

Eurocode 7 : calcul géotechnique

par **Jean-Pierre MAGNAN**

*Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Docteur ès Sciences
Directeur technique au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées*

1. Structure de l'eurocode 7	C 240 - 2
2. Principes généraux de l'eurocode 7	— 2
2.1 Relations avec les autres eurocodes	— 2
2.2 États limites ultimes et de service	— 3
2.3 Classification des actions	— 3
2.4 Situations de calcul	— 3
2.5 Valeurs caractéristiques et valeurs de calcul	— 3
2.6 Définition des coefficients partiels	— 4
3. Règles de dimensionnement des ouvrages géotechniques	— 4
3.1 Champ d'application de l'eurocode 7	— 4
3.2 Organisation des études géotechniques	— 5
3.2.1 Catégories géotechniques	— 5
3.2.2 Procédures de justification	— 5
3.2.3 Rapports géotechniques	— 5
3.3 Fondations profondes	— 6
3.4 Fondations superficielles	— 6
3.4.1 Vérification à l'état limite ultime	— 7
3.4.2 Autres vérifications	— 7
3.5 Ouvrages de soutènement	— 7
3.6 Ouvrages en terre	— 7
4. Conclusion	— 8
Pour en savoir plus	Doc. C 240

L'eurocode 7 « Calcul géotechnique » constitue l'un des chapitres d'un ensemble de textes dont la préparation a été commandée par la Commission des Communautés Européennes au début des années 80, aux fins d'harmoniser les **règles de conception et de calcul des constructions courantes** et de rendre plus égales les conditions de concurrence dans les différents pays d'Europe. Il comprendra à terme plusieurs parties, dont seule la première (Règles générales) a été rédigée jusqu'à présent. Le texte de l'eurocode 7 a été approuvé comme norme provisoire ou « prénorme » ENV 1997-1 (1994), d'application facultative. Sa publication simultanée dans les trois langues de travail du CEN (allemand, anglais, français), à la fin de 1994, marque le début d'une période de test de trois années, à l'issue de laquelle la norme sera réexaminée puis soumise à vote pour devenir une norme européenne à part entière, s'imposant dans les pays membres du CEN (Comité Européen de Normalisation), dont la France. Les normes françaises de dimensionnement et d'essai en géotechnique seront réaménagées par les instances de normalisation française, pour former avec l'eurocode 7 définitif un corps de normes cohérent, susceptible de remplacer les textes existants comme les Documents Techniques Unifiés (DTU) et les fascicules du Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) applicables aux marchés publics.

L'eurocode 7 est inclus dans un ensemble de textes applicables aux constructions courantes (bâtiments et ouvrages d'art) et a été conçu comme le recueil des règles de bases applicables à tous les ouvrages de géotechnique. Certains types d'ouvrages, comme les barrages, les tunnels et les travaux de terrassements, débordent du domaine couvert par l'eurocode 7, parce que des règles complémentaires ou différentes s'appliquent à eux, et ils seront de fait exclus du champ d'application de ce texte.

Par rapport à la pratique traditionnelle de la géotechnique en France et dans le monde, l'eurocode 7 se distingue par la volonté délibérée d'appliquer systématiquement le formalisme du **dimensionnement aux états limites** (ultimes et de service) et de traiter la **sécurité** au moyen de **coefficients partiels** appliqués séparément aux charges, aux propriétés des matériaux et aux méthodes de calcul. La référence aux états limites est un remodelage des pratiques existantes, mais l'utilisation de coefficients partiels, au lieu d'un coefficient de sécurité global spécifique à chaque type de calcul et à chaque type d'ouvrage, est une modification beaucoup plus importante qui a nécessité et nécessitera au cours des prochaines années beaucoup d'études de recalage par rapport à l'expérience.

Le présent chapitre décrit le contenu de l'eurocode 7 expérimental, dont la publication a eu lieu en 1994. Il analyse en particulier les similitudes et différences de ce texte par rapport aux pratiques généralement suivies en France dans l'étude des ouvrages géotechniques, puis commente les possibilités pratiques d'utilisation de ce texte en attendant la publication des normes complémentaires prévues ultérieurement par types d'ouvrages.

1. Structure de l'eurocode 7

L'eurocode 7, comme tous les autres eurocodes, comprend un **texte principal**, qui est d'application obligatoire, et des **règles d'application**, qui constituent des modèles reconnus d'application des prescriptions de l'eurocode 7 mais peuvent être remplacées par des procédures « équivalentes » du point de vue de la sécurité des ouvrages et du respect des principes généraux du dimensionnement. Le texte approuvé au niveau européen, dans le cadre des travaux du CEN (Comité Européen de Normalisation), contient de plus des **paramètres** dits « **encadrés** », dont les valeurs peuvent être librement fixées dans chaque pays. Un « document d'application nationale » est donc publié avec chaque eurocode pour préciser les conditions d'application de cet eurocode dans chaque pays et définir en particulier les valeurs nationales des paramètres encadrés et les règles admises comme équivalentes aux règles d'application décrites dans l'eurocode.

L'eurocode 7 est divisé en neuf chapitres :

- chapitre 1 : Introduction
- chapitre 2 : Bases du calcul géotechnique
- chapitre 3 : Données géotechniques
- chapitre 4 : Contrôle de la construction, surveillance et entretien
- chapitre 5 : Remblais, rabattements de nappe, amélioration et renforcement du sol
- chapitre 6 : Fondations superficielles
- chapitre 7 : Fondations sur pieux
- chapitre 8 : Ouvrages de soutènement
- chapitre 9 : Remblais et talus

Les premiers chapitres présentent les concepts de base du dimensionnement des ouvrages, tandis que les chapitres suivants décrivent leur application au dimensionnement des grandes catégories d'ouvrages géotechniques.

