

SECONDE GENERATION DE L'EUROCODE 7 : OU EN-EST-T-ON ?

SECOND GENERATION OF EUROCODE 7: WHAT IS THE SITUATION?

Sébastien BURLON¹, Jean-Paul VOLCKE²

¹ Terrasol - Setec, Paris, France

² Fayat Fondations, Paris, France

RÉSUMÉ – La seconde génération de l'Eurocode 7 est actuellement en cours de rédaction. Elle sera publiée vers la fin de l'année 2023. Il s'agit ici de présenter les principales modifications validées par le comité de rédaction par rapport à l'ancienne version et les sujets de discussion à fort enjeu. Les différents aspects de l'ingénierie sont abordés : reconnaissance des terrains, sécurité des ouvrages, suivi géotechnique, etc.

ABSTRACT – The second generation of Eurocode 7 is now being drafted. It will be published at the end of 2023. The main modifications discussed and agreed by the technical committee in charge EN 1997 are presented. Some important issues to be discussed are highlighted. Various aspects of the geotechnical engineering are addressed: ground investigation, safety of geotechnical structures, monitoring, etc.

1. Introduction

Depuis 2015, l'Eurocode 7 comme les autres Eurocodes est entré dans sa phase effective de révision. Le travail est réalisé par six équipes projet (PT) sous la responsabilité du comité technique en charge de l'Eurocode 7 (TC 250/SC7). L'Eurocode 7 inclut désormais trois parties : règles générales, investigations géotechniques et calcul des ouvrages géotechniques (pentes, déblais et remblais ; fondations superficielles ; fondations profondes ; ancrages, terrains renforcés avec les clous, les géotextiles, les boulons et la terre armée ; amélioration des terrains). Les tunnels et les barrages de grande hauteur ne sont pas traités directement.

Les six équipes projet (PT) qui ont apporté ou vont apporter leur contribution abordent les thèmes suivants :

- PT1 : élaboration des principes d'harmonisation et d'organisation du texte ;
- PT2 : rédaction de la partie 1 de l'Eurocode 7 ;
- PT3 : rédaction de la partie 2 de l'Eurocode 7 ;
- PT4 : rédaction des chapitres de l'Eurocode 7 relatifs aux pentes, aux fondations superficielles, aux fondations profondes et à l'amélioration des terrains ;
- PT5 : rédaction des chapitres de l'Eurocode 7 relatifs aux soutènements, aux tirants d'ancrage et à l'amélioration de sols ;
- PT6 : mise en cohérence des trois parties de l'Eurocode entre elles et avec les autres Eurocodes puis insertion de la mécanique des roches et des sollicitations dynamiques et cycliques dans les différentes parties.

Dans le cadre de cet article, il convient seulement de se focaliser sur les parties 1 et 2 pour lesquelles les textes sont stabilisés dans leurs grandes lignes. Le contenu de la partie 3 est brièvement présenté mais il n'est pas encore possible d'en exposer les principaux changements.

2. L'Eurocode 7 – Partie 1

La révision de l'Eurocode 7 a comme premier objectif d'introduire deux nouvelles thématiques : d'une part, la mécanique des roches de manière à traiter sur le même plan

sols et roches et d'autre part, les chargements dynamiques (hors charge sismique) et cycliques.

Pour la mécanique des roches, les travaux engagés laissent penser que ce domaine sera largement traité et permettront lors d'un projet géotechnique en terrain rocheux de pouvoir appliquer les Eurocodes, ce qui n'est pas le cas actuellement. De nombreuses définitions ont été proposées pour décrire les massifs rocheux d'un point de vue géométrique ou mécanique. Les spécificités de comportement des roches sont aussi abordées.

Pour les charges dynamiques et cycliques, l'objectif est seulement de présenter certaines recommandations permettant la prise en compte de ce type de charges.

