

Développement de l'Eurocode 7 « calcul géotechnique »

R. FRANK

CERMES (ENPC-LCPC)
6 et 8, avenue Blaise-Pascal
Cité Descartes
Champs-sur-Marne
77455 Marne-la-Vallée
Cedex 2
frank@cermes.enpc.fr

Résumé

L'Eurocode 7 sur le calcul géotechnique est constitué de deux parties : les règles générales (partie 1) et la reconnaissance des terrains et les essais géotechniques (partie 2). Les normes expérimentales européennes (ENV) correspondantes sont parues dans les années 90. Leur conversion en normes européennes à part entière (EN) est maintenant pratiquement terminée. La partie 1 a été ratifiée et publiée en novembre 2004. En ce qui concerne la partie 2, il est prévu que le texte final soit disponible au début de 2006. Après une note historique et le rappel des échéances prévues, la présente communication donne le contenu, ainsi que les aspects principaux des deux normes. On décrit certains aspects d'intérêt particulier (valeurs caractéristiques, valeurs dérivées, vérifications des états limites ultimes pour les situations de projet durables et transitoires). Enfin, la liaison avec les travaux d'autres comités techniques Européens et internationaux dans le domaine géotechnique est résumée.

Mots-clés : Eurocode, calcul géotechnique, norme, fondations, soutènements, états limites, facteurs partiels.

Development of Eurocode 7 « geotechnical design »

Abstract

Eurocode 7 on Geotechnical design consists of two Parts : General rules (Part 1) and Ground investigation and testing (Part 2). The corresponding pre-standards ENVs were published in the 1990s. Their conversion into full European Norms (ENs) is now nearly completed. Part 1 has been ratified and published in November 2004. The final draft for Part 2 is expected early 2006. After a historical note and a list of the forthcoming deadlines, the main features and contents of the two standards are given. Some aspects of particular interest are described (characteristic values, derived values, ULS verifications in persistent and transient design situations). Liaisons with other European and international committees are summarised at the end.

Key words : Eurocode, geotechnical design, standard, norm, foundations, retaining structures, limit states, partial factors.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} mars 2006.

Introduction

Le système des normes « Eurocodes structureaux » est divisé en 10 Eurocodes (EN veut dire *European Norm*) :

EN 1990 Eurocode : 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 structures 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

Les Eurocodes structureaux sont des codes de calcul pour les bâtiments et les ouvrages de génie civil. Ils sont basés sur le calcul aux états limites utilisé avec la méthode des facteurs partiels.

A part l'EN 1990, tous les Eurocodes sont subdivisés en plusieurs parties.

Les Eurocodes 2, 3, 4, 5, 6 et 9 sont les Eurocodes de « matériaux », c'est-à-dire qu'ils s'adressent à un matériau donné. L'EN 1990 (Bases du calcul), l'Eurocode 1 (Actions), l'Eurocode 7 (Calcul géotechnique) et l'Eurocode 8 (Résistance aux séismes) s'adressent à toutes les constructions, quel que soit le matériau utilisé.

L'Eurocode 7 sur le calcul géotechnique comportait, à l'origine, trois parties. Ainsi, trois normes expérimentales (pré-normes ENV) furent publiées :

ENV 1997-1 – Partie 1 : Règles générales (1994; version française en 1996).

ENV 1997-2 – Partie 2 : Calcul sur la base d'essais en laboratoire (1999).

ENV 1997-3 – Partie 3 : Calcul sur la base d'essais en place (1999).

Les parties 2 et 3 sont maintenant regroupées en un seul document (pour la conversion en EN) qui s'intitule « Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais géotechniques ».

Cette communication résume les principaux aspects de l'Eurocode 7, sans rappeler les principes du calcul aux états limites et des facteurs partiels utilisés.

Dans la période récente, le développement de l'Eurocode 7 a été très étroitement lié à celui de l'EN 1990 : « Eurocode: Bases du calcul des structures », afin de parvenir à un traitement de l'interaction sol-structure acceptable par tous. Il faut mentionner, à cet égard, que l'EN 1990 a été ratifié en 2002 et publié par l'AFNOR en 2003 (CEN 2002).

Historique de l'Eurocode 7 et échéances prévues

Aperçu historique

Le premier groupe Eurocode 7, en charge de rédiger une norme européenne sur le calcul géotechnique, fut créé en 1981. Sous la Présidence de N. Krebs Ovesen (Danemark), il était composé de représentants des Comités nationaux de mécanique des sols et de géotechnique des pays membres de la Communauté Européenne. En 1981, la Communauté comprenait 10 pays : Allemagne, Belgique, Danemark, France, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas et Royaume-Uni. L'Espagne et le Portugal qui rejoignirent en 1986, l'Autriche, la Finlande et la Suède en 1995 et Chypre, l'Estonie, la Hongrie, la Lettonie, la Lituanie, Malte, la Pologne, la Slovaquie, la Slovénie et la République Tchèque en 2004, furent (ou seront) graduellement associés aux travaux d'élaboration et de mise en œuvre de l'Eurocode 7.

