contribuer à un travail de synthèse. Les corrélations les plus courantes issues de la littérature ont été reprises ici. Afin d'épargner des recherches fastidieuses au sein des documents normatifs, il a été jugé profitable de rassembler au sein de tableaux divers coefficients partiels nécessaires à la détermination des valeurs de calcul, voire aux calculs de dimensionnement de certains ouvrages géotechniques.

Que les utilisateurs de ce manuel soient étudiants, ingénieurs d'études ou autres participants à l'acte de construire, nous espérons qu'ils trouveront tous ici un outil de travail précieux pour les aider à résoudre les problèmes liés à la géotechnique auxquels ils seront confrontés.

Bertrand Hubert

INTRODUCTION

Normalisation en géotechnique

Introduction

Une norme est un document de référence approuvé par un institut de normalisation reconnu tel que l'Afnor, en France. Elle définit des caractéristiques et des règles volontaires applicables aux activités. Elle est le consensus entre l'ensemble des parties prenantes d'un marché ou d'un secteur d'activité. Elle permet de définir un langage commun entre les acteurs économiques – producteurs, utilisateurs et consommateurs –, de clarifier, d'harmoniser les pratiques et de définir le niveau de qualité, de sécurité, de compatibilité et de moindre impact environnemental des produits, services et pratiques.

Les normes facilitent les échanges commerciaux, tant nationaux qu'internationaux, et contribuent à mieux structurer l'économie et à faciliter la vie quotidienne de chacun. À l'exception de quelques normes réglementaires dont l'application est obligatoire, comme certaines normes relatives à la sécurité des personnes, les normes sont en général d'application volontaire ou contractuelle.

Les champs couverts par les normes sont aussi variés que les activités économiques et répondent aux questions de société.

C'est ainsi que les recommandations d'une norme peuvent porter aussi bien sur des produits, des procédés, des bonnes pratiques, des méthodes de mesure et d'essais, des systèmes d'organisation, des méthodes de calcul, etc.

Ces dernières décennies, la normalisation dans le domaine de la géotechnique s'est largement intensifiée sous l'impulsion des instances de normalisation européenne (CEN: Comité européen de normalisation) et internationale (ISO: International Organization for Standardization), ainsi qu'au niveau des instituts de normalisation nationaux des pays membres de ces instances, par exemple l'Afnor, le DIN, le BSI, etc., au travers des groupes et comités de normalisation miroirs.

Un aperçu de l'organisation des structures normatives œuvrant pour la normalisation en géotechnique et une synthèse des principales normes publiées ou en cours d'élaboration sont présentés ci-après.

1. Les organismes de normalisation

Dans un souci d'harmonisation et pour faciliter les échanges, les normes sont majoritairement élaborées au niveau international. En effet, désormais, les normes peuvent être élaborées non seulement au niveau du pays sous l'égide de l'institut ou du bureau de normalisation national correspondant, comme l'Afnor en France, mais également au niveau européen, sous l'égide du CEN et de ses commissions techniques, ou encore au niveau international ISO, qui dispose également de commissions techniques correspondantes selon le domaine couvert par la norme considérée.

Des accords internationaux permettent d'harmoniser et de transposer les normes entre ces niveaux CEN et ISO et les pays qui s'y rattachent.

L'un des principaux accords de coopération technique entre CEN et ISO est connu sous le nom de Vienna Agreement (CEN et ISO, 2001).

Cet accord, qui régit aujourd'hui le fonctionnement de la normalisation CEN et ISO, prévoit deux modes essentiels pour le développement collaboratif de normes : le mode où l'ISO est pilote (*ISO lead*) et le mode où le CEN est pilote (*CEN lead*). Les projets de normes et les documents sont élaborés par l'un des modes et sont soumis à l'approbation simultanée de l'autre mode.