2.1. Modèle géotechnique et modèle de conception géotechnique

Le modèle de terrain et le modèle de conception géotechnique forment ensemble un nouveau concept permettant de mieux décrire la manière dont les connaissances du terrain relative à un site doivent être synthétisées. Le modèle géotechnique est un modèle conceptuel de représentation du terrain indépendant de l'ouvrage à construire tandis que le modèle de conception géotechnique intègre les différents états limites à considérer en fonction de l'ouvrage géotechnique projeté. Le modèle géotechnique est décrit par la partie 2 de l'Eurocode 7 et comprend les valeurs dérivées des propriétés des terrains. Le modèle de conception géotechnique comprend les valeurs représentatives des propriétés des terrains qui prennent en compte à la fois l'incertitude spatiale des propriétés des terrains et le mécanisme de déformation ou de rupture considéré. L'accent a été mis sur la fiabilité des données intégrées à ces modèles géotechniques : il est important de rappeler que les résultats d'un calcul valent moins que les hypothèses ayant servi à les obtenir.

2.2 Les catégories géotechniques

La catégorie géotechnique permet pour les pays qui le souhaitent de définir un programme minimal d'investigations géotechniques ainsi que des niveaux variables de contrôle, de suivi ou de qualification (ce dernier aspect serait seulement appliqué dans les pays où des qualifications personnelles existent). La catégorie géotechnique est définie comme une combinaison de la classe de conséquence d'un ouvrage (qui traduit son importance en termes de risques humains, sociaux et économiques) et de la classe de complexité géotechnique qui représente toutes les incertitudes géotechniques du site considéré (hétérogénéité des terrains, comportement atypique, etc.). La figure 1 ci-dessous synthétise les liens entre ces différents concepts.

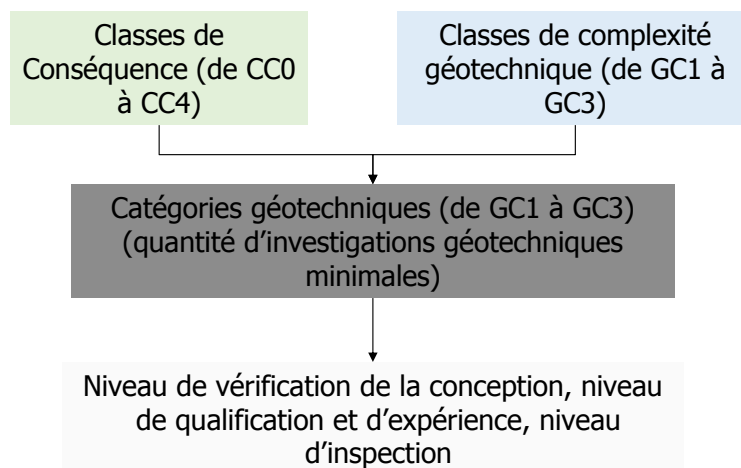


Figure 1. Détermination et rôle des catégories géotechniques

2.3 Les procédures de justification

Comme dans la précédente version de l'Eurocode 7, quatre procédures sont proposées pour la justification des ouvrages géotechniques. Ces procédures comprennent :

- des méthodes de calcul basées sur l'application des coefficients partiels ;
- des méthodes forfaitaires ;
- des méthodes basées sur des essais ;
- la méthode observationnelle.

2.4 Les valeurs représentatives des propriétés géotechniques

Le problème de la détermination des valeurs des propriétés des terrains est désormais présenté en considérant deux types de valeurs :

- des valeurs « nominales » qui reposent sur un jugement d'expert étayé par des expériences comparables ;
- des valeurs caractéristiques qui reposent sur le calcul d'une valeur moyenne prudente fiable à 95 %. Au sein d'une couche de terrain jugée homogène, cette valeur est obtenue au moyen des équations suivantes :

$$X_k = X_{mean} - k_N \sigma = X_{mean}(1 - k_N \cdot V) \quad (1)$$

$$X_k = e^{Y_{mean} - k_N \sigma} = e^{Y_{mean}(1 - k_N \cdot V)} \quad (Y = \ln X) \quad (2)$$

$$k_N = \frac{t_{95, N-1}}{\sqrt{N}} \quad \text{et} \quad V = \frac{\sigma}{X_{mean}} \quad (3)$$

Avec : X_{mean} la moyenne arithmétique, σ l'écart-type, V le coefficient de variation, N le nombre de valeurs considérées et $t_{95, N-1}$ le fractile à 5% de la loi de Student avec $N - 1$ degrés de liberté.

