

Calcul des ouvrages géotechniques selon l'Eurocode 7

Sébastien Burlon, Clément Desodt, Julien Habert, Philippe Reiffsteck

Calcul des ouvrages géotechniques selon l'Eurocode 7

DUNOD

Illustration de couverture : © Serjio74/iStockphoto.com

<p>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.</p> <p>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</p>		<p>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.</p> <p>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).</p>
--	--	--

© Dunod, 2017

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

ISBN 978-2-10-076103-6

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.

Préface

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 120

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 153

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 clés 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.

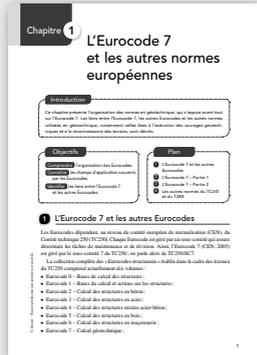
Cet ouvrage est aussi conçu comme un point d'étape dans la mise en place de l'Eurocode 7 en France à l'heure où les premières discussions pour la seconde génération des Eurocodes s'amorcent. Il permet, un peu plus de dix ans après la publication de l'Eurocode 7, de décrire réellement les méthodes de 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 :

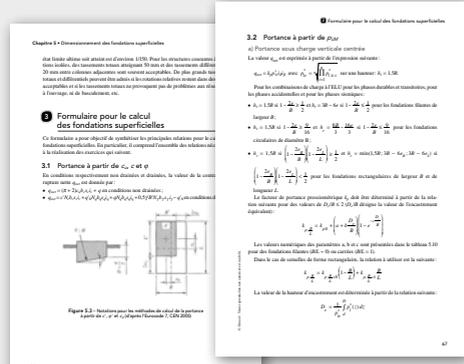
- une introduction aux sujets et aux problématiques abordés dans le chapitre
- un rappel des objectifs pédagogiques
- le plan du chapitre



2 Le cours

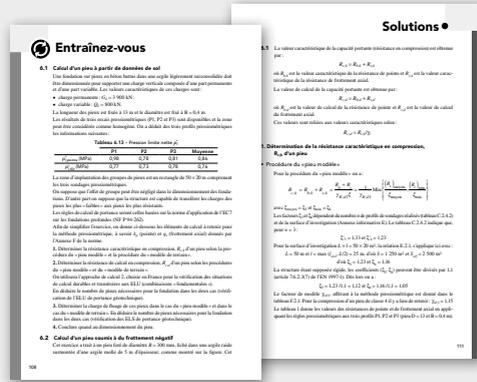
Le cours, concis et structuré, expose le programme. Il donne :

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



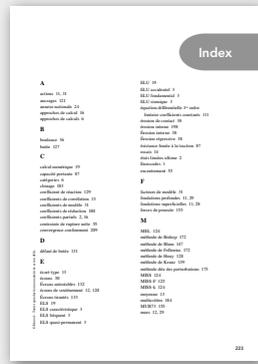
3 En fin de chapitre

- 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 ;

- Eurocode 8 – Résistance des structures aux séismes ;
- Eurocode 9 – Calcul des structures en aluminium.

D'autres Eurocodes sont en cours de préparation pour d'autres types de matériaux comme le verre ou les polymères renforcés de fibres.

Les Eurocode 0 et 1 définissent les principes généraux de la conception et du calcul des ouvrages qui doivent être repris et déclinés dans les autres Eurocodes. En particulier, sont définis les concepts d'états limites ultimes (ELU) et de service (ELS), la notion de situation de calcul, les principes de détermination des valeurs de calcul des charges et des propriétés des matériaux. Des éléments de langage communs à tous les Eurocodes sont mis en place.