Il faut noter que les **eurocodes traitent seulement des questions de conception et de calcul des ouvrages**, les normes relatives à l'exécution des travaux étant élaborées dans un autre cadre (Comité technique 288 du CEN).

2. Principes généraux de l'eurocode 7

2.1 Relations avec les autres eurocodes

La collection complète des « eurocodes structuraux » comprend actuellement neuf volumes :

- 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

L'eurocode 1 (ENV 1991) définit les principes généraux de la conception et du calcul des ouvrages et impose ces règles aux autres eurocodes. Il définit notamment les concepts d'états limites ultime et de service, la notion de situation de calcul, les principes de détermination des valeurs de calcul des charges et des propriétés des matériaux et le vocabulaire commun à tous les eurocodes.

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 des règles de ces eurocodes a dû être assurée.

2.2 États limites ultimes et de service

L'objectif du dimensionnement des ouvrages de génie civil, dont font partie les ouvrages géotechniques, est de satisfaire un certain nombre de conditions de sécurité et d'aptitude au service, spécifiques à chaque type d'ouvrages et à son utilisation prévue. Les eurocodes distinguent deux grandes catégories d'états limites, qui sont les états au-delà desquels les exigences de sécurité (pour les états limites ultimes) et d'aptitude au service (pour les états limites de service) ne sont plus satisfaites.

Les **états limites ultimes** concernent à la fois la sécurité de la structure (qui ne doit pas être gravement endommagée) et la sécurité des personnes. On peut en donner comme exemples :

- la perte de stabilité globale de l'ouvrage (renversement, enfoncement excessif dans le sol, glissement) ;
- la rupture d'un élément de la structure de l'ouvrage ;
- une rupture par érosion interne régressive ;
- des tassements, mouvements horizontaux ou déformations excessifs pour le fonctionnement ultérieur de la structure de l'ouvrage.

Les **états limites de service** définissent les conditions au-delà desquelles les spécifications de service de l'ouvrage ne sont plus remplies, que ce soit en termes de fonctionnement mécanique, de confort, d'aspect, etc. Ce sont souvent des conditions relatives aux tassements relatifs maximaux ou déformations maximales acceptables, à des vibrations, sources d'inconfort, à la fissuration de l'ouvrage, qui peut compromettre sa durabilité, etc.

Le dimensionnement par rapport à des états limites n'est pas une nouveauté pour les ouvrages de géotechnique : la formation élémentaire à la mécanique des sols apprend que l'on doit assurer la stabilité des ouvrages sous les charges qui leur sont appliquées et que l'on doit vérifier que les tassements et autres déformations sont acceptables, ou peuvent être rendus acceptables au moyen de procédés de construction adaptés. Néanmoins, dans la pratique du dimensionnement des ouvrages courants, comme les fondations profondes et superficielles, l'analyse se limite souvent à un calcul de stabilité, avec un coefficient de sécurité variable selon les types d'ouvrages, mais suffisant en général pour maintenir les mouvements du sol et de l'ouvrage à un niveau admissible. De ce fait, la fixation souhaitable de **seuils de déformation admissible**, tant pour les états limites ultimes que pour les états limites de service, présente des difficultés d'application pratique, les ingénieurs et maîtres d'œuvre ayant peu d'expériences auxquelles se référer, et le document national d'application de l'eurocode 7 pour la France maintient la possibilité de justifier les ouvrages courants par des calculs à l'état limite ultime, comme c'est prévu dans les DTU et le fascicule 62-Titre V du CCTG.

2.3 Classification des actions

L'eurocode 1 définit trois catégories d'actions (ou « charges » au sens large, puisqu'il peut s'agir de forces, de moments ou de déplacements imposés) correspondant à des durées et fréquences d'application différentes :

- les **actions permanentes** (poids des structures et des sols, pressions d'eau, pressions des terres, précontrainte, etc.) ;
- les **actions variables** (charges de circulation, charges de vent et neige, etc.) ;
- les **actions accidentelles** (explosions, charges dynamiques, chocs, séismes, etc.).

Ces actions sont combinées pour définir les cas de charge qui serviront pour le calcul, en suivant les règles complexes traditionnelles qui attribuent des poids différents aux différents types d'actions (permanentes, variables dominantes ou autres, accidentelles et sismiques).

L'eurocode 7 précise que la durée des actions doit être appréciée par référence aux effets du temps sur les propriétés mécaniques du sol, notamment la perméabilité, les conditions de drainage et la compressibilité des sols fins. Suivant les calculs effectués, certaines forces ou déplacements imposés peuvent, de plus, être ou non traités comme des actions (frottement négatif et pressions des terres, par exemple).

2.4 Situations de calcul

Les situations de calcul sont les **combinaisons de charges et de données géométriques, physiques et mécaniques** sur les structures et les sols pour lesquelles on doit vérifier que l'on n'atteint pas d'état limite ultime ou de service. Des situations de calcul différentes peuvent être associées aux phases d'exécution d'un même ouvrage, tant pour les géométries successives du sol et de l'ouvrage que pour le type de comportement (court terme, long terme) et les combinaisons de charges permanentes, transitoires et accidentelles qui sont susceptibles de se produire pendant la durée de la phase correspondante des travaux.