Dans ce contexte, aujourd'hui plus de 80% des normes du domaine de la construction, du bâtiment et des travaux publics, dont fait partie la géotechnique, sont désormais élaborées soit au niveau européen, avec un pilotage du CEN, soit au niveau international, avec un pilotage de l'ISO. Les normes élaborées au niveau du CEN et celles élaborées par l'ISO dans le cadre de l'accord de Vienne conduisent obligatoirement les pays européens à reprendre et à transposer les normes homologuées européennes dans leur collection nationale de normes (ex. en France NF EN... ou NF EN/ISO... ou NF ISO...) et à supprimer les normes du pays (ex. NF) qui sont en contradiction avec ces normes européennes.

2. Les instances de normalisation en géotechnique

En France, différentes commissions de normalisation (CN) sont responsables des travaux normatifs dans le domaine de la géotechnique et des domaines connexes et apparentés. La plupart de ces commissions dépendent du Bureau de normalisation des transports, des routes et de leurs aménagements (BNTRA).

Au niveau européen (CEN) et au niveau international (ISO), ce sont les comités techniques (TC : Technical Committees) consacrés au domaine géotechnique et aux domaines connexes qui sont chargés de l'élaboration des normes de ces domaines. À ces comités techniques sont rattachés des groupes de travail (WG : Working Groups), affectés aux travaux d'élaboration d'une collection identifiée de normes.

Les commissions de normalisation françaises (CN) ont pour mission de gérer les normes nationales et de servir de groupe miroir pour les comités techniques du CEN et de l'ISO, et, notamment, de préparer les positions françaises pour les discussions européennes et internationales relatives à l'élaboration, la maintenance et à l'évolution des normes.

Le tableau 1 ci-après donne la correspondance entre les commissions de normalisation françaises et les différents comités techniques CEN et ISO.

Tableau 1. Correspondance des commissions françaises, européennes et internationales (source BNTRA 2017)

Domaine	Nombre de normes	France	CEN	ISO
Justification des ouvrages géotechniques	9	CN JOG	TC250/SC7	TC182
Reconnaissances et essais géotechniques	114	CN REG	TC341	TC182
Exécution des travaux géotechniques	15	CN ETG	TC288	-
Géosynthétiques	93	CN GSY	TC189	TC122
Terrassements	42	CN T	TC396	-
Granulats	67	CN GRA	TC154	-
Paravalanches	10	CN PAB	-	-
Missions géotechniques	1	CN MG	-	-

3. Les différents types de norme

Une norme est un document de référence qui apporte des réponses à des questions techniques et commerciales que se posent de façon répétée les acteurs sur des produits, des biens d'équipements ou des services. Elle est élaborée en consensus par l'ensemble des acteurs d'un marché (producteurs, utilisateurs, laboratoires, pouvoirs publics, consommateurs, etc.). Elle a pour vocation de présenter l'état de l'art, reconnu par l'ensemble des parties concernées par une technique ou une pratique répétitive.

Étant le fruit d'une réflexion approfondie des experts qui participent à sa mise au point, une norme est établie par consensus et approuvée par un organisme reconnu. Elle fournit des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques pour des activités, ou leurs résultats, garantissant un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné.

Une norme doit être univoque et non ambiguë. Son respect doit garantir un résultat et donc des décisions basées sur ce résultat de manière reproductible et avec une marge d'erreur connue à l'avance. C'est pourquoi elle est utilisée dans les marchés comme spécification technique, dans les contrats commerciaux pour clarifier les relations client-fournisseur, dans l'évaluation de la compétence et de la capacité à atteindre la qualité en vue d'accréditation ou de certification, et dans bien d'autres applications.

De par son mode d'élaboration, elle constitue un référentiel accepté par tous.

Une norme est d'application volontaire et contractuelle. Mais, de manière réglementaire, les pouvoirs publics d'un pays peuvent rendre certaines normes d'application obligatoire. C'est notamment le cas pour des raisons d'ordre public, de sécurité publique, de protection de l'environnement, de protection du patrimoine national, de loyauté des transactions commerciales, de défense du consommateur, etc.