Les autres Eurocodes sont en principe indépendants les uns des autres, sauf l'Eurocode 8, qui complète les Eurocodes 2 à 9 pour la justification des ouvrages en zone sismique. Différents problèmes d'interaction sol-structure font toutefois intervenir l'Eurocode 7 en même temps qu'un autre Eurocode et la compatibilité entre ces différents Eurocodes et l'Eurocode 7 a dû être assurée. Par exemple, pour le calcul de la capacité portante des fondations superficielles ou profondes, la descente de charge déterminée au moyen des Eurocodes structuraux est celle acceptée dans l'Eurocode 7.

L'Eurocode 7 assure le lien entre la pratique géotechnique et le calcul des structures selon le formalisme des Eurocodes définis plus en amont dans les Eurocodes 0 et 1 respectivement relatifs aux bases de calcul des structures et aux actions sur les structures. Il porte sur la justification et le dimensionnement des structures géotechniques : fondations superficielles, fondations profondes, écrans de soutènement et ancrage, murs de soutènement, sols renforcés (parois clouées, murs renforcés par des armatures métalliques ou des nappes de géosynthétiques, remblais, déblais, pentes, hydraulique des sols en lien avec les ouvrages). L'Eurocode 7 est avant tout un code de calcul d'interaction sol-structure pour les bâtiments et les ouvrages d'art et n'a pas vocation à résoudre tous les problèmes que l'ingénierie géotechnique est susceptible de rencontrer. En particulier, il ne traite pas des tunnels et des barrages, même si les ingénieurs de ces deux importants domaines s'inspirent de plus en plus du formalisme des Eurocodes pour justifier leurs structures. La mécanique des roches est aussi très peu traitée dans la version actuelle de l'Eurocode 7.

L'Eurocode 7 propose un schéma de justification des ouvrages géotechniques basé sur l'utilisation des coefficients partiels et la distinction entre des états limites de service (ELS) et des états limites ultimes (ELU). Les ELS sont relatifs à des exigences de fonctionnement de l'ouvrage tandis que les ELU protègent l'ouvrage d'instabilités ou de ruptures ne permettant plus son utilisation dans des conditions normales d'exploitation.

L'Eurocode 7 définit, pour ces états limites, les méthodes permettant de calculer les actions géotechniques (poussée, frottement négatif, etc.) ainsi que les résistances (portance, butée, etc.). Il ne fournit pas de modèles de calcul spécifiques à la justification de tel ou tel ouvrage géotechnique et laisse ce rôle à chaque pays qui, en fonction de sa géologie et de ses habitudes de dimensionnement, a développé des modèles de calcul spécifiques. Les seuls modèles de calculs disponibles sont présentés dans des annexes informatives.

Différentes combinaisons d'actions sont à considérer pour couvrir les justifications des ELS et des ELU :

- ELS quasi-permanent ;
- ELS fréquent ;
- ELS caractéristique ;
- ELU fondamental (situations durables et transitoires) ;
- ELU sismique ;
- ELU accidentel.

Seules les justifications aux ELU pour les situations durables et transitoires exigent l'utilisation de coefficients partiels sur les actions et sur les résistances. Deux types d'états limites sont en général systématiquement à considérer :

- STR pour les états limites de type structurel ;
- GEO pour les états limites de type géotechnique (rupture du terrain, excès de déformation dans le terrain, etc.).

La vérification de ces deux états limites permet de justifier l'interaction de la structure avec le terrain.

Deux états limites spécifiques à l'Eurocode 7 sont aussi à vérifier :

- HYD pour les ruptures par annulation des contraintes effectives, par érosion interne ou par érosion régressive ;
- UPL pour le soulèvement hydraulique (en général dû à la poussée d'Archimède).

Il est à noter que l'état limite de défaut d'équilibre (EQU) n'est pas clairement défini dans les Eurocodes 0 et 7 si bien que sa vérification peut être mise en œuvre de manière assez différente selon les pays. En France, il correspond à des mécanismes d'instabilités ne mettant pas en jeu la résistance du sol et se traduit par un équilibre des actions s'appliquant sur l'ouvrage (par exemple, l'état limite EQU peut être utilisé pour vérifier la rotation d'une semelle superficielle sur un terrain rocheux).