2.5 Valeurs caractéristiques et valeurs de calcul

La notion de valeur caractéristique d'un paramètre de dimensionnement (charge ou propriété mécanique d'un matériau) est liée à une conception probabiliste de la sécurité : c'est une valeur « représentative » ayant une certaine probabilité d'être dépassée du côté défavorable au comportement de l'ouvrage (c'est ainsi, par exemple, que l'on choisit en général des valeurs caractéristiques inférieures à la moyenne pour la résistance et des valeurs supérieures pour les charges). Cette probabilité est fixée à 5 % dans l'eurocode 7. Dans la pratique de la géotechnique, la détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques des sols (et des roches) est souvent malaisée, car on dispose rarement d'un ensemble suffisant de résultats de mesures pour effectuer une analyse statistique. De plus, les valeurs représentatives de certains paramètres dépendent des dimensions de l'ouvrage et du volume de sol qui contrôle son fonctionnement.

Les valeurs de calcul, qui sont, comme leur nom l'indique, les valeurs des paramètres qui seront utilisées pour contrôler l'occurrence des états limites dans chaque situation de calcul, sont déduites des valeurs caractéristiques par application d'un coefficient minorateur ou majorateur, suivant que l'augmentation du paramètre va ou non dans le sens de la sécurité.

Ce principe général à tous les eurocodes s'applique difficilement dans beaucoup de problèmes de géotechnique pour la raison déjà mentionnée du petit nombre de mesures disponibles pour déterminer les valeurs caractéristiques. L'eurocode 7 autorise pour cette raison de **déterminer directement les valeurs de calcul des propriétés physiques et mécaniques des sols**, sans passer par les valeurs caractéristiques et les coefficients partiels.

Il subsiste donc une ressemblance très forte entre la détermination des paramètres de calcul dans l'approche classique de la mécanique des sols, et dans le formalisme de l'eurocode 7, mais il est nécessaire d'analyser chaque méthode de calcul et chaque type de paramètre pour déterminer si les pratiques traditionnelles de choix des valeurs de ces paramètres de calcul doivent rester ou non en vigueur, car les corrections appliquées aux valeurs de calcul dans les vérifications peuvent être différentes dans l'approche de l'eurocode 7.

2.6 Définition des coefficients partiels

Les coefficients partiels sont les facteurs minorateurs ou majorateurs que l'on applique aux valeurs caractéristiques des actions et propriétés des matériaux pour en déduire les valeurs de calcul. Cette correction, opérée au niveau des données du calcul, remplace l'application classique d'un coefficient de sécurité global unique sur les résultats des calculs de stabilité (pour les calculs de déplacements et déformations, on garde en général les valeurs des modules déduites de la synthèse des essais, en appliquant des coefficients partiels égaux à un). Il est prévu d'affecter aussi un coefficient partiel à la méthode de calcul elle-même, mais cette possibilité n'a encore pas été mise en œuvre dans l'eurocode 7. La stabilité s'apprécie par l'équilibre des forces motrices et des forces résistantes dans le mécanisme de rupture analysé.

La fixation des coefficients partiels relatifs aux propriétés de résistance des sols et des matériaux pour la justification des bâtiments courants aux états limites ultimes, dans les situations permanentes et transitoires, a mis en évidence de façon inattendue une incompatibilité du traitement de la sécurité dans les calculs de structures et dans les calculs de géotechnique. Cette différence importante concerne la **majoration des charges permanentes dues à la pesanteur** : pour les calculs géotechniques, on admet en général que les masses volumiques sont raisonnablement bien connues et que la géométrie des massifs de sols ou des charges simples (par exemple, un réservoir) est assez bien définie : on prend les charges (permanentes) dues à la pesanteur telles qu'elles sont estimées. Pour le calcul des structures, par contre, la règle est de majorer sensiblement (coefficient partiel de 1,35, d'après l'eurocode 1) toutes les charges permanentes, y compris les charges dues à la pesanteur. Chaque secteur professionnel a ensuite étalonné sa pratique en fonction de cette hypothèse, pour obtenir un niveau de sécurité moyen auquel tous les partenaires du projet sont habitués : les géotechniciens, dont les inquiétudes sont concentrées sur l'estimation de la résistance des sols et des roches, ont affecté des coefficients de sécurité partiels importants aux paramètres de résistance, tandis que les ingénieurs en structures ont limité la pénalisation des propriétés de leurs matériaux, puisqu'ils avaient une réserve de sécurité au niveau des charges permanentes.

La combinaison de ces deux méthodes de traitement de la sécurité en un système unifié, fondé sur les règles de l'eurocode 1, a d'abord été tentée selon les règles du milieu dominant, celui des structures. Mais il est vite apparu que le dimensionnement de certains types d'ouvrages, comme les rideaux de soutènement, pour lesquels on calcule par les méthodes de la géotechnique les pressions des terres, qui servent ensuite de charge pour le dimensionnement interne du rideau, conduirait à des solutions surdimensionnées par rapport aux nécessités validées par l'expérience. En effet, le calcul de la pression des terres s'effectuait avec le poids volumique réel des sols et des paramètres de résistance réduits, pour produire une pression des terres permanente déjà « sécuritaire », que le calcul de la structure repénalisait comme toute charge permanente en la multipliant par 1,35 : le résultat que l'on aurait obtenu avec les valeurs caractéristiques brutes était pénalisé une fois pour le sol et une deuxième fois pour la structure.

Les discussions pour résoudre ce problème de frontière ont été longues et complexes et la solution actuelle, qui consiste à imposer de faire plusieurs calculs parallèles avec des pondérations différentes des actions suivant l'aspect (sol ou structure) traité, est susceptible de modification dans les prochaines années, en fonction des progrès des recherches que cette difficulté va susciter. Actuellement, il est donc exigé dans l'eurocode 1 et dans l'eurocode 7 de faire **trois types de vérifications à l'état limite ultime** pour chaque situation permanente ou transitoire de calcul des constructions courantes :

- le cas A concerne le calcul de la stabilité au soulèvement des ouvrages construits dans une nappe d'eau et soumis à la poussée d'Archimède ;

- le cas B privilégie l'approche de la sécurité en calcul des structures et majore les charges permanentes d'un facteur 1,35. Par contre, les propriétés de résistance des sols ne sont pas pénalisées par rapport à leur estimation (valeurs caractéristiques) ;
- le cas C privilégie l'approche de la sécurité en mécanique des sols et réduit sensiblement les résistances du sol, sans augmenter les charges permanentes.