En 1987, un premier code modèle sur les règles générales pour le calcul géotechnique (correspondant à l'Eurocode 7 – Partie 1) fut publié (EC 7, 1990).

En 1989, la tâche d'établir des codes pour le calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil fut transférée au CEN (Comité européen de normalisation) et le CEN/TC 250 (Comité technique 250) en charge de tous les Eurocodes fut créé. En particulier, le sous-comité 7 (SC7), est chargé de l'Eurocode 7.

Depuis janvier 2004, 28 organismes nationaux de normalisation sont membres à part entière du CEN : les organismes des 25 pays membres de l'UE et de 3 pays membres de l'AELE (l'Islande, la Norvège et la Suisse). Les organismes des autres pays d'Europe centrale et orientale sont membres « affiliés ».

N. Krebs Ovesen fut le premier Président du CEN/TC 250/SC 7 jusqu'en 1998. L'auteur fut le président du SC 7 de 1998 à 2004. Le président actuel est B. Schuppener (Allemagne).

En 1993, le SC 7 adopta la pré-norme ENV 1997-1 : « Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales », préparée par le PT1 (*Project Team* équipe de projet n° 1). Le PT 1 était composé de N. Krebs Ovesen (animateur, Danemark), T. Orr (secrétaire, Irlande), F. Baguelin (France), W. Heijnen (Pays-Bas), E. Maranha das Neves (Portugal), B. Simpson (R.-U.) et U. Smolczyk (Allemagne). L'ENV 1997-1 fut officiellement publié en anglais en 1994 (CEN, 1994). Les versions allemande et française, les deux autres langues pour les publications du CEN, apparurent en 1995-1996.

Il était clair à cette époque que (beaucoup) de travail était encore nécessaire avant d'atteindre une norme européenne à part entière (EN) acceptable par tous les pays membres du CEN. Le WG1 (*Work Group* groupe de travail n° 1, avec 19 pays impliqués) commença le travail en janvier 1997, légèrement avant que le vote formel positif pour la conversion en EN soit obtenu (mai 1997).

Un autre élément important aida à obtenir un vote positif. Ce fut la reconnaissance par le CEN/TC 250 que le calcul géotechnique est un cas particulier qui ne peut

pas être comparé aux autres pratiques de calcul nécessaires à l'industrie de la construction. Les méthodes couramment utilisées varient d'un pays à l'autre et ne peuvent pas être harmonisées facilement, simplement parce que les géologies sont différentes et ont créé, fort logiquement, des traditions de calcul géotechnique différentes... Cette reconnaissance fut confirmée par la résolution adoptée par le TC 250 (Résolution N 87, réunion de Paris, 6 septembre 1996) : « Le CEN/TC 250 accepte le principe que l'EN 1997-1 puisse être consacré exclusivement aux règles fondamentales du calcul géotechnique et soit complété par des normes nationales ».

Le travail pour la conversion de l'ENV 1997-1 en l'EN 1997-1 « Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales » est maintenant terminé. L'élaboration du nouveau document fut la tâche du PT 1, composé de U. Smolczyk (animateur, Allemagne), C. Bauduin (Belgique), G. Bosco (Italie), R. Driscoll (R.-U.), ainsi que de R. Frank et B. Schuppener (respectivement président et vice-président du SC 7 à l'époque). Le vote sur le document dans les trois langues du CEN (allemand, anglais et français) se déroula en 2004 et le document fut promulgué et publié par le CEN en novembre 2004 (CEN 2004a).

L'Eurocode 7 comportait à l'origine deux autres parties : la partie 2, dédiée au calcul géotechnique sur la base des essais en laboratoire et la partie 3, dédiée au calcul géotechnique sur la base des essais en place (*in situ*). Les PT 2 et PT 3 rédigèrent les ENV correspondantes (ENV 1997-2 et 1997-3) qui furent adoptées par le SC 7 en 1997. Ce travail fut accompli assez rapidement (1994 à 1996) et ne rencontra pas de sujet sérieux de controverse.

Ces pré-normes furent publiées en anglais en 1999 (CEN 1999a, 1999b) et en allemand et en français en 2000-2001. En 2001, les membres du CEN votèrent positivement pour leur conversion en EN. Les deux PT (SC 7/PT 2 et PT 3) en charge de la conversion commencèrent leur travail en 2002. L'animateur des deux PT est N. Foged (Danemark). Ils procédèrent à la fusion des deux documents et les premières versions pour l'EN 1997-2 : « Calcul géotechnique – Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais géotechniques » parurent en 2002 et 2003. La version finale est en cours de mise au point (CEN 2004b).

2.2

Échéances à venir

En ce qui concerne la partie 2 (EN 1997-2, Calcul géotechnique – Reconnaissance des terrains et essais géotechniques), la version « finale » en anglais est prévue courant 2005. Les versions prêtes à aller au vote (en anglais, français et allemand) pourraient alors être disponibles fin 2005.