Les deux procédures peuvent être mises en œuvre en parallèle et le choix entre ces deux valeurs est laissé libre. L'objectif est d'obtenir une valeur représentative sur laquelle il est possible le cas échéant d'appliquer des coefficients partiels.

2.5 Le format de sécurité

Les concepts d'approches de calcul ont été abandonnés et ont laissé place à deux principales manières d'aborder la sécurité des ouvrages géotechniques :

- la première consiste à pondérer les résistances géotechniques (Resistance Factor Approach – RFA) : cette manière est celle couramment utilisée pour la justification des fondations superficielles et profondes pour lesquelles les facteurs partiels sont appliqués sur les termes de portance, de résistance au glissement, etc. Elle couvre aussi les approches visant à exprimer le niveau de sécurité comme le rapport entre la résistance mobilisable et la résistance mobilisée ;
- la seconde consiste à pondérer les propriétés intrinsèques de résistance au cisaillement (Material Factor Approach – MFA) : cette manière est celle couramment utilisée pour la justification de la stabilité des pentes pour lesquelles les facteurs partiels sont appliqués sur la cohésion et l'angle de frottement.

Hormis quelques ouvrages très spécifiques comme les pentes, le choix entre les deux approches est laissé libre pour chaque pays ou chaque projet. En effet, en fonction de la méthode de calcul, des paramètres de calcul utilisés, les deux approches de pondération peuvent avoir leurs avantages et leurs inconvénients.

Ces approches de la sécurité des ouvrages géotechniques sont à combiner avec des combinaisons de charge qui reflètent indirectement les anciennes approches de calcul. Ces combinaisons de charge consistent à appliquer classiquement des coefficients partiels :

- soit sur les actions permanentes γ_G et sur les actions variables γ_Q ;
- soit sur les effets des actions γ_E .

Il est ainsi possible d'établir le tableau suivant pour différents mécanismes de rupture : ceux relevant des états limites géotechniques et structuraux, ceux relevant de limite

d'équilibre (c'est-à-dire les états limites ne mettant en jeu ni la résistance du terrain ni la résistance de la structure portée), ceux relevant des états limites liés à l'eau.

Il est important de noter que l'approche de calcul 3 a formellement disparu. Le concept d'actions géotechniques qui en découlaient est néanmoins conservé mais présente une définition plus souple : il s'agit de désigner les actions traduisant l'interaction entre une structure et le terrain ; par exemple, la poussée, le frottement négatif ou les pressions d'eau.

Tableau 1. Exemple de tableau

Combinaison de charges		Types d'états limites géotechniques			
		Rupture et déformation excessive		Equilibre statique et soulèvement (dû à l'eau)	Rupture hydraulique
		MFA	RFA	MFA et/ou RFA	
DC1	$\gamma_Q > \gamma_G > 1.0$	X (Ancienne approche de calcul DA1-1)	X (Ancienne approche de calcul DA2)		Vérifications spécifiques : - la contrainte totale effective doit rester supérieure à 0 ; - le gradient hydraulique ne doit pas excéder un certain niveau.
DC2	$\gamma_Q > \gamma_G > 1.0$ $\gamma_G = 1.0 ; \gamma_Q > 1.0$			X	
DC3	$\gamma_G = 1.0 ; \gamma_Q > 1.0$	X (Ancienne approche de calcul DA1-2)			
DC4	$\gamma_E > 1.0 ; \gamma_Q > 1.0$		X (Ancienne approche de calcul DA2*) EFA		

2.6 Les niveaux d'eau

La question du choix des niveaux d'eau a abouti à la définition de différents niveaux comme le représente la figure 2 qui est assez similaire de celle utilisée en France. La figure ne concerne pas le niveau d'eau mais le niveau piézométrique dans une couche de terrain homogène (unité géotechnique).