L'ouvrage étudié doit être stable vis-à-vis de ces trois modes de calcul, ce qui conduit à adopter les dimensions les plus importantes sur l'ensemble des calculs réalisés.

Les principes généraux exposés ci-avant servent de base aux règles de dimensionnement des différents types d'ouvrages géotechniques, avec des particularités liées aux pratiques nationales (par exemple, certains pays utilisent plus les essais en place et d'autres plus les essais de laboratoire pour caractériser les sols ; pour certains ouvrages, l'exécution d'essais de chargement avant ou pendant les travaux de construction est un élément important pour le dimensionnement ; etc.). Ces règles de dimensionnement sont décrites et commentées ci-après.

3. Règles de dimensionnement des ouvrages géotechniques

3.1 Champ d'application de l'eurocode 7

L'eurocode 7 s'applique aux **aspects géotechniques du calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil**. Il traite des exigences vis-à-vis de la résistance, de la stabilité, de l'aptitude au service et de la durabilité des ouvrages.

Le Document d'Application Nationale (DAN) français précise que l'eurocode 7 est applicable aux aspects géotechniques des catégories d'ouvrages suivantes :

- tous les bâtiments ;
- les ouvrages d'art tels que les ponts, les soutènements, les tranchées couvertes, les pylônes ;
- les pentes naturelles et artificielles (déblais), les ouvrages en sol renforcé, les remblais.

Il précise que **l'eurocode 7 n'est pas suffisant pour le dimensionnement des barrages, tunnels et ouvrages souterrains (hors tranchées couvertes) et ouvrages en mer et qu'il ne s'applique pas aux terrassements routiers et ferroviaires, ni aux problèmes de dragage en mer ou en rivière**.

Il est important également de noter que **l'eurocode 7 n'est pas un manuel de dimensionnement mais un règlement de justification des projets**. Il ne faut pas y chercher des indications sur la meilleure façon de concevoir les ouvrages, ni quelles dimensions il vaut mieux leur donner ou quelles sont les meilleures techniques de construction : l'eurocode 7, comme tous les autres eurocodes, définit les règles qu'il faut appliquer pour prouver au client et aux organismes chargés d'assurer la sécurité dans le secteur du bâtiment et des travaux publics que l'ouvrage décrit dans le projet est stable et remplira les fonctions qui lui sont assignées.

Enfin, les rédacteurs de l'eurocode 7 ont tenu compte de la diversité des pratiques, des conditions de terrain et des méthodes de justification actuelles des ouvrages géotechniques dans les différents pays membres du CEN et ont laissé beaucoup de souplesse dans l'application concrète des principes de justification de l'eurocode. Il fallait en effet, dans l'énoncé des principes obligatoires de justification des ouvrages, tenir compte de l'extrême diversité des matériaux rencontrés en géotechnique et de l'existence de traditions nationales incontournables (par exemple, l'utilisation inten-

sive du pressiomètre en France). Concrètement, l'eurocode 7 se limite souvent à l'énoncé de principes généraux et de listes de facteurs qu'il ne faut pas oublier, quand ils sont pertinents, pour effectuer la justification du dimensionnement de l'ouvrage. Il est un peu plus détaillé pour les fondations profondes et superficielles, qui sont des types d'ouvrages pour lesquels existaient des normes spécifiques dans plusieurs pays (en France, les DTU 13.11 *Fondations superficielles*, 13.12 *Règles pour le calcul des fondations superficielles* et 13.2 *Travaux de fondations profondes pour le bâtiment*, ainsi que le fascicule 62-titre V du CCTG *Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil*). Mais, dans tous les cas, il a paru indispensable de continuer de s'appuyer sur les textes détaillés existants pour appliquer concrètement les règles de l'eurocode 7 dans les bureaux d'études.

3.2 Organisation des études géotechniques

La justification d'un ouvrage du point de vue de la géotechnique s'appuie bien évidemment sur les conclusions de la reconnaissance du site, comportant les cas des études géologiques, des sondages et essais in place, des prélèvements et essais de laboratoire, voire des expérimentations en vraie grandeur. L'importance de cette reconnaissance géotechnique et les méthodes de justification utilisées dépendent non seulement de la nature de l'ouvrage et des terrains (sols ou roches) rencontrés sur le site, mais aussi de l'importance de l'ouvrage.

3.2.1 Catégories géotechniques

Les rédacteurs de l'eurocode 7 ont introduit la notion de « catégorie géotechnique » pour différencier les « ouvrages simples » des autres ouvrages géotechniques et autoriser l'emploi de méthodes de justification simplifiées pour ces ouvrages simples, afin de permettre le maintien des pratiques en vigueur sans dommages particuliers dans les différents pays d'Europe. L'eurocode 7 définit trois catégories géotechniques :