La notion de classes de conséquence (CC) a été reprise par l'Eurocode 7 sans toutefois imposer un classement des structures et un traitement particulier. En France, ce point de vue a été conservé mais il est important de noter que certains pays modifient les valeurs des coefficients partiels utilisés pour les justifications à l'ELU pour les situations durables et transitoires. La pratique française est de modifier la période de retour des actions quand la structure à dimensionner présente des enjeux particuliers. C'est le cas, par exemple, pour un barrage, une centrale nucléaire, etc. même s'il faut noter que ces ouvrages ne sont pas explicitement couverts par le champ de l'Eurocode 7 et des autres Eurocodes.

L'Eurocode 7 comprend deux parties :

- une partie 1 en rapport avec les règles générales, elle définit les bases du calcul géotechnique selon les Eurocodes ainsi que les principes de justification des différents ouvrages géotechniques ;
- une partie 2 relative à la reconnaissance des terrains et aux essais géotechniques qui définit les différentes étapes du déroulement d'une étude géotechnique. Cette partie correspond à la fusion de deux anciennes parties indépendantes : l'une traitant des essais géotechniques *in situ* et l'autre des essais de laboratoire.

2 L'Eurocode 7 – Partie 1

L'Eurocode 7 – Partie 1 est un document qui ne donne que les principes de calcul des ouvrages géotechniques pour l'approche aux états limites. Il est décomposé en sections et en annexes (tableau 1.1).

L'annexe A est la seule annexe normative et est donc obligatoire lorsque l'Eurocode 7 – Partie 1 est utilisé. Elle comprend les facteurs partiels à appliquer pour justifier le dimensionnement d'un ouvrage géotechnique à l'état limite ultime pour les situations durables et transitoires et les facteurs de corrélation à utiliser pour le calcul des fondations profondes à la fois en compression et en traction. Pour ces deux types de facteurs, les valeurs numériques indiquées ne sont données qu'à titre de recommandation. Les valeurs exactes doivent être précisées par chaque pays au moyen d'une annexe nationale et d'autres documents (c'est le cas en France avec les normes d'application nationale de l'Eurocode 7).

Les autres annexes sont informatives et leur application relève du choix de chaque pays membre du CEN. De la même manière, toutes les clauses d'un Eurocode ne sont pas considérées sur le même plan. Certaines clauses précédées d'un (P) valent pour principe tandis que les autres valent pour recommandation.

Tableau 1.1 – Présentation des sections et des annexes de l'Eurocode 7-1

Section	Titre
1	Généralités
2	Bases du calcul géotechnique
3	Données géotechniques
4	Surveillance de l'exécution des travaux, suivi et entretien
5	Remblais, rabattement de nappe, amélioration et renforcement des terrains
6	Fondations superficielles
7	Fondations sur pieux
8	Ancrages
9	Ouvrages de soutènement
10	Rupture d'origine hydraulique
11	Stabilité générale
12	Remblais

Annexe	Titre
A	Facteurs partiels et de corrélation pour les états limites ultimes et valeurs recommandées
B	Commentaires sur les facteurs partiels des approches de calcul 1, 2 et 3
C	Exemples de procédures pour déterminer les valeurs limites de la pression des terres sur les murs verticaux
D	Exemple de méthode analytique de calcul de la capacité portante
E	Exemple de méthode semi-empirique pour l'estimation de la capacité portante
F	Exemple de méthodes d'évaluation du tassement
G	Exemples de méthode de détermination de la pression de contact présumée des fondations superficielles sur rocher
H	Valeurs limites des déformations des structures et des mouvements des fondations
I	Aide-mémoire pour la surveillance des travaux et le suivi du comportement des ouvrages

Sans rentrer en détail dans la présentation de certains points clés de l'Eurocode 7 qui sont l'objet du chapitre 2 de cet ouvrage, il est néanmoins important de présenter certains aspects essentiels pour son application.