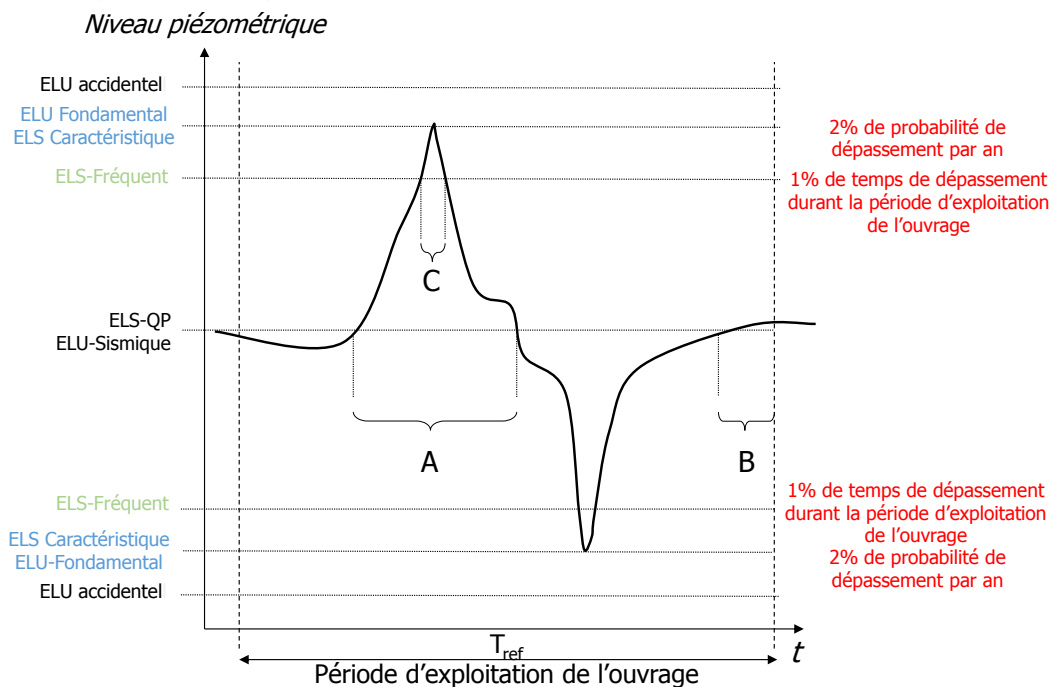


Figure 2. Détermination des niveaux piézométriques

2.7 Les états limites ultimes liés à l'eau

Deux types d'états limites liés à l'eau sont considérés.

Le premier traduit des mécanismes de soulèvement en distinguant :

- les structures rigides :

$$U_{dst;d} + G_{dst;d} + Q_{dst;d} - G_{stb;d} \leq R_d \quad (4)$$

- les terrains :

$$u_{dst;d} + \sigma_{v;d} \leq 0 \quad (5)$$

Le second est relatif à l'écoulement de l'eau et traduit deux mécanismes différents :

- l'un à une échelle locale avec une limitation du gradient hydraulique (cette vérification couvre les phénomènes d'érosion interne, d'érosion régressive, etc.) :

$$i_d \leq i_{cd} \quad (6)$$

- l'autre à une échelle globale avec une condition sur les contraintes verticales effectives :

$$u_d \leq \gamma_{w,k}(z + h_w) + \gamma_{HYD}(\gamma_k - \gamma_{w,k})z \quad (7)$$

Pour l'équation 6, aucune valeur précise de gradient hydraulique limite n'est donnée. En France, un seuil de 0.67 sera probablement retenu mais il est important de préciser que cette valeur ne couvre pas toutes les situations et peut être largement diminuée, par exemple dans le cas de sables lâches homométriques, ou largement augmentée dans le cas de matériaux rocheux.