- la **catégorie géotechnique 1** comprend les ouvrages de faible importance et relativement simples, pour lesquels il est possible d'admettre que les exigences fondamentales (sécurité, aptitude au service et durabilité) seront satisfaites en utilisant l'expérience acquise et des reconnaissances géotechniques qualitatives, avec des risques négligeables pour les biens et les vies. Cette catégorie correspond typiquement à des maisons à un ou deux niveaux, à des bâtiments agricoles de faible importance sur fondations superficielles classiques ou sur pieux, à des murs de soutènement et fouilles blindées où la différence de niveau des terrains n'excède pas 2 m, à de petites excavations pour la pose de canalisations ou de drains... ;
- la **catégorie géotechnique 2** comprend les types classiques d'ouvrages et de fondations qui ne présentent pas de risques anormaux ou des conditions de terrain et de chargement inhabituelles ou exceptionnellement difficiles. Pour ces ouvrages, des reconnaissances géotechniques quantitatives et des calculs de justification sont nécessaires, mais avec des procédures de routine tant pour les essais que pour les calculs. Cette catégorie comprend les types classiques de fondations superficielles, de fondations sur radiers, de fondations sur pieux, les murs et les autres ouvrages retenant ou soutenant du sol ou de l'eau, les excavations, les appuis et culées de ponts, les remblais et terrassements pour le bâtiment et les ouvrages d'art, les ancrages et autres systèmes de tirants, les tunnels simples... ;
- la **catégorie géotechnique 3** comprend les ouvrages et parties d'ouvrages qui n'entrent pas dans les catégories 1 et 2, parce qu'ils sont très grands ou très inhabituels, créent des risques anormaux ou doivent être édifiés dans des conditions de terrain très complexes ou dans des zones très sismiques.

La consistance de l'étude géotechnique et du rapport de justification de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage est définie *a priori* lors de la commande de l'étude géotechnique par le maître d'œuvre, mais elle doit être régulièrement revue pour l'adapter aux constatations faites au fur et à mesure de la reconnaissance géotechnique et de l'élaboration du projet.

3.2.2 Procédures de justification

La justification des ouvrages géotechniques consiste à prouver que, dans chaque situation de calcul, aucun des états limites identifiés n'est atteint. La façon classique d'opérer cette vérification consiste à effectuer des calculs :

- calcul des efforts déstabilisants et des efforts résistants ;
- calcul des déplacements ou déformations,

et de vérifier que l'on atteint pas les états limites ultimes (en stabilité et en déformations), ni les états limites de service (en stabilité et en déformations). Toutefois, cette procédure de justification n'est pas la seule qui soit admise pour les ouvrages de géotechnique.

L'eurocode 7 note que de nombreuses incertitudes affectent les méthodes de calcul disponibles, parce qu'elles simplifient le comportement du sol ou de l'ouvrage et nécessitent souvent des ajustements empiriques pour dimensionner l'ouvrage à partir des résultats du calcul. Certaines méthodes de calcul sont d'ailleurs uniquement des relations empiriques entre les résultats d'essais et le comportement de l'ouvrage. Enfin, certains états limites ne peuvent être vérifiés par le calcul et il est donc impossible de mettre en œuvre directement les règles générales de justification. Dans un tel cas, on a recours à l'expérience pour justifier qu'un coefficient de sécurité par rapport à un autre état limite calculable permet d'éviter l'état limite considéré.

L'eurocode 7 admet donc logiquement, conformément à l'expérience acquise dans la pratique de la géotechnique, qu'il existe quatre façons de justifier un ouvrage :

- **justification par le calcul**, déjà évoquée, où l'on utilise des modèles de calcul, des actions qui peuvent être des charges imposées ou des déplacements imposés, des propriétés de sols, roches ou autres matériaux, des données géométriques et des valeurs limites de déformations, de profondeurs de fissures, de vibrations, etc. ;
- **justification par des mesures prescriptives**, qui sont des choix classiques et sécuritaires sur les matériaux, les détails du projet, son exécution, etc. Ce type de dimensionnement peut être utilisé notamment pour les ouvrages simples, lorsque l'on dispose de l'expérience d'une construction semblable dans les mêmes conditions de terrain. Il est également adapté pour traiter les questions de durabilité vis-à-vis du gel et des attaques chimiques et biologiques, pour lesquelles des calculs ne sont en général pas appropriés ;
- **justification par des essais de chargement ou des essais sur modèles physiques**, qui suppose toutefois de maîtriser les effets de temps, d'échelle et de différences éventuelles des conditions de terrain entre l'essai et l'ouvrage à construire ;
- justification du projet et conduite des travaux par utilisation des observations faites sur l'ouvrage lui-même, approche appelée couramment **méthode observationnelle**. Cette démarche admet que l'on fasse un dimensionnement optimiste de l'ouvrage, à la condition d'avoir pris la mesure des risques encourus, de réaliser des mesures efficaces pendant les travaux et de disposer d'un programme de mesures d'urgence à mettre en œuvre si les observations montrent que le comportement réel de l'ouvrage sort des limites admises.

3.2.3 Rapports géotechniques

Les calculs nécessaires à la justification du projet doivent être présentés dans un **rapport de dimensionnement géotechnique**, qui complète le **rapport de reconnaissance géotechnique**, lui-même divisé en deux parties : un rapport de présentation des informations

géotechniques disponibles, y compris les caractéristiques géologiques et les autres données importantes pour le projet, et un rapport d'évaluation géotechnique des informations précédentes, indiquant les hypothèses adoptées pour établir les valeurs des paramètres géotechniques prises en compte dans le dimensionnement de l'ouvrage.

L'ampleur de ces rapports dépend de la complexité de l'ouvrage et des terrains. Pour les ouvrages très simples, une page peut être suffisante...