À titre d'exemple, il y a en France près de 150 normes homologuées d'application obligatoire, ce qui représente environ 1 % de l'ensemble des normes homologuées. Parmi ces normes d'application obligatoire, on peut citer, par exemple, certaines parties de l'Eurocode 8 (NF EN 1998), relatif à la sécurité des structures sous séisme, certaines normes sur la sécurité au travail et également des normes sur la prévention en cas de travaux à réaliser à proximité de réseaux (NF S70-003).

Les principaux types de normes ou de documents normatifs qui peuvent être publiés par les instituts de normalisation sont résumés ci-après. En France, ces normes peuvent être d'origine française, européenne (EN) ou internationale (ISO).

La référence d'une norme comporte des sigles qui permettent d'identifier son statut. Par exemple, en France, la codification est la suivante :

- «NF», «NF EN», «NF ISO» et «NF EN ISO» : il s'agit là de normes homologuées, d'origine, respectivement, française, européenne, internationale ou européenne et internationale en cas d'accord. L'homologation est une officialisation publique d'une norme en raison de sa destination (référence dans la réglementation, les contrats ou les marchés publics, codification des règles de l'art...);
- «XP», «CEN/TS», «ISO/TS» : lorsqu'il s'agit de normes expérimentales, d'origine, respectivement, française, européenne ou internationale. Les normes expérimentales doivent faire l'objet, dans un délai n'excédant pas cinq ans après leur publication, d'un nouvel examen par la commission de normalisation compétente, en vue soit de les soumettre à l'homologation, soit de les remettre à l'étude, soit de les supprimer;
- «FD», «CEN/TR», «ISO/TR» : lorsqu'il s'agit de fascicules de documentation (*technical report*), d'origine, respectivement, française, européenne ou internationale. Ce sont des documents de normalisation à caractère essentiellement informatif;
- «AC», «CWA», «IWA» : lorsqu'il s'agit d'accords techniques (*workshop agreement*), d'origine, respectivement, française, européenne ou internationale. Dans cette catégorie, on peut inclure également les guides d'application «GA» et les référentiels de bonne pratique «BP».

4. Le panel normatif en géotechnique

Dans le domaine de la géotechnique et ceux connexes ou apparentés, le catalogue de normes comporte plusieurs catégories qui peuvent être listées comme suit, avec :

- des normes de conception, justification et calcul, par exemple les Eurocodes, leurs annexes nationales et les normes d'application nationale associées;
- des normes d'essais, comme les normes de prélèvements et d'essais géotechniques *in situ* ou en laboratoire et les essais sur ouvrages géotechniques et leur instrumentation;
- des normes de classification et de spécification de produits, par exemple les géotextiles, géomembranes et produits apparentés, les granulats, les bétons, les liants hydrauliques y compris ceux destinés au traitement des sols, les graves traitées, les classifications de sols, les filets et dispositifs de protection contre la chute de blocs, etc.;
- des normes d'exécution de travaux géotechniques spéciaux, comme celles relatives à la réalisation de pieux, de parois, de sol renforcé, d'injections, d'amélioration des sols, etc.;

- des normes d'organisation et de certification, comme celles relatives à la qualification des personnels et des entreprises, ou encore celle relative aux missions d'ingénierie géotechnique.

4.1. Normes de conception – Les Eurocodes

Les Eurocodes sont des codes européens (CEN) de conception et de calcul des ouvrages de bâtiment et de génie civil. Ils ont le statut de normes volontaires, et ont été transposés en normes nationales dans les États membres du Comité européen de normalisation (CEN).

En France, depuis 2010 (fin de la période de transition), ils remplacent officiellement les normes ou règlements nationaux équivalents existants.

Les Eurocodes servent de documents de référence pour les usages suivants :

- comme moyen de prouver la conformité des bâtiments et des ouvrages de génie civil aux exigences essentielles de la directive Produits de la construction (directive DPC, 89/106/CEE et règlement UE, 305/2011), en particulier :
 - l'exigence essentielle n° 1 Stabilité et résistance mécanique ;
 - l'exigence essentielle n° 2 Sécurité en cas d'incendie ;
 - l'exigence essentielle n° 7 Utilisation durable des ressources naturelles ;
- comme base de spécification des contrats pour les travaux de construction et les services techniques associés (ex. ingénierie, CCTP, DCE) ;
- comme cadre d'établissement de spécifications techniques harmonisées pour les produits de construction (marquage CE et agréments ATE).

