

Sébastien Burlon, Clément Desodt, Julien Habert, Philippe Reiffsteck

Calcul des ouvrages géotechniques selon l'Eurocode 7

DUNOD

Illustration de couverture : © Serjio74/iStockphoto.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements	d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
	

© Dunod, 2017

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-077226-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

Il faut saluer la parution de cet ouvrage qui est le premier livre exhaustif en langue française sur l'Eurocode 7 dédié au « calcul géotechnique ».

La géotechnique est une discipline particulière par le fait qu'elle intéresse des domaines très variés comme la géologie, l'hydrogéologie, la mécanique des sols et des roches, la résistance des matériaux, la modélisation numérique... et intervient dans toutes les étapes de la réalisation d'une construction, que ce soit un bâtiment, un ouvrage d'art, une station de métro, etc. Notons qu'elle est également présente dans d'autres domaines aussi variés que les risques naturels et anthropiques ou que la conservation des patrimoines naturel et culturel.

Depuis près de 40 ans, dans le cadre du programme des Eurocodes, le domaine du bâtiment et des travaux publics tente à l'échelle européenne de se doter de normes de calcul et de conception. L'Eurocode 7 traduit cette volonté pour la géotechnique.

Dans ce contexte, l'enseignement de la diffusion de l'Eurocode 7 et, plus généralement, de la géotechnique sont donc des enjeux avérés mais présentant des questionnements complexes. Il est en effet difficile de trouver le ton juste entre une présentation théorique de la géotechnique s'appuyant uniquement sur les concepts fondamentaux de la mécanique des sols et une présentation trop pratique qui décrirait uniquement les procédures de vérification des ouvrages géotechniques telles que présentées dans l'Eurocode 7 et ses normes d'application nationale françaises.

Avec cet ouvrage intitulé « Calcul des ouvrages géotechniques selon l'Eurocode 7 », les auteurs ont essayé de trouver un équilibre pour présenter de manière synthétique les aspects théoriques et pratiques de la justification des ouvrages géotechniques dans ce cadre normatif qui est désormais imposé par l'Eurocode 7. L'objectif semble atteint. Cet ouvrage constitue, en tout cas, une base qui permettant de poursuivre l'exercice avec la seconde génération des Eurocodes qui se profile. Des améliorations sont largement envisageables tant le nombre de questions liées à la mise en œuvre de l'Eurocode 7 restent nombreuses.

Le lecteur pourra ainsi, au travers des trois premiers chapitres, saisir les interactions entre les niveaux européen et français de la normalisation et comprendre les concepts géotechniques essentiels mis en avant par l'Eurocode 7. Le chapitre 4, relatif à la prise en compte des effets de l'eau en géotechnique, dénote la volonté des auteurs de faire le lien entre des besoins pragmatiques de justification des ouvrages et des questions plus théoriques en relation avec le comportement du sol sous l'effet de l'écoulement d'une nappe. Les chapitres qui suivent expliquent, de manière plus classique, comment dimensionner chacun des ouvrages géotechniques selon l'Eurocode 7 : dans chaque cas, ce même besoin de rapprocher considérations théoriques et pratiques est mis en avant. Le lecteur pourra y trouver ainsi les informations essentielles et se reporter à des ouvrages ou des articles scientifiques plus détaillés le cas échéant.

Il est enfin important de noter que cet ouvrage étant le premier de ce type en langue française sur l'Eurocode 7 et la géotechnique, on peut espérer qu'il soit promis à une large diffusion dans le monde francophone à la fois dans les écoles d'ingénieurs, les universités et les bureaux d'études où les étudiants et les jeunes ingénieurs pourront s'initier au domaine de la géotechnique et de la conception des ouvrages. S'appuyant sur de nombreuses sessions de formation continue et un certain nombre de modules de cours dispensés depuis plusieurs années dans les écoles d'ingénieurs et les universités, cet ouvrage devrait toucher un large public.