Les organismes nationaux de normalisation ont deux années, après publication et mise à disposition par le CEN, pour publier l'EN avec son Annexe nationale (dans la(les) langue(s) officielle(s) du pays). Ceci couvre non seulement le temps nécessaire pour la traduction (dans le cas des pays utilisant d'autres langues que l'anglais, l'allemand et le français), mais aussi ce que l'on appelle la « période d'étalonnage nationale » (pour fixer les paramètres à déterminer nationalement, pour adapter les dispositions nationales afin d'utiliser la partie d'Eurocode, etc.).

Alors commencera ce que l'on appelle la « période de coexistence » (avec les autres normes nationales). La durée de cette période est actuellement fixée à trois années maximum. En tout état de cause, pour un Eurocode donné, ou une partie d'Eurocode, la date de retrait de la (des) norme(s) nationale(s) couvrant le même sujet dépendra, en particulier, de l'état d'avancement des autres Eurocodes (ou parties d'Eurocodes) nécessaires pour calculer entièrement une structure selon la nouvelle approche des Eurocodes. Ainsi, on a défini des « paquets », c'est-à-dire des ensembles de différents Eurocodes (ou parties d'Eurocodes) et, en principe, ce n'est que quand un paquet est prêt en entier que l'on pourra retirer les normes nationales correspondantes. Il est actuellement prévu que les premiers paquets, incluant l'Eurocode 7 – Partie 1, soient ceux qui concernent les bâtiments en béton (Eurocode 2, paquet 2/1) et les bâtiments en acier (Eurocode 3, paquet 3/1).

Le statut « légal » des normes varie d'un pays à l'autre et il est évident que les autorités en charge de la réglementation dans chaque pays ont un rôle important à jouer pour imposer les Eurocodes. Ceci explique qu'un groupe de correspondants nationaux d'Eurocodes (ENC = *Eurocode National Correspondents*) ait été créé en 1999 par la Commission européenne. Ce groupe travaille en étroite coopération avec le CEN/TC 250. Il a rédigé un *Guidance Paper* pour coordonner la mise en œuvre des Eurocodes dans les règlements nationaux (Document Guide, CE 2003a). Par ailleurs, la Commission européenne a émis une recommandation forte aux pays membres les incitant à adopter les Eurocodes dans les réglementations nationales (CE 2003b).

3

Contenu des documents

3.1

Partie 1 : Règles générales

L'Eurocode 7 – Partie 1 est un document assez général qui ne donne que les principes du calcul géotechnique pour l'approche aux états limites. Ces principes concernent le calcul des actions géotechniques sur les structures (bâtiments et ouvrages de génie civil) et le calcul des éléments structuraux eux-mêmes en contact avec les sols (semelles, pieux, murs de soutènement, etc.). Des règles ou modèles précis de calcul, c'est-à-dire des formules précises ou des abaques, ne sont données que dans des annexes informatives. Comme déjà indiqué, la raison principale est que les méthodes de calcul en géotechnique diffèrent d'un pays à l'autre et qu'il n'était pas possible d'arriver à un consensus, surtout si beaucoup de ces méthodes ont encore besoin d'être étalonnées et adaptées au format des états limites...

Les discussions menées sous les auspices du TC 250/Sous-comité 7 pour la conversion de l'ENV 1997-1 en EN se sont surtout concentrées sur :

- la définition des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques ;
- les combinaisons de charges pour vérifier les états limites ultimes en situations de projet durables et transitoires, c'est-à-dire les anciens cas A, B et C de l'ENV 1997-1 ;

– le traitement séparé des remblais et des pentes et l'insertion d'une section qui comprend l'ensemble des clauses sur la stabilité générale ;

– de nouvelles sections sur les ancrages et la rupture d'origine hydraulique, respectivement ;

– les préoccupations des pays du sud de l'Europe.

L'Eurocode 7 – Partie 1 comprend les sections suivantes (CEN 2004a):

Section 1 : Généralités

Section 2 : Bases du calcul géotechnique

Section 3 : Données géotechniques

Section 4 : Surveillance de l'exécution des travaux, suivi et entretien

Section 5 : Remblais, rabattement de nappe, amélioration et renforcement des terrains

Section 6 : Fondation superficielles

Section 7 : Fondations sur pieux

Section 8 : Ancrages

Section 9 : Ouvrages de soutènement

Section 10 : Rupture d'origine hydraulique

Section 11 : Stabilité générale

Section 12 : Remblais

Les sections 8 sur les ancrages, 10 sur la rupture d'origine hydraulique et 11 sur la stabilité générale sont nouvelles par rapport à la norme expérimentale de 1994 (ENV 1997-1).

Le document comporte également un certain nombre d'annexes, qui sont toutes informatives, sauf l'annexe A qui est normative (c'est-à-dire de caractère obligatoire). L'annexe A est importante car elle comporte l'ensemble des facteurs partiels (de sécurité) à appliquer pour la vérification des états limites ultimes en situations de projet durables et transitoires (combinaisons fondamentales), ainsi que les facteurs de corrélation pour déterminer les valeurs caractéristiques de la capacité portante des pieux. En revanche, les valeurs numériques de ces facteurs ne sont données qu'à titre de recommandation. Les valeurs exactes de ces facteurs seront fixées au niveau national par ce que l'on appelle l'Annexe nationale. Les autres annexes sont informatives (c'est-à-dire non obligatoires au sens normatif). Cependant, certaines d'entre elles contiennent des éléments intéressants qui pourraient être acceptés, dans un proche avenir, par la plupart des pays. La liste des annexes de l'EN 1997-1 est la suivante :

Annexe A (normative) : Facteurs partiels et de corrélation pour les états limites ultimes et valeurs recommandées.