Une large gamme de méthodes est proposée par l'Eurocode 7 – Partie 1 pour justifier un ouvrage géotechnique. Hormis le calcul qui est bien entendu autorisé, d'autres méthodes peuvent être employées (Clause 2.1(4)) :

- l'adoption de mesures prescriptives ou forfaitaires ;
- des modèles expérimentaux ou des essais de chargement ;
- une méthode observationnelle.

Les mesures forfaitaires sont utilisées, lorsque les modèles de calcul qui peuvent être utilisés ne représentent pas bien le comportement de l'ouvrage ou lorsqu'ils n'existent pas, ne sont pas nécessaires ou ne sont pas appropriées (mise hors gel, par exemple). Elles peuvent être utilisées dans le cas où des ouvrages similaires ont été construits dans des conditions géotechniques proches.

Les modèles expérimentaux sur des ouvrages de taille réelle ou non fournissent des éléments de justification complémentaires souvent très intéressants. Ils doivent toutefois tenir compte des effets d'échelle, des effets du temps et des différences de terrain entre le modèle et la réalité. On peut considérer, pour ce type de méthodes, les essais de chargement de pieux ou de semelles en vraie grandeur, les essais en centrifugeuse, etc.

La méthode observationnelle permet d'adapter le dimensionnement d'un ouvrage en fonction des mesures qui sont réalisées lors de l'avancement du chantier. Il est dommageable que cette méthode de dimensionnement des ouvrages ne soit pas plus mise en avant car elle permettrait des optimisations conséquentes des ouvrages géotechniques.

L'Eurocode 7 définit différentes catégories géotechniques de 1 à 3 en fonction de la complexité de l'ouvrage à dimensionner et des conditions de terrains. La catégorie 1 regroupe les ouvrages simples pour lesquels le dimensionnement peut être réalisé en se référant à des expériences comparables et pour lesquels le risque est négligeable. Les fondations des maisons individuelles et les murs de soutènement de faible hauteur peuvent, par exemple, être classés dans cette catégorie. La catégorie géotechnique 2 comprend les ouvrages géotechniques classiques sans risque exceptionnel. La catégorie géotechnique 3 rassemble les ouvrages qui ne peuvent être classés ni en catégorie 1 ni en catégorie 2. On peut ranger dans cette catégorie les fondations d'ouvrages exceptionnels comme les tours de grande hauteur, les ouvrages produisant de l'énergie, etc.

Les états limites ultimes (ELU) que couvre l'Eurocode 7 sont de quatre types :

- STR/GEO : il s'agit d'examiner comment un défaut de résistance du terrain peut affecter la structure portée ;
- UPL : les mécanismes de rupture correspondent à des soulèvements où l'effort ascendant peut être induit par des pressions interstitielles ou des actions structurelles.
- HYD : les mécanismes de rupture examinés correspondent à des phénomènes d'annulation des contraintes effectives, de renard hydraulique, de boulangerie ou d'érosion régressive.

À nouveau, on peut mentionner l'état limite ultime de type EQU bien qu'il ne soit pas traité de manière spécifique pour l'application de l'Eurocode 7 en France.

Concernant l'ELU de type UPL, l'Eurocode 7 est assez flou puisqu'il inclut dans ce type de mécanisme à la fois les soulèvements induits par des pressions interstitielles et ceux induits par des actions structurelles. Pour ces dernières, dans le cas de structures ancrées par des pieux ou des tirants, l'ELU de type UPL n'est pas en général à traiter puisqu'il est *a priori* géré et couvert par les ELU de type STR/GEO. Les effets ascendants induits par des pressions interstitielles doivent aussi être gérés en toute rigueur selon les ELU de type STR/GEO. Toutefois, dans ce dernier cas, compte tenu des valeurs des coefficients partiels, des écarts non négligeables avec les pratiques usuelles apparaissent.