Roger Frank

Professeur honoraire de l'École des ponts

Président de l'Eurocode 7 (1998-2004)

Président de la Société Internationale
de Mécanique des Sols et Géotechnique (2013-2017)

Table des matières

Préface	V
Avant-propos	XI
Chapitre 1 L'Eurocode 7 et les autres normes européennes	1
1. L'Eurocode 7 et les autres Eurocodes	1
2. L'Eurocode 7 – Partie 1	4
3. L'Eurocode 7 – Partie 2	7
4. Les autres normes du TC341 et du T288	8
Chapitre 2 Les concepts clés de l'Eurocode 7 – Partie 1	11
1. Les résistances et les actions en géotechnique	11
2. Les valeurs caractéristiques	12
2.1 Les propriétés géotechniques des terrains	13
2.2 Les résistances	14
3. Les valeurs dérivées	15
4. Les approches de calcul	16
5. La place du calcul numérique	19
Entraînez-vous	21
Solutions	22
Chapitre 3 L'application de l'Eurocode 7 en France	24
1. L'annexe nationale de l'Eurocode 7	24
2. Le lien avec la norme NF P 94-500	27
3. Bref descriptif des normes d'application nationale de l'Eurocode 7	28
3.1 La norme « Fondations superficielles » NF P 94-261	28
3.2 La norme « Fondations profondes » NF P 94-262	29
3.3 La norme « Remblais renforcés et clouage » NF P 94-270	29
3.4 La norme « Murs de soutènement » NF P 94-281	29
3.5 La norme « Écrans de soutènement et ancrages » NF P 94-282	30
3.6 La norme « Ouvrages en terre » NF P 94-290	30

4. Les facteurs de modèle	31
5. Les problèmes de stabilité générale	32
Chapitre 4 Les problèmes liés à l'eau	34
1. Généralités	34
2. Les instabilités de type UPL	35
3. Les instabilités de type HYD	36
3.1 Annulation locale de la contrainte effective verticale	37
3.2 Érosion interne	38
3.3 Érosion régressive	38
Entraînez-vous	39
Solutions	42
Chapitre 5 Dimensionnement des fondations superficielles	49
1. Les exigences de l'Eurocode 7	49
2. Les exigences de la norme NF P 94-261	52
2.1 Les principes de justification	54
2.2 Le calcul de la portance	55
2.3 Les limitations d'excentrement	58
2.4 Le calcul de la résistance au glissement	59
2.5 Les liens avec l'Eurocode 8 – Partie 5	61
2.6 Le calcul des tassements des semelles	62
3. Formulaire pour le calcul des fondations superficielles	64
3.1 Portance à partir de c_u , c et φ	64
3.2 Portance à partir de p_{LM}	67
3.3 Tassement à partir de p_{LM}	70
Entraînez-vous	74
Solutions	77
Chapitre 6 Dimensionnement des fondations profondes	83
1. Les exigences de l'Eurocode 7	83
2. Les exigences de la norme NF P 94-262	85
2.1 Les principes de justification	87
2.2 Comportement sous chargement axial d'un pieu isolé	87
2.3 Comportement des groupes de pieux sous charge axiale	95
2.4 Comportement sous chargement transversal	96
2.5 Résistance structurelle des pieux	98

3. Formulaire pour le calcul de la portance des fondations profondes	99
3.1 À partir de données pressiométriques (modèle PMT 2012)	99
3.2 À partir de données pénétrométriques (modèle CPT 2012)	104
Entraînez-vous	108
Solutions	111

Chapitre 7 Dimensionnement des écrans de soutènement

1. Les exigences de l'Eurocode 7	120
1.1 Principes	120
1.2 Justification de l'écran	121
1.3 Prise en compte des ancrages	122
2. Les exigences de la norme NF P 94-282	123
2.1 Les principes de justification	124
2.2 Géométrie	125
2.3 Prise en compte de l'eau	126
2.4 Estimations des efforts de poussée et de butée limite	127
2.5 Surcharges localisées et talus	128
2.6 Méthode aux coefficients de réaction	128
2.7 Écrans non uniformes	130
3. Défaut de butée	131
3.1 Écrans autostables	132
3.2 Écrans tirantés	133
4. Résistance structurelle de l'écran	134
4.1 Obtention des efforts de calcul	135
4.2 Cas particulier des structures en béton et béton armé	135
4.3 Cas particulier des structures en acier	135
5. Autres vérifications	136
5.1 Équilibre vertical	136
5.2 Appuis	137
5.3 Justification structurelle	139
5.4 Stabilité du massif d'ancrage	139
5.5 Stabilité du fond de fouille	140
Entraînez-vous	141
Solutions	144