3.3 Fondations profondes

Conformément aux principes généraux présentés ci-avant, la justification d'une fondation sur pieux nécessite d'établir d'abord la liste des situations de calcul et des états limites. Les situations de calcul dépendent de la conduite du chantier. L'eurocode 7 donne une liste d'états limites (sans distinction entre états limites ultimes et états limites de service), que l'on peut grouper comme suit :

- **états limites ultimes :**
 - instabilité d'ensemble,
 - rupture du sol (capacité portante, arrachement, résistance transversale),
 - rupture du pieu (en compression, traction, flexion, flambement ou cisaillement),
 - rupture simultanée du pieu et du sol,
 - tassement ou soulèvement excessif ;
- **états limites de service :**
 - tassement ou soulèvement excessif,
 - vibrations.

Les actions doivent être choisies dans une liste générale, commune à tout l'eurocode 7 et comportant les points suivants :

- le poids des sols, des roches et de l'eau ;
- les contraintes existant dans le terrain ;
- les pressions de l'eau libre et de l'eau souterraine ;
- les forces d'écoulement de l'eau ;
- les charges permanentes, d'exploitation et d'environnement provenant des ouvrages ;
- les surcharges ;
- les forces d'amarrage ;
- les déchargements et excavations ;
- les charges de circulation ;
- les mouvements dus aux exploitations minières ;
- les gonflements et retraits créés par la végétation, le climat ou les variations de l'humidité ;
- les mouvements dus au fluage ou au glissement des masses de sol ;
- les mouvements dus à la dégradation, à la décomposition, à l'autodensification ou à la dissolution des terrains ;
- les mouvements et les accélérations dus aux tremblements de terre, explosions, vibrations et charges dynamiques ;
- les effets de température, y compris le soulèvement dû au gel ;
- les charges de glace ;
- les précontraintes imposées dans les ancrages et les butons.

Nous ne reprendrons pas ici la description des procédures de justification des fondations profondes, qui sont très semblables à celles en vigueur en France, elles-mêmes décrites en détail dans l'article *Fondations profondes* [C 248] de ce traité. Les règles imposées à la justification du dimensionnement des pieux utilisent en fait toutes les possibilités laissées par les principes généraux de l'eurocode 1 pour sortir des schémas de vérification fondés sur des formules de calcul analytiques où l'on vérifie qu'une fonction de la forme générale :

$$\Phi (\gamma_F \psi_i F_k, \eta X_k / \gamma_M, a_m)$$

est inférieure à un certain seuil. Dans cette équation, on introduit :

- les coefficients partiels γ_F sur les actions F ;
- les coefficients ψ_i de combinaison des actions ;

- les valeurs caractéristiques des actions F_k ;
- les coefficients η de conversion éventuelle des propriétés mesurées des matériaux en caractéristiques calibrées pour le calcul ;
- les valeurs caractéristiques X_k des propriétés des matériaux ;
- les coefficients partiels γ_M relatifs aux propriétés des matériaux ;
- et les valeurs moyennes a_m des paramètres géométriques.

Pour les fondations profondes, de nombreux aspects du dimensionnement sortent de ce formalisme de calcul, soit parce que l'on ne dispose pas de méthodes de calcul autres qu'empiriques, soit parce que l'on s'appuie sur des essais de pieux sur le chantier pour préciser le projet. On utilise pour cette raison des estimations de la résistance globale du sol au mouvement du pieu, que l'on traite comme des valeurs caractéristiques ou de calcul et qui sont issues directement d'essais de chargement ou de formules de calcul pour essais statiques ou dynamiques en place. Suivant le nombre d'essais réalisés, la résistance du sol au pieu est plus ou moins pénalisée pour déterminer les valeurs de calcul qui seront comparées aux effets des actions.

L'eurocode 7 envisage toutes les situations courantes de fondations profondes : pieux isolés et groupes de pieux, en compression ou en traction, avec ou sans charges latérales, avec ou sans frottement négatif ou soulèvement du sol. Le dimensionnement peut être fondé sur les propriétés mécaniques du sol en laboratoire, sur les résultats d'essais en place, sur les résultats d'essais de pieux sur le site.

3.4 Fondations superficielles

L'eurocode 7 donne la liste suivante pour les états limites à éviter pour les fondations superficielles :

- instabilité d'ensemble (fondations sur pente, en tête de talus, près d'une excavation ou d'un mur de soutènement, dans une zone minière ou à proximité d'ouvrages souterrains). Cette instabilité est analysée par les méthodes définies pour les ouvrages en terre (remblais et talus) ;
- défaut de capacité portante ;
- rupture par glissement ;
- rupture combinée dans le sol et dans l'ouvrage ;
- rupture de la structure due à un mouvement du sol de fondation ;
- tassements excessifs ;
- soulèvement excessif ;
- vibrations inacceptables.

Les actions à prendre en compte sont de façon générale les mêmes que pour les fondations profondes, en tenant compte de la rigidité globale de la structure, du niveau de l'eau dans le sol, de toutes les sollicitations extérieures diverses susceptibles d'influer sur leur comportement.

Après un rappel de conseils dans le choix des dimensions des fondations superficielles, y compris la dimension économique et les contraintes d'exécution des travaux, l'eurocode 7 indique que deux méthodes peuvent être utilisées pour justifier le dimensionnement d'une fondation superficielle :

- une méthode directe où l'on calcule séparément la stabilité et les déformations dans chaque situation de calcul, afin de vérifier directement que l'on n'a atteint aucun état limite ;
- et une méthode dans laquelle on détermine une capacité portante conventionnelle, estimée sur la base d'essais, de l'expérience antérieure et de la connaissance accumulée sur la prévention des états limites de service, et garantissant que l'on n'atteint aucun état limite ultime ou de service.