Le programme des Eurocodes structuraux compte aujourd'hui dix Eurocodes :

- EN 1990 : Eurocode 0 Bases du calcul des structures,
- EN 1991 : Eurocode 1 Actions sur les structures,
- EN 1992 : Eurocode 2 Calcul des structures en béton,
- EN 1993 : Eurocode 3 Calcul des structures en acier,
- EN 1994 : Eurocode 4 Calcul des structures mixtes acier-béton,
- EN 1995 : Eurocode 5 Calcul des structures en bois,
- EN 1996 : Eurocode 6 Calcul des ouvrages en maçonnerie,
- EN 1997 : Eurocode 7 Calcul géotechnique,
- EN 1998 : Eurocode 8 Calcul des structures pour leur résistance aux séismes,
- EN 1999 : Eurocode 9 Calcul des structures en aluminium.

La transposition de l'Eurocode 7 Calcul géotechnique dans chaque pays européen, comme en France, a conduit à la publication des normes homologuées suivantes :

- la norme NF EN 1997-1, *Calcul géotechnique - Règles générales*, publiée en juin 2005 par l'Afnor (P94-251-1), et son amendement A1 d'avril 2014, qui apporte des corrections au texte initial et complète la section 8 de la norme EN 1997-1 ;
- l'annexe nationale française NF- EN 1997-1/AN, publiée en septembre 2006 par l'Afnor. Cette annexe nationale est actuellement en cours de révision ;
- la norme NF EN 1997-2, *Calcul géotechnique - Reconnaissance des terrains et essais géotechniques*, publiée en septembre 2007 par l'Afnor (P94-252 - 2^e tirage).

La transposition est complétée par les normes d'application nationale suivantes :

- *Fondations superficielles* (NF P94-261 : juin 2013 et amendement A1 de février 2017) ;
- *Fondations profondes* (NF P94-262 : 2^e tirage de 01/2013, dont l'amendement A1 a été publié en 2018) ;
- *Murs de soutènement* (NF P94-281 : avril 2014) ;
- *Écrans de soutènement* (NF P94-282 : mars 2009 et amendement A1 de février 2015) ;
- *Remblais renforcés et clouage* (NF P94-270 : juillet 2009 - 2^e tirage).

Ces normes annulent et remplacent certains textes de référence comme le fascicule 62 - titre V ou les normes NF P94-220 et NF P94-240.

Il est à noter qu'une révision de l'Eurocode 7 a été lancée en 2015 par le TC250/SC7 du CEN, avec un objectif de parution du nouvel Eurocode 7 à l'horizon 2020.

4.2. Normes d'essais

Dans cette catégorie, on trouve aujourd'hui principalement les normes d'essais aussi bien in situ qu'en laboratoire référencées par l'Eurocode 7 ou par les autres normes associées à l'Eurocode 7, comme les normes d'exécution de travaux.

Comme on l'a vu précédemment, l'élaboration de ces normes d'essais est prise en charge et pilotée (*lead*) soit par le comité technique du CEN/TC341 soit par celui de l'ISO/TC182.

Les collections de normes existantes à ce jour sont :