Pour les ELU STR/GEO dans les situations durables et transitoires uniquement apparaît la notion des approches de calculs, c'est-à-dire la manière dont les coefficients partiels sont appliqués aux actions (A), aux propriétés de résistance des sols (M) et aux résistances globales (R) (portance, butée, résistance au glissement, etc.).

L'Eurocode 7 définit trois approches de calculs qui seront complètement détaillées dans le chapitre 2 :

- l'approche de calcul 1 qui comprend deux combinaisons : la combinaison 1 dite structurelle consiste à associer les coefficients partiels des ensembles A1, M1 et R1 tandis que la combinaison 2 dite géotechnique consiste à associer les coefficients partiels des ensembles A1 ou A2, M2 et R1 ou R4 ;
- l'approche de calcul 2 qui associe les coefficients partiels des ensembles A1, M1 et R2 ;
- l'approche de calcul 3 qui associe les coefficients partiels des ensembles A1 ou A2, M2 et R3.

Pour l'approche de calcul 3 et la combinaison 2 de l'approche de calcul 1, l'ensemble A1 s'applique aux actions structurelles tandis que l'ensemble A2 s'applique aux actions géotechniques c'est-à-dire les actions qui sont transmises par le terrain aux structures (poussée des terres, surcharge sur un terre-plein soutenu par un écran, etc.). L'ensemble R4 concerne uniquement le calcul des pieux.

Pour l'approche de calcul 2, les coefficients partiels sont appliqués aux actions mais peuvent aussi être appliqués aux effets des actions. Dans ce cas, on parle de l'approche de calcul 2.

3 L'Eurocode 7 – Partie 2

La partie 2 de l'Eurocode 7 est divisée en six sections et 24 annexes (tableau 1.2).

C'est un document décrivant les bonnes pratiques de la géotechnique : l'analyse préalable de l'ouvrage à construire, la définition des risques encourus, la détermination du type ainsi que du nombre d'essais sur site et en laboratoire en fonction de ces risques et de l'avancement de l'étude. Il inclut la description de nombreux essais en place et en laboratoire, de nombreuses corrélations entre les paramètres et quelques méthodes de calcul en annexes. Le contenu et les objectifs du rapport géotechnique sont définis de manière précise. Il est à noter que la définition d'un contenu minimal des investigations géotechniques n'est pas explicitement exposée. Il s'ensuit qu'il n'existe pas de références normatives pour définir un volume minimal de reconnaissances géotechniques. C'est le géotechnicien qui reste en charge du volume de reconnaissances et d'essais à réaliser en fonction de la connaissance préalable du site et de l'importance de l'ouvrage à réaliser.

Il est intéressant de constater que l'organisation des études définie par l'Eurocode 7 – Partie 2 traduit une idée de progression des études au cours de l'avancement d'un projet avec un objectif de traitement et d'analyse des risques du plus important vers le plus faible. Cette idée correspond bien avec l'enchaînement des missions géotechniques décrit par la norme NF P 94-500.

4 Les autres normes du TC341 et du T288

Les comités techniques TC 341 et TC 288 du CEN ont la charge d'élaborer les normes respectivement en rapport avec la reconnaissance des terrains et les essais géotechniques d'une part et l'exécution des travaux géotechniques spéciaux d'autre part. La création du TC 341 est d'ailleurs issue d'une demande du TC 250/SC7.

Les normes élaborées dans le cadre du TC341 présentées dans le Tableau 1.3. Ces normes couvrent un très large domaine d'application et ont une forte interaction avec l'Eurocode 7 (à la fois les parties 1 et 2). Elles ont pour objectif de fournir les valeurs des propriétés géotechniques des terrains nécessaires aux calculs. À noter que l'organisation