Annexe B : Commentaires sur les facteurs partiels des approches 1, 2 et 3.

Annexe C : Exemples de procédures pour déterminer les valeurs limites de la pression des terres sur les murs verticaux.

Annexe D : Exemple de méthode analytique de calcul de la capacité portante.

Annexe E : Exemple de méthode semi-empirique pour l'estimation de la capacité portante.

Annexe F : Exemples de méthodes d'évaluation du tassement.

Annexe G : Exemple de méthode de détermination de la pression de contact présumée des fondations superficielles sur rocher.

Annexe H : Valeurs limites des déformations des structures et des mouvements des fondations.

Annexe J : Aide-mémoire pour la surveillance des travaux et le suivi du comportement des ouvrages.

L'Annexe nationale pourra rendre « normative(s) » une ou plusieurs des annexes « informatives », c'est-à-dire qu'elle pourra lui (leur) donner un caractère obligatoire dans le pays concerné.

3.2

Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais géotechniques

Le rôle de cette partie de l'Eurocode 7, dédiée aux essais en laboratoire et en place, est de donner les exigences essentielles pour les appareillages et les procédures d'essais, pour la présentation des résultats, pour leur interprétation, ainsi que pour la dérivation des paramètres géotechniques pour le calcul. Elle est un complément aux exigences de la partie 1, permettant d'assurer une conception géotechnique sûre et économique.

Elle fait le lien entre les exigences de la partie 1, en particulier la Section 3 « Données géotechniques » et les résultats d'un certain nombre d'essais en laboratoire et en place.

Elle ne couvre pas la normalisation des essais géotechniques eux-mêmes. Un nouveau Comité technique (le TC 341) sur la reconnaissance et les essais géotechniques a précisément été créé par le CEN, afin d'établir les normes d'essais correspondantes. A cet égard, le rôle de la partie 2 de l'Eurocode 7 est « d'utiliser » et de se référer aux normes d'essais détaillées couvertes par le TC 341.

La version finale pour l'EN 1997-2, en cours de mise au point finale, comporte les sections suivantes (CEN 2004b) :

Section 1 : Généralités

Section 2 : Planification des reconnaissances de sites

Section 3 : Échantillonnage des sols et des roches et mesures hydrauliques

Section 4 : Essais en place dans les sols et les roches

Section 5 : Essais en laboratoire sur les sols et les roches

Section 6 : Rapport de reconnaissance des terrains

La section sur les essais en place dans les sols et dans les roches comprend :

– les essais de pénétration statique CPT (U) ;

– les essais pressiométriques PMT ;

– les essais dilatométriques dans les roches RDT ;

– les essais de pénétration standard SPT ;

– les essais de pénétration dynamique DP ;

– les essais de pénétration par charge WST ;

– les essais au scissomètre de chantier FVT ;

– les essais au dilatomètre plat DMT ;

– les essais de chargement à la plaque PLT.

La section consacrée aux essais en laboratoire sur les sols et les roches inclut :

– la préparation des échantillons ;

– la classification, l'identification et la description des sols ;

– les essais chimiques (sols et eau) ;

- les essais d'indice de résistance des sols ;
- les essais de résistance des sols ;
- les essais de compressibilité et de déformation des sols ;
- les essais de compactage des sols ;
- les essais de perméabilité des sols ;
- les essais de classification des roches ;
- les essais de gonflement des matériaux rocheux ;
- les essais de résistance des matériaux rocheux.

La manière d'établir et d'utiliser ce que l'on appelle les « valeurs dérivées » à partir des résultats d'essais est également abordée (voir § 4.3 ci-après). Le but des clauses est de donner des indications sur l'utilisation des exemples de modèles de calcul figurant dans les annexes de la partie 1. Ainsi, la partie 2 comprend un certain nombre d'annexes informatives avec des exemples précis de paramètres et de coefficients géotechniques utilisés couramment dans le calcul.

Comme dans le cas de la partie 1, les modèles de dérivation ou de calcul ne sont donnés qu'à titre d'exemples, mais il y a aussi un assez large accord pour leur utilisation future en Europe. Quoi qu'il en soit, ils donnent une image claire des approches qui existent sur le continent pour utiliser les résultats d'essais dans le calcul des structures géotechniques.

4

Quelques aspects de l'Eurocode 7

4.1

Formats de vérification

Les discussions sur les vérifications de la conception géotechnique se concentrent généralement sur les approches utilisant des calculs. Cependant, il faut noter que les calculs ne sont pas le seul moyen pour vérifier que les exigences fondamentales sont satisfaites.