L'équation 7 traduit le fait que la contrainte verticale effective doit rester positive dans le cas d'un écoulement d'eau ascendant. L'équation 7 peut être écrite de la manière suivante :

$$\frac{\sigma'_{v,0} - \sigma'_{v,d}}{\sigma'_{v,0}} \leq \gamma_{HYD} \quad (8)$$

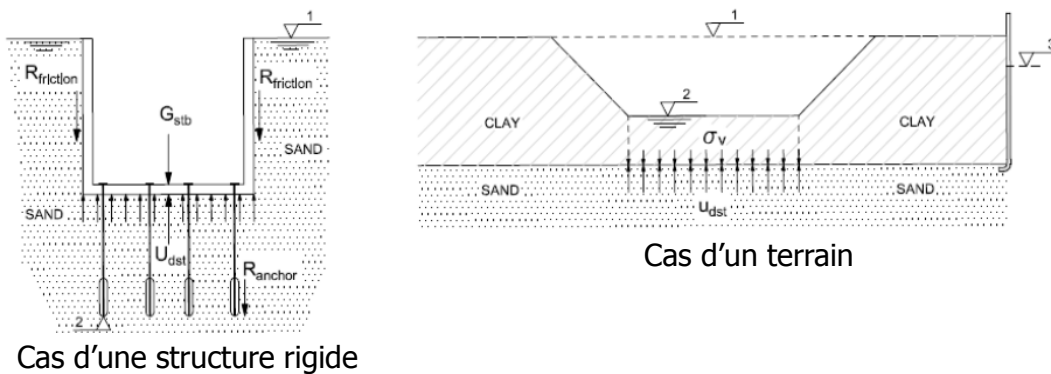


Figure 3. Mécanisme de soulèvement

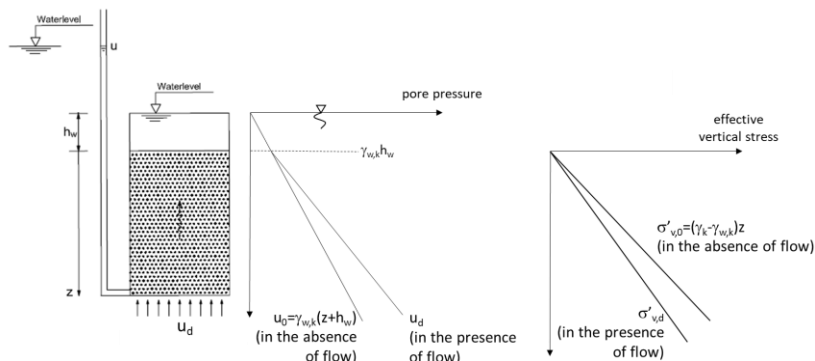


Figure 4. Vérifications relatives à la contrainte verticale effective

2.8 L'utilisation des modèles numériques

Les modèles numériques font l'objet d'une attention particulière de par leur développement important dans le domaine de l'ingénierie géotechnique au cours des 20 dernières années. Par méthode numérique, on entend méthode aux coefficients de réaction, méthode des éléments finis, méthode des différences finies, méthode des éléments discrets, etc. La principale question traitée est celle du format de sécurité lié à l'utilisation de ces méthodes. Deux principales approches sont présentées et peuvent être appliquées de manière conjointe ou non :