- la série des normes NF EN/ISO 17892-xx : celles-ci, initialement publiées sous la forme de normes expérimentales (XP/TS), couvrent les principaux essais géotechniques d'identification et mécaniques réalisés en laboratoire. Ils sont actuellement en cours de révision par le CEN/TC341 et plus particulièrement par le groupe de travail WG6 dédié ;
- la série des normes NF EN/ISO 18674-xx : celles-ci sont en cours d'élaboration par l'ISO/TC182-WG2. Elles couvrent les mesurages, la surveillance et l'instrumentation géotechniques *in situ* comme l'inclinométrie, la piézométrie, les tassomètres, les mesures de contraintes, etc. ;
- la série des normes NF EN/ISO 22282-xx : celles-ci sont relatives aux essais géohydrauliques réalisés *in situ*, comme les essais de pompage et les essais de perméabilité en forage. Élaborées par le groupe de travail WG1 du CEN/TC341, elles ont été homologuées et publiées en 2013 ;
- la série des normes NF EN/ISO 22475-xx, qui couvrent les méthodes de prélèvement et les mesurages piézométriques (exécution des forages, des prélèvements, piézométrie...). La norme homologuée a été publiée en 2007. Elle est actuellement en révision, avec notamment la séparation de la partie « mesurages piézométriques », qui fera partie désormais d'une norme de la série ISO 18674-xx ;

- la série des normes NF EN/ISO 22476-xx, relatives aux essais géotechniques réalisés en place. Les normes couvrant les principaux essais comme les essais pénétrométriques statique et dynamique, l'essai au carottier SPT, l'essai pressiométrique Ménard ont été élaborées par le CEN/TC341 et ont été publiées en tant que normes homologuées ;
- la série des normes NF EN/ISO 22477-xx, relatives aux essais géotechniques réalisés sur des structures géotechniques. Parmi celles-ci, on peut citer les essais de pieux, les essais de clous, les essais de tirants, etc.

4.3. Normes de classification et de spécification de produits

Certaines normes définissent des spécifications et des caractéristiques de produits en fonction notamment de la destination et du domaine d'application des produits concernés. Ces normes sont utilisées entre autres pour aider au choix des produits adaptés et également comme référence pour le marquage et la certification de produits, notamment dans le cadre des règlements couvrant les produits de la construction.

Parmi les produits pouvant être utilisés dans le domaine géotechnique, on peut citer :

- les produits de fondations :
 - NF EN 12794, *Produits préfabriqués en béton - Pieux de fondation*,
 - NF EN 10248-xx, *Palplanches laminées à chaud en aciers non alliés*,
 - NF EN 10249-xx, *Palplanches profilées à froid en aciers non alliés*,
 - NF EN 10305-xx, *Tubes de précision en acier*;
- les produits géosynthétiques et produits apparentés. Le tableau 2 ci-après fournit un exemple de normes produits rattachées à cette catégorie :

Tableau 2. Exemple de normes de spécifications de produits géosynthétiques

Référence de la norme	Titre
NF EN 13249: 2017	Géotextiles et produits apparentés - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction de routes et autres zones de circulation (à l'exclusion des voies ferrées et des couches de roulement)
NF EN 13250: 2017	Géotextiles et produits apparentés - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans la construction des voies ferrées
NF EN 13251: 2017	Géotextiles et produits apparentés - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans les travaux de terrassement, les fondations et les structures de soutènement
NF EN 13252: 2017	Géotextiles et produits apparentés - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans les systèmes de drainage
NF EN 13253: 2017	Géotextiles et produits apparentés - Caractéristiques requises pour l'utilisation dans les ouvrages de lutte contre l'érosion (protection côtière et revêtement de berge)

- les granulats et enrochements (CEN/TC154). Le tableau 3 ci-après fournit un exemple de normes produits rattachées à cette catégorie :

Tableau 3. Exemple de normes de spécifications de granulats et enrochements

Référence de la norme	Titre
NF EN 13242+A1 : 2008	Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées
NF EN 12620+A1 : 2008	Granulats pour béton
NF EN 13383-1 : 2006 (tirage 3)	Enrochements - Partie 1 : spécifications
NF EN 13383-2 : 2006 (tirage 2)	Enrochements - Partie 2 : méthodes d'essai
NF EN 13450 : 2005 (tirage 2)	Granulats pour ballasts de voies ferrées

4.4. Normes d'exécution de travaux géotechniques spéciaux

Ces normes définissent les processus et règles d'exécution de travaux géotechniques spéciaux. Elles sont élaborées au niveau du TC288 du CEN. Aujourd'hui, la majeure partie des techniques pratiquées d'exécution de fondations, d'ancrages, de renforcement et d'amélioration des sols et des travaux d'injection, etc., font l'objet de normes homologuées.