L'Eurocode 7 – Partie 1 offre, en fait, plusieurs possibilités (clause 2.1 *in* EN 1997-1) :

- « 4) Il convient de vérifier les états limites par l'un ou par une combinaison des moyens suivants :
 - l'utilisation de calculs [...] ;
 - l'adoption de mesures prescriptives [...] ;
 - des modèles expérimentaux ou des essais de chargement [...] et
 - une méthode observationnelle [...]. »

Dans le système des Eurocodes, comme indiqué ci-dessus, la méthode de calcul prescrite est l'approche aux états limites utilisée avec la méthode des facteurs partiels. Les problèmes rencontrés dans les projets de géotechnique sont souvent dus à des raisons qui ne sont pas liées aux calculs ou à la conception. En ce qui concerne la pratique géotechnique, l'Eurocode 7 – Partie 1 mentionne également que (clause 2.4.1 *in* EN 1997-1) :

« 2) Il convient de considérer que la connaissance des conditions de terrain dépend de l'importance et de la qualité des reconnaissances géotechniques. Cette connaissance et le contrôle de la qualité de la réalisation des travaux sont plus importants pour satisfaire les exigences fondamentales que la précision des modèles de calcul et des facteurs partiels. »

4.2

Valeurs caractéristiques

La « philosophie » actuelle, en ce qui concerne la définition des valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques, est contenue dans les paragraphes suivants de l'Eurocode 7 – Partie 1 (clause 2.4.5.2 *in* EN 1997-1) :

« 2) La valeur caractéristique d'un paramètre géotechnique doit être une estimation prudente de la valeur qui influence l'occurrence de l'état limite. »

« 7) [...] la valeur qui gouverne l'état limite est souvent la valeur moyenne d'un intervalle de valeurs couvrant une grande surface ou un grand volume de terrain. Il est recommandé que la valeur caractéristique soit une estimation prudente de cette valeur moyenne. »

Les méthodes statistiques ne sont mentionnées que comme une possibilité :

« 10) Si l'on utilise des méthodes statistiques [...], il convient que ces méthodes fassent la différence entre l'échantillonnage local et l'échantillonnage régional [...]. »

« 11) Si l'on utilise des méthodes statistiques, il convient que la valeur caractéristique soit déterminée de façon à ce que la probabilité calculée d'une valeur plus défavorable qui gouverne l'occurrence de l'état limite étudié ne dépasse pas 5 %.

Note : De ce point de vue, une estimation prudente de la valeur moyenne consiste à choisir la valeur moyenne d'un ensemble limité de valeurs du paramètre géotechnique avec un niveau de confiance de 95 % ; par rapport à une rupture locale, une estimation prudente de la valeur la plus faible est un fractile à 5 %.

Ceci provient du sentiment général, dans beaucoup de pays, que la valeur caractéristique d'un paramètre géotechnique ne peut pas être fondamentalement différente de la valeur qui est utilisée traditionnellement dans la plupart des projets (et qui l'est toujours). En effet, pour la majorité des projets, la reconnaissance géotechnique est telle qu'aucun traitement statistique sérieux des données ne peut être exécuté. Les méthodes statistiques sont, évidemment, utiles pour les très grands projets pour lesquels la quantité des données le justifie.

4.3

Valeurs dérivées

Beaucoup d'essais géotechniques, en particulier les essais en place, ne permettent pas de déterminer directement des paramètres ou des coefficients géotechniques de base, par exemple des paramètres de résistance et de déformation. A défaut, des valeurs de ces paramètres et coefficients doivent être dérivées en utilisant des relations théoriques ou des corrélations empiriques.

Le concept de valeurs dérivées avait été introduit dans l'ENV 1997-3 (CEN 1999b), de manière à donner un statut aux corrélations et aux méthodes couramment utilisées pour obtenir, tant à partir des résultats d'essais en place qu'à partir des résultats d'essais en

laboratoire, des paramètres géotechniques et des coefficients qui entrent directement dans le calcul. On vise principalement leur utilisation dans le calcul des pieux et des fondations superficielles tel qu'il est élaboré dans les annexes D, E, F et G de l'Eurocode 7 – Partie 1.

Les valeurs dérivées sont définies dans l'Eurocode 7 – Partie 2 (CEN 2004b) de la manière suivante :

« Les valeurs dérivées de paramètres ou coefficients géotechniques sont obtenues à partir des résultats d'essais, par théorie, corrélation ou empirisme. »

En ce qui concerne les résultats d'essais en place, le paramètre géotechnique obtenu est soit une donnée à entrer dans un modèle analytique (ou indirecte), soit un coefficient à utiliser dans une méthode semi-empirique (ou directe) de calcul d'une fondation.

Les valeurs dérivées d'un paramètre géotechnique servent alors comme données pour estimer la valeur caractéristique de ce paramètre au sens de l'Eurocode 7 – Partie 1 (clause 2.4.5.2 de l'EN 1997-1) et, ensuite, sa valeur de calcul en appliquant le facteur partiel de sécurité (facteur sur la propriété du matériau).