Cette seconde méthode est la méthode de dimensionnement en vigueur en France pour toutes les fondations superficielles courantes, comme prescrit par le DTU 13.12 et le fascicule 62-Titre V L'application de ces textes pour les détails du dimensionnement, en

complément des prescriptions de l'eurocode 7, a donc été autorisée par le Document d'Application Nationale français de l'eurocode 7 pour le dimensionnement courant des fondations superficielles, sous réserve d'un choix adéquat des paramètres de résistance du sol pour s'adapter à la définition de la condition de stabilité dans l'eurocode 7.

3.4.1 Vérification à l'état limite ultime

La condition de stabilité de la fondation superficielle vis-à-vis du poinçonnement s'écrit :

$$V \leq R$$

avec V charge de calcul à l'état limite ultime, appliquée normalement à la semelle de la fondation, incluant le poids de la fondation elle-même et des éventuels matériaux de remblai. Pour les calculs en conditions drainées, les pressions d'eau sont en général comptées parmi les actions mais, si l'eau est en état hydrostatique autour de la fondation, on peut utiliser les poids volumiques déjaugés des parties immergées,

R capacité portante de calcul du sol de fondation sous charge normale à la surface, en incluant les effets des inclinaisons et excentricité éventuelles. Cette valeur est calculée en utilisant les valeurs de calcul des paramètres géotechniques. La valeur de R est donc le produit de la méthode de calcul analytique ou numérique ou empirique utilisée par l'ingénieur géotechnicien dans les conditions du projet. La détermination de R dépend naturellement du type de situation (à court terme ou à long terme) que l'on considère. L'eurocode 7 fournit en annexe (informative) une méthode de calcul analytique (expressions de N_{γ} , N_c et N_q , avec des coefficients de correction pour la forme, l'inclinaison et l'excentricité) et la formule de calcul au pressiomètre. Une autre annexe donne une méthode d'évaluation de la capacité portante des fondations sur rocher.

Des formules de même structure générale sont données pour la stabilité au glissement sur la base de la fondation.

Il faut exécuter ces calculs pour tous les cas (A, B et C, cf. § 2.6) pertinents pour le problème considéré, avec des pondérations différentes des actions et des résistances du sol, et prendre la géométrie maximale de la fondation superficielle. La pondération des coefficients partiels pour les propriétés du sol est donnée dans un tableau de l'eurocode 7 pour les caractéristiques classiques des sols en laboratoire (cohésion effective, angle de frottement interne, cohésion non drainée ou résistance à la compression simple). Mais ce travail n'a pas été fait pour les essais en place, la seule condition, assez vague en pratique, étant que le niveau de sécurité soit le même.

3.4.2 Autres vérifications

Pour les calculs de justification correspondant aux autres états limites ultimes ou de service de la liste précédente, l'eurocode 7 donne un certain nombre de recommandations sur les points à ne pas oublier, mais laisse le projeteur libre de la méthode de calcul. Une annexe informative décrit le principe du calcul des tassements sous les fondations superficielles.

Les dimensions de fondations superficielles justifiées selon l'eurocode 7 et selon les pratiques actuelles dans différents pays ont été comparées lors des travaux préliminaires à la rédaction de l'eurocode 7. Les dimensions des fondations superficielles calculées ne sont pas très différentes dans les cas étudiés, si l'on tient compte de l'ensemble des conditions sur la stabilité et sur les déformations des ouvrages aux états limites ultimes et de service. Mais, comme noté ci-avant, le cas des essais en place n'a pas été étudié et il reste donc encore des travaux importants à faire, pendant la période

d'application expérimentale de l'eurocode 7, avant de préciser les règles qui s'appliquent dans l'ensemble des situations rencontrées en pratique. C'est une des raisons qui ont conduit les responsables de la normalisation française à affirmer la validité de l'application des règles détaillées des DTU et du fascicule 62-Titre V dans la pratique française, en complément aux principes de l'eurocode 7.

3.5 Ouvrages de soutènement

Pour les ouvrages de soutènement, l'eurocode 7 suggère de distinguer les murs-poids, les rideaux encastrés et les soutènements mixtes. La liste des états limites à éviter est la suivante pour **tous les types de soutènements** :

- instabilité d'ensemble ;
- rupture d'un élément de structure (paroi, ancrage, buton, etc.) ou des liaisons entre ces éléments ;
- rupture combinée dans le sol et la structure ;
- mouvements excessifs ;
- défaut d'étanchéité ;
- érosion excessive du remblai ;
- modification inacceptable des écoulements souterrains.

Pour les **murs-poids** et les **ouvrages mixtes**, il faut aussi considérer les états limites suivants :

- rupture par poinçonnement du sol sous la base du mur ;
- rupture par glissement du mur sur sa base ;
- rupture par renversement du mur.

Pour les **rideaux encastrés**, il faut par ailleurs prendre en compte les états limites suivants :

- rupture par rotation ou translation du mur ;
- rupture par perte d'équilibre vertical du mur.

La plupart des actions énumérées pour les fondations profondes peuvent s'appliquer aux ouvrages de soutènement. La définition des situations de calcul est particulièrement importante dans ce cas, à cause du nombre parfois élevé des étapes de réalisation des travaux, avec des phases provisoires dont certaines peuvent être plus instables que la situation finale de l'ouvrage de soutènement terminé.

Les procédures de justification des ouvrages de soutènement entrent assez bien dans le moule général des eurocodes, avec des méthodes de calcul pour passer des propriétés mécaniques des sols aux efforts globaux dont le bilan permet de vérifier la stabilité. L'eurocode 7 donne en annexe (règle d'application) des abaques de calcul des efforts de poussée et de butée dans les sols. Ces efforts doivent être calculés avec les valeurs de calcul des paramètres de résistance au cisaillement, déterminées comme indiqué ci-avant. On vérifie ensuite la condition d'équilibre global des actions et des réactions du sol, sans coefficient supplémentaire. Les règles décrites dans l'eurocode 7 sont en bonne concordance avec la pratique courante dans la plupart des pays, telle que décrite dans les articles [C 242], [C 244] et [C 252] du présent traité. Les méthodes de calcul au module de réaction, dont l'emploi est devenu fréquent en France, ne sont pas mentionnées explicitement, ni d'ailleurs exclues. Leur utilisation est possible pour les calculs en déformations.