Le tableau 4 fournit en exemple un extrait des normes publiées entrant dans cette catégorie.

Tableau 4. Exemple de normes de travaux géotechniques spéciaux

Référence de la norme	Titre
NF EN 1536+A1 : 2015	Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Pieux forés
NF EN 1537 : 2013	Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Tirants d'ancrage
NF EN 1538+A1 : 2015	Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Parois moulées
NF EN 12063 : 1999	Exécution de travaux géotechniques spéciaux - Rideaux de palplanches
NF EN 12699 : 2015	Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Pieux avec refoulement du sol
NF EN 12715 : 2000	Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Injection
NF EN 12716 : 2001	Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Colonnes, panneaux et structures de sol-ciment réalisés par jet
NF EN 14199 : 2015 (tirage 2)	Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Micropieux

4.5. Normes d'organisation

Il est possible de regrouper dans cette catégorie :

- les normes (expérimentales) de qualification des entreprises et du personnel :
 - TS EN ISO22475-2, *Reconnaisances et essais géotechniques - Critères de qualification des entreprises et du personnel*,
 - TS EN ISO22475-3, *Reconnaisances et essais géotechniques – Évaluation de la conformité des entreprises et du personnel*;
- la norme française homologuée NF P94-500, *Missions d'ingénierie géotechnique*, publiée par l'Afnor en 2013.

Conclusion

L'élaboration des normes se fait désormais à l'échelle internationale EN ou ISO. Ceci va bien entendu en faveur d'une harmonisation des pratiques et des produits.

Les normes sont devenues incontournables dans de nombreux domaines. Il en est de même en géotechnique, que ce soit dans l'aide à la conception et au dimensionnement des ouvrages, dans la gestion des contrats entre les différents intervenants, pour l'assurabilité des ouvrages, ...

En revanche, il devient parfois plus compliqué de suivre et de participer à cette élaboration des normes, qui exigent une présence et une implication dans les comités et groupes de travail chargés de la rédaction des normes. Cette participation, bien que facilitée aujourd'hui par les outils collaboratifs informatiques, nécessite malgré tout une assiduité régulière et une veille normative permanente.

L'éventail normatif en géotechnique est vaste, avec des centaines de normes répertoriées (calcul, essais, produits, exécution...).

La veille technique et normative à assurer doit être rigoureuse et continue, en particulier pour les laboratoires et les concepteurs (ingénieristes, maîtres d'œuvre...) qui participent à l'établissement des cahiers des charges et des contrats, ainsi qu'à ceux responsables du suivi d'exécution des travaux.

Bibliographie

[AFNOR 2006] AFNOR NORMALISATION, *Éventail des documents normatifs*, fascicule Afnor, 2006 (téléchargeable sur www.afnor.org).

[AFNOR 2013] AFNOR NORMALISATION, *Règles pour la normalisation française - Partie 1 : instances et procédures de travail*, fascicule Afnor, 5^e édition, 2006 (téléchargeable sur www.afnor.org).

[Daubilly 2014] DAUBILLY B., *Organisation générale de la normalisation*, présentation à la journée CFMS du 8 octobre 2014, Paris, 2014.

[ISO & CEN 2001] ISO & CEN, *Agreement on technical co-operation between ISO and CEN – VA codified – Version 3.3*, 2001.

[Magnan 2014] MAGNAN J.-P., *Organisation de la normalisation en France*, présentation à la journée CFMS du 8 octobre 2014, Paris, 2014.

[Zerhouni 2002] ZERHOUNI M.I., BIGOT G., « La normalisation en géotechnique », *Géologues* 132, p. 65-71, 2002.

Site Internet de l'ISO – www.iso.org

Site Internet du CEN – www.cen.eu

Site Internet BNTRA – www.cerema.fr

Nota : l'ensemble des références de la bibliographie normative citée dans l'ouvrage est regroupé dans l'annexe J.