4.4

Vérifications aux ELU en situations de projet durables et transitoires

Les états limites ultimes (ELU) qu'il convient de vérifier sont définis de la manière suivante dans l'Eurocode 7 – Partie 1, en cohérence avec l'Eurocode: Bases du calcul des structures (CEN 2002) (clause 2.4.7.1 in EN 1997-1):

« 1) Il est nécessaire de vérifier que les états limites suivants ne sont pas dépassés, lorsqu'ils sont pertinents :

– perte d'équilibre de la structure ou du terrain, considéré comme un corps solide dans lequel les résistances des matériaux (de la structure ou du terrain) n'apportent pas de contribution significative à la résistance (EQU) ;

– rupture interne ou déformation excessive de la structure ou d'éléments de structure, tels que les semelles, les pieux ou les murs de sous-sol, dans lesquels la résistance des matériaux de la structure contribuent significativement à la résistance (STR) ;

– rupture ou déformation excessive du terrain, dans lequel la résistance des sols ou des roches contribue de façon significative à la résistance (GEO) ;

– soulèvement global de la structure ou du sol provoqué par la pression de l'eau (poussée d'Archimède) ou par d'autres actions verticales (UPL) ;

– soulèvement local du sol, érosion interne ou érosion régressive du terrain, sous l'effet des gradients hydrauliques (HYD).

Note : L'état limite GEO est souvent critique pour la détermination des dimensions des éléments de structure dans les fondations et les soutènements et parfois critique pour la résistance des éléments de structure. »

Le débat à l'intérieur du SC 7 ces dernières années à propos du format de vérification des ELU en situations de projet durables et transitoires concernait les états limites GEO et STR (*Note*: les situations de projet durables et transitoires couvrent toutes les situations de projet ELU, sauf les situations de projet accidentelles et sismiques; les combinaisons d'actions à utili-

ser dans ces situations de projet sont souvent appelées combinaisons « fondamentales », voir EN 1990, CEN 2002). Ce débat provient de la formulation dans l'ENV 1997-1 (CEN 1994) qui impliquait que les ELU dans les situations de projets durables et transitoires devaient être vérifiés pour deux formats de combinaisons d'actions, c'est-à-dire pour les Cas B et C, tels qu'on les appelait à l'époque. Le cas B était destiné à vérifier l'incertitude sur les charges provenant de la structure, et le cas C l'incertitude sur la résistance du terrain. Certains géotechniciens étaient favorables à cette double vérification, mais d'autres préféraient n'avoir à utiliser qu'un seul format de combinaisons d'actions (pour plus de détails voir par exemple : Frank et Magnan, 1999).

L'accord obtenu avec le TC 250 chargé de l'Eurocode : Base de calcul des structures (EN 1990), ainsi qu'à l'intérieur du TC 250 /SC 7 lui-même, a ouvert la voie à trois approches de calcul. Le choix est laissé à l'appréciation nationale, c'est-à-dire que chaque pays devra choisir l'approche de calcul à utiliser pour chaque type de structure géotechnique (fondations superficielles, fondations sur pieux, ouvrages de soutènement, stabilité des pentes).

D'une manière générale, pour vérifier les ELU dans les situations de projet durables et transitoires, trois ensembles de facteurs partiels à appliquer aux valeurs caractéristiques des actions sont introduits dans l'EN 1990 : l'ensemble A, l'ensemble B et l'ensemble C :

– l'ensemble A est utilisé pour vérifier l'équilibre statique de la structure (EQU) ;

– l'ensemble B concerne le calcul des éléments structuraux (STR) qui n'implique pas les actions géotechniques ;

– les ensembles B et C concernent le calcul des éléments structuraux qui implique les actions géotechniques et la résistance du terrain (STR/GEO).

Les tableaux I, II et III donnent, d'une manière simplifiée, les valeurs recommandées pour les bâtiments pour les ensembles A, B et C, issues des tableaux A1.2 (A), A1.2 (B) et A1.2 (C) de l'EN 1990 (CEN 2002). Les valeurs recommandées qui sont données peuvent être modifiées nationalement.

Pour STR/GEO, les trois approches de calcul sont les suivantes (clause A1.3.1 in EN 1990, CEN 2002) :

« 5) Il convient de vérifier le dimensionnement des éléments structuraux (semelles, pieux, murs de soubassement, etc.) (STR) soumis à des actions géotechniques, et la résistance du terrain (GEO, voir 6.4.1), en utilisant

TABLEAU I Facteurs partiels pour les actions dans le cas des bâtiments et valeurs recommandées (ensemble A).

Partial factors for actions in the case of buildings and recommended values (Set A).

Action	Symbole	Valeur
Actions permanentes :		
– défavorables	$\gamma_{G,sup}$	1,10 ⁽¹⁾
– favorables	$\gamma_{G,inf}$	0,90 ⁽¹⁾
Actions variables :		
– défavorables	γ_Q	1,50

(1) Alternativement, la partie favorable peut être multipliée par $\gamma_{G,inf} = 1,15$ et la partie défavorable par $\gamma_{G,sup} = 1,35$.

TABEAU II Facteurs partiels pour les actions dans le cas des bâtiments et valeurs recommandées (ensemble B).

Partial factors for actions in the case of buildings and recommended values (Set B).