Pour les ancrages, des procédures d'essai d'évaluation de la résistance d'ancrage et d'essai de réception sont prévues. Les conditions d'utilisation des résultats des essais préliminaires pour dimensionner les ancrages, comme cela se fait pour les pieux, sont précisées.

3.6 Ouvrages en terre

Le chapitre relatif aux ouvrages en terre (remblais et talus) est le plus petit des chapitres de l'eurocode 7 consacrés aux ouvrages. De fait, il contient des règles générales qui nécessiteront un approfondissement sensible si l'on veut un jour utiliser l'eurocode 7 pour justifier le dimensionnement détaillé de ce type d'ouvrages géotechniques.

La liste des états limites à prendre en compte pour les ouvrages en terre est la suivante :

- perte de stabilité globale ou défaut de capacité portante ;
- rupture par érosion superficielle ;
- rupture par érosion de surface ;
- rupture par phénomène de renard (soulèvement hydraulique) ;
- déformations excessives pour les ouvrages voisins ;
- déformations excessives pour l'exploitation de l'ouvrage lui-même ;
- effet de l'érosion sur la surface de l'ouvrage.

Les actions doivent être définies en tenant compte de la liste générale donnée pour les fondations profondes (§ 3.3), des différents processus de construction des ouvrages et de l'évolution possible de leur voisinage (nouvelles constructions, pluies et inondations, températures, vie animale, etc.).

Le texte de l'eurocode 7 ne spécifie aucune méthode de calcul pour les ouvrages en terre. Seuls les objectifs des calculs et les conditions à vérifier sont rappelés, ce qui laisse actuellement une grande liberté pour effectuer le dimensionnement de ce type d'ouvrage. Les prochaines années devraient voir préciser les règles de dimensionnement dans le formalisme de la méthode des coefficients partiels.

4. Conclusion

Les différents chapitres de l'eurocode 7 définissent les principes de la justification de la plupart des ouvrages géotechniques, avec des degrés de détail variables selon les catégories d'ouvrages. Comme on l'a noté plusieurs fois, le détail des méthodes de dimensionnement n'est pas imposé et des variantes peuvent être utilisées sous la réserve qu'elles soient aussi fiables que les méthodes courantes décrites dans le texte, ce qui est le cas des méthodes particulières utilisées depuis longtemps dans les différents pays membres du CEN. L'eurocode 7 respecte donc la liberté de conception et de justification des ouvrages traditionnellement admise en géotechnique. Mais cette liberté rend particulièrement

important le contenu du paragraphe du premier chapitre de l'eurocode 7 qui dit que les hypothèses suivantes sont admises :

- « — les données nécessaires aux calculs sont recueillies, notées et interprétées ;
- les ouvrages sont calculés par un personnel possédant une qualification et une expérience appropriées ;
- une communication adéquate existe entre les différents personnels chargés du recueil des données, du calcul et de l'exécution ;
- une surveillance et un contrôle de qualité appropriés sont assurés dans les usines, dans les entreprises et sur le chantier ;
- l'exécution est effectuée conformément aux normes et spécifications correspondantes, par un personnel possédant la qualification et l'expérience appropriées ;
- les matériaux et produits de construction sont utilisés conformément aux spécifications du présent eurocode, ou suivant les spécifications propres aux matériaux ou produits utilisés ;
- l'ouvrage sera entretenu de manière convenable ;
- l'ouvrage sera exploité conformément aux objectifs définis lors du dimensionnement. »

Concrètement, ces lignes rappellent que l'existence d'un eurocode pour le calcul géotechnique n'a pas fait disparaître le besoin d'une connaissance détaillée des sols et des roches, des méthodes de reconnaissance géotechnique, des méthodes de calcul, du comportement des ouvrages, des méthodes de construction et des méthodes de surveillance, qui sont traitées dans les autres chapitres de la rubrique *Géotechnique. Mécanique des sols et des roches* du présent traité.

Enfin, l'eurocode 7 dans sa version actuelle (ENV 1997-1 : 1994) est un document provisoire, qui sera soumis à révision avant la fin des années 90, en fonction de l'expérience acquise dans son application, avec le complément de normes plus détaillées par types d'ouvrages. La commission de l'AFNOR chargée du suivi de l'eurocode 7 (Commission de coordination de la normalisation dans le domaine de la géotechnique) souhaite recevoir le maximum d'avis et de communications sur l'opinion des utilisateurs de ce texte pendant cette période d'expérimentation collective.

Eurocode 7 : calcul géotechnique

par **Jean-Pierre MAGNAN**

*Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Docteur ès Sciences
Directeur technique au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées*

Normalisation

Comité Européen de Normalisation (CEN)

Eurocode 7. Prénorme ENV 1997-1 : 1994.

AFNOR (parution prévue en 1995).

Documents techniques unifiés

DTU 13.11 3-1988 Fondations superficielles (norme DTU P 11-211).

DTU 13.12 3-1988 Règles pour le calcul des fondations superficielles (norme DTU P 11-711).

DTU 13.2 9-1992 Travaux de fondations profondes pour le bâtiment (norme expérimentale P 11-212).

Réglementation

Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux.

Fascicule n° 62-Titre V *Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil*, 182 p, 1993.

Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports.

Diffusion : Direction des journaux officiels.