Chapitre 8 Dimensionnement des murs de soutènement

1. Les exigences de l'Eurocode 7	153
---	-----

2. Les exigences de la norme NF P 94-281	154
2.1 Les principes de justification	155
2.2 Le calcul des forces de poussée	155
2.3 Le calcul de la portance	158
2.4 La résistance au glissement	159
2.5 La justification structurelle	160
Entraînez-vous	163
Solutions	164
 Chapitre 9 Dimensionnement des pentes et ouvrages en sols renforcés	169
1. Les exigences de l'Eurocode 7	169
2. Les exigences des chapitres « stabilité générale » des normes d'application	170
2.1 Les principes de justification	171
2.2 Cas d'une surface de rupture bidimensionnelle quelconque	175
2.3 Cas d'une pente dans un massif rocheux	175
2.4 Introduction d'une force extérieure	175
2.5 Méthodes de réduction des paramètres de cisaillement $c-\phi$	176
3. Les exigences de la norme NF P 94-270	177
3.1 Les principes de justification	178
3.2 Sols renforcés	179
3.3 Tirants ou ancrages	181
3.4 Renforcement par inclusions	182
Entraînez-vous	185
Solutions	189
 Chapitre 10 Dimensionnement d'autres ouvrages	195
1. Les ouvrages en remblai : remblais d'infrastructure, digues et barrages	195
1.1 Les exigences de l'Eurocode 7	195
1.2 Principes de justification	196
2. Les tunnels	206
2.1 Les exigences de l'Eurocode 7	206
2.2 Les principes de justification	209
2.3 Déformations liées à l'excavation	213
Entraînez-vous	215
Solutions	219
 Index	221

Avant-propos

Cet ouvrage a pour objectif de présenter en un seul volume la manière dont la conception et le dimensionnement des ouvrages géotechniques sont désormais traités par l'Eurocode 7 ainsi que les normes d'application françaises qui s'y réfèrent.

Il est important de préciser que cet ouvrage n'aborde pas tous les problèmes géotechniques que l'Eurocode 7 présente car son objectif principal est de s'adresser aux étudiants de génie-civil en école d'ingénieurs ou à l'université ainsi qu'aux ingénieurs débutants désireux d'avoir rapidement une vue d'ensemble de l'Eurocode 7 et des normes d'application françaises. Il essaie de donner dans un style concis mais néanmoins précis les principaux enseignements que l'on peut tirer de l'Eurocode 7 pour le calcul des ouvrages géotechniques. Il s'appuie aussi sur l'expérience acquise par ses auteurs durant des sessions de formation continue ou les différents cours de géotechnique qu'ils dispensent en école d'ingénieurs ou en université.

Les trois premiers chapitres permettent de présenter l'organisation générale des normes en géotechnique en France et en Europe, tout en soulignant les points clefs de l'Eurocode 7. Le chapitre 4 est relatif aux problèmes induits par l'eau qui sont si courants en géotechnique. Les chapitres 5 à 8 traitent des fondations superficielles, des fondations profondes, des écrans de soutènement éventuellement ancrés et des murs de soutènement. Les deux derniers chapitres abordent des domaines qui ne sont pas complètement couverts par l'Eurocode 7 mais pour lesquels de nombreux principes peuvent s'appliquer : celui des pentes et des massifs de sols renforcés dans le chapitre 9 et ceux des digues et des tunnels dans le chapitre 10.

Cet ouvrage est aussi conçu comme un point d'étape dans la mise en place de l'Eurocode 7 en France à l'heure où les premières discussions pour la seconde génération des Eurocodes s'amorcent. Il permet, un peu plus de dix ans après la publication de l'Eurocode 7, de décrire réellement les méthodes de calcul qui sont actuellement employées à la suite de celles utilisées pendant quelques dizaines d'années et présentées dans le Fascicule 62 Titre V ou les DTU 13.12 et 13.2.