Action	Symbole	Valeur		
		Eq. (6.10)	Eq. (6.10a)	Eq. (6.10b)
Actions permanentes :				
– défavorables ⁽¹⁾	$\gamma_{G,sup}$	1,35	1,35	1,15 ⁽²⁾
– favorables ⁽¹⁾	$\gamma_{G,inf}$	1,00	1,00	1,00
Actions variables :				
– défavorables	γ_Q	1,50	$1,5\psi_0$	1,50

(1) toutes les actions permanentes d'une même origine sont multipliées par $\gamma_{G,sup}$ ou par $\gamma_{G,inf}$

(2) la valeur de ξ est 0,85 de sorte que $\xi\gamma_{G,sup} = 0,85 \times 1,35 = 1,15$.

Note 1. Le choix entre 6.10, ou 6.10a et 6.10b, sera dans l'Annexe nationale. Note 2. $\gamma_{G,s}$ et de γ_Q peuvent être subdivisées en $\gamma_{G,r}$, $\gamma_{G,i}$ et $\gamma_{G,se}$ facteur d'incertitude de modélisation. Une valeur $\gamma_{se} = 1,15$ est recommandée.

TABEAU III Facteurs partiels pour les actions dans le cas des bâtiments et valeurs recommandées (ensemble C).

Partial factors for actions in the case of buildings and recommended values (Set C).

Action	Symbole	Valeur
Actions permanentes :		
– défavorables	$\gamma_{G,sup}$	1,00
– favorables	$\gamma_{G,inf}$	1,00
Actions variables :		
– défavorables	γ_Q	1,30

l'une des trois approches suivantes complétées, pour les actions géotechniques et les résistances, par l'EN 1997 :

– *Approche 1.* Application, dans des calculs séparés, de valeurs de calcul provenant du tableau A1.2 (C) et du tableau A1.2 (B) aux actions géotechniques, aussi bien qu'aux autres actions appliquées à la structure ou en provenance de celle-ci. Dans des cas courants, le dimensionnement des fondations est régi par le tableau A1.2 (C) et la résistance structurale est régie par le tableau A1.2 (B).

Note : Dans certains cas, l'application de ces tableaux est plus complexe, voir l'EN 1997.

– *Approche 2.* Application de valeurs de calcul provenant du tableau A1.2 (B) aux actions géotechniques ainsi qu'aux autres actions appliquées à la structure ou en provenance de celle-ci ;

– *Approche 3.* Application de valeurs de calcul provenant du tableau A1.2 (C) aux actions géotechniques et, simultanément, application de valeurs de calcul du tableau A1.2 (B) aux autres actions appliquées à la structure ou en provenance de celle-ci.

Note : L'utilisation de l'approche 1, 2 ou 3 est choisie dans l'Annexe nationale. »

En d'autres termes, l'approche de calcul 1 correspond à la double vérification de l'ENV 1997-1 (vérification B + C) et les approches de calcul 2 et 3 sont des nouvelles procédures qui utilisent un seul format de combinaisons d'actions. En ce qui concerne la résis-

tance géotechnique, l'approche 2 utilise des facteurs sur la résistance globale du terrain (*resistance factors*), tandis que l'approche 3 utilise des facteurs sur les propriétés élémentaires du matériau sol ou roche (*material factors* = pondération à la source).

L'Annexe nationale à l'EN 1997-1, propre à chaque pays, indiquera le choix qui est retenu en ce qui concerne l'approche de calcul.

Le tableau IV donne le lien entre les ensembles B et C et les ensembles correspondants pour la résistance géotechnique : ensembles G1 (B), G1 (C), G2 et G3. Ces ensembles sont définis dans l'annexe A de l'Eurocode 7 – Partie 1. Comme indiqué plus haut, l'annexe A donne également des valeurs recommandées pour les facteurs partiels ; ces valeurs pourraient être choisies différemment par l'Annexe nationale.

Plus de détails sur l'utilisation des trois approches de calcul traitées au travers de plusieurs exemples pourront être trouvées, par exemple, dans Frank *et al.* (2004).

TABEAU IV États limites STR/GEO.

Ensembles de facteurs partiels à utiliser selon l'EN 1990 et l'EN 1997-1. STR/GEO limit states. Sets of partial factors to be used according to EN 1990 and EN 1997-1.

Approche	Actions sur/ provenant de la structure	Actions géotechniques	Résistances géotechniques
1	B C	B C	G1 (B) G1 (C)
2	B	B	G2
3	B	C	G3

5

Liaisons

A l'intérieur du système des Eurocodes lui-même, il y a, évidemment, beaucoup de liens entre les différents Eurocodes ou parties d'Eurocodes. L'Eurocode 7 sur le Calcul géotechnique est plus particulièrement lié à :

– l'EN 1990 : « Eurocode : Bases du calcul des structures », qui définit les différents états limites et les situations de projet à vérifier, et donne les règles générales pour prendre en compte les actions appliquées à la structure ou en provenance de celle-ci et les actions géotechniques ;

– l'ENV 1998-5 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques.

Les autres comités techniques du CEN, qui élaborent des normes intéressant l'Eurocode 7, et pour lesquelles une coordination doit être assurée sont :

– le CEN/TC 341 sur la « Reconnaissance et essais géotechniques », mentionné précédemment ;

– le CEN/TC 288 sur l'« Exécution des travaux géotechniques » ;

– le CEN/TC 189 sur les « Produits géotextiles » ;

– le CEN/TC 227 sur les « Produits routiers ».

En ce qui concerne l'ISO, une liaison forte est maintenue avec l'ISO/TC 182 sur la « Géotechnique », en particulier :

-l'ISO/TC 182/SC 1 « Reconnaissance des terrains et essais géotechniques » ;

-l'ISO/TC 182/SC 3 « Fondations, ouvrages de soutènement et ouvrages en terre ».

L'accord de Vienne entre le CEN et l'ISO étant appliqué, le CEN/TC 182/SC 1 travaille actuellement sur l'identification et la classification des sols et des roches et le CEN/TC 341 joue un rôle passif. En ce qui concerne la reconnaissance et les essais, c'est l'inverse : le TC 341 y travaille actuellement et le TC 182/SC1 est passif.

6

Conclusion

Le travail d'élaboration d'un cadre commun pour le calcul géotechnique à travers l'Europe, c'est-à-dire l'Eurocode 7, a commencé il y a près de 25 années.

Étant donné le progrès récemment accompli, on est maintenant assuré que les normes ou codes correspondants seront très prochainement disponibles.

Quel que soit le statut futur de l'Eurocode 7 dans les différents pays, il sera un outil important pour le secteur de la construction. Il est destiné à être un outil pour aider les ingénieurs géotechniciens européens à parler le même langage et tout autant un outil nécessaire au dialogue entre les ingénieurs géotechniciens et les ingénieurs des structures.

L'Eurocode 7 aide à la promotion de la recherche. Manifestement, il pousse à s'interroger sur la pratique du dimensionnement géotechnique actuel, de la reconnaissance des terrains jusqu'aux modèles de calcul.

Nous pensons qu'il sera également très utile à beaucoup d'ingénieurs géotechniciens et ingénieurs des structures à travers le monde, pas uniquement en Europe.

Bibliographie

- CE (2003a) – *Guidance Paper L. Application and use of the Eurocodes*, ref.: Construct 03/629 Rev. 1, European Commission, Brussels, 27 November 2003, 38 p.
- CE (2003b) – Commission recommendation of 11 December 2003 on the implementation and use of Eurocodes for construction works and structural construction products (2003/887/EC), *Official Journal of the European Union*, 19/12/2003, EN, L 332/62 & 63.
- CEN 1994 – *Eurocode 7, Part 1: Geotechnical Design – General Rules*. Pre-standard ENV 1997-1. European Committee for Standardization (CEN), Brussels. Version française : *Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales* (et document d'application nationale), XP ENV 1997-1, AFNOR, décembre 1996.
- CEN (1999a) – *Eurocode 7, Part 2: Geotechnical Design – Geotechnical Design assisted by Laboratory Testing*. Pre-standard ENV 1997-2. European Committee for Standardization (CEN): Brussels. Version française : *Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 2 : Calcul sur la base d'essais en laboratoire*, XP ENV 1997-2, AFNOR, juillet 1999.
- CEN (1999b) – *Eurocode 7, Part 3: Geotechnical Design – Geotechnical Design assisted by Field Testing*. Pre-standard ENV 1997-3. European Committee for Standardization (CEN): Brussels. Version française : *Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 3 : Calcul sur la base d'essais en place*, XP ENV 1997-3, AFNOR, mai 1999.
- CEN 2002 – *Eurocode: Basis of structural design*. European standard, EN 1990 : 2002. European Committee for Standardization (CEN), Brussels. Version française : *Eurocodes structureaux. Bases de calcul des structures*, NF EN 1990 : 2003, mars 2003 et *Annexe nationale à la NF 1990*, NF P 06-100-2, AFNOR, juin 2004.
- CEN (2004a) – *Eurocode 7 Calcul géotechnique – Partie 1: Règles générales*, Comité européen de normalisation (CEN), Bruxelles, novembre 2004, 175 p.
- CEN (2004b) – *Eurocode 7 – Part 2: Geotechnical design – Ground investigation and testing*. prEN 1997-2, final draft under editing, doc. nr. CEN/TC 250/SC 7/N 381, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, September 2004, 162 p.
- EC 7 – *Eurocode 7: Geotechnics*. Preliminary draft for the European Communities, Geotechnik, 1990/1.
- Frank R., Bauduin C., Driscoll R., Kavvadas M., Krebs Ovesen N., Orr T., Schuppenner B. – *Designer's guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical design – General rules*, Thomas Telford, London, 2004, 216 p.
- Frank R., Magnan J.-P. – Quelques réflexions sur la vérification des états limites ultimes suivant l'Eurocode 7. Workshop on the Eurocodes, *Comptes rendus 12^e Congrès européen de mécanique des sols et de géotechnique*, Amsterdam, 7-10 juin 1999, vol. 3, p.2179-2183.