À la découverte de votre livre

1 Ouverture de chapitre

Elle donne :

- une **introduction** aux sujets et aux problématiques abordés dans le chapitre
- un **rappel des objectifs** pédagogiques
- le **plan** du chapitre

2 Le cours

Le cours, concis et structuré, expose le programme. Il donne :

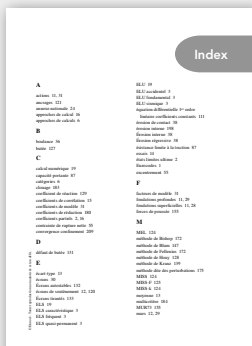
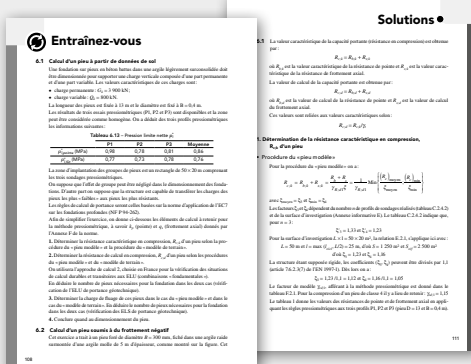
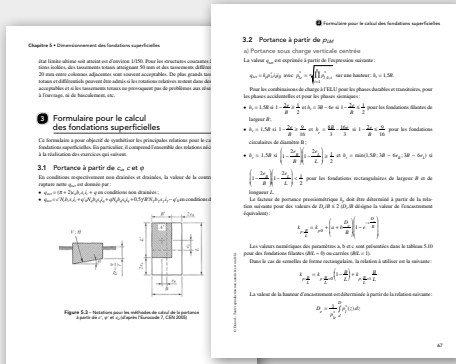
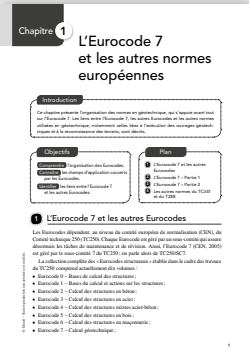
- un **rappel des définitions** clés
- des **schémas** pour maîtriser le cours
- des **exemples** et des **exercices** d'applications reliés au cours

3 En fin de chapitre

- Des **exercices** pour tester ses connaissances et s'entraîner
- Les **corrigés** des exercices

4 En fin d'ouvrage

- Un **index**



L'Eurocode 7 et les autres normes européennes

Introduction

Ce chapitre présente l'organisation des normes en géotechnique, qui s'appuie avant tout sur l'Eurocode 7. Les liens entre l'Eurocode 7, les autres Eurocodes et les autres normes utilisées en géotechnique, notamment celles liées à l'exécution des ouvrages géotechniques et à la reconnaissance des terrains, sont décrits.

Objectifs

- Comprendre** l'organisation des Eurocodes.
- Connaître** les champs d'application couverts par les Eurocodes.
- Identifier** les liens entre l'Eurocode 7 et les autres Eurocodes.

Plan

- 1 L'Eurocode 7 et les autres Eurocodes
- 2 L'Eurocode 7 – Partie 1
- 3 L'Eurocode 7 – Partie 2
- 4 Les autres normes du TC341 et du T288

1 L'Eurocode 7 et les autres Eurocodes

Les Eurocodes dépendent, au niveau du comité européen de normalisation (CEN), du Comité technique 250 (TC250). Chaque Eurocode est géré par un sous-comité qui assure désormais les tâches de maintenance et de révision. Ainsi, l'Eurocode 7 (CEN, 2005) est géré par le sous-comité 7 du TC250 ; on parle alors de TC250/SC7.

La collection complète des « Eurocodes structuraux » établie dans le cadre des travaux du TC250 comprend actuellement dix volumes :

- Eurocode 0 – Bases de calcul des structures ;
- Eurocode 1 – Bases du calcul et actions sur les structures ;
- Eurocode 2 – Calcul des structures en béton ;
- Eurocode 3 – Calcul des structures en acier ;
- Eurocode 4 – Calcul des structures mixtes acier-béton ;
- Eurocode 5 – Calcul des structures en bois ;
- Eurocode 6 – Calcul des structures en maçonnerie ;
- Eurocode 7 – Calcul géotechnique ;