- l'approche présentée sur la gauche de la figure 5 correspond à un calcul numérique dans lequel la résistance géotechnique est estimée en comparant la résistance mobilisée à la résistance mobilisable. Les valeurs d'efforts obtenues sont considérées comme des valeurs caractéristiques et sont multipliées par 1.35 pour être traitées comme des valeurs de calcul et être comparées aux valeurs limites fournies par les Eurocodes structuraux selon que la structure considérée est constituée de béton, d'acier ou de bois ;
- l'approche présentée sur la droite de la figure 5 correspond à un calcul numérique dans lequel une procédure de réduction de propriétés de cisaillement est mise en œuvre à l'issue de chaque situation d'équilibre. Les valeurs d'efforts obtenues à la fin des procédures de réduction de propriétés de cisaillement sont considérées comme des valeurs de calcul. Au cours de calcul, les efforts dans la structure peuvent être limités à 1.35 fois la valeur caractéristique obtenue précédemment ou à la valeur fournie par les Eurocodes structuraux.

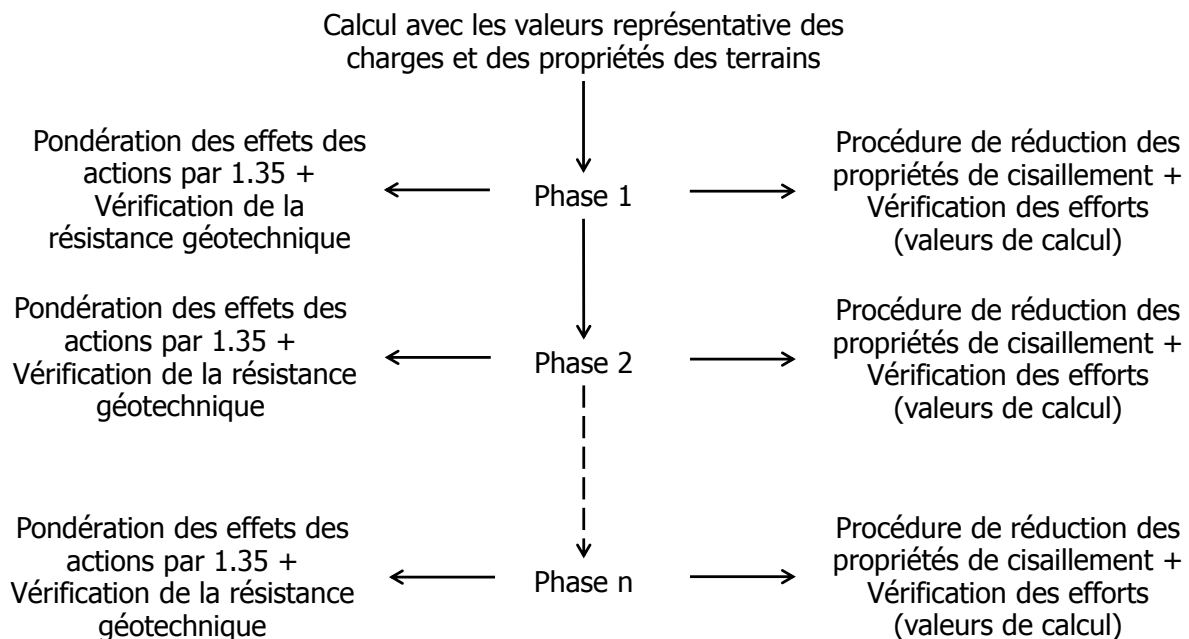


Figure 5. Les 2 approches des calculs par méthodes numériques

2.9 Exécution

Un chapitre de l'Eurocode 7 – Partie 1 est dédié à différents thèmes en rapport avec l'exécution des ouvrages géotechniques : la supervision des travaux, l'inspection des travaux, le suivi des travaux notamment en ce qui concerne les plans d'instrumentation et la maintenance des ouvrages géotechniques.

2.10 Annexes

L'Eurocode 7 – Partie 1 comprend un certain nombre d'annexes dont les plus significatives sont :

- l'annexe B avec des valeurs limites pour certaines structures ;
- l'annexe G avec des indications sur la qualification du personnel en charge des études géotechniques (il est important de noter que cette annexe informative n'est absolument pas en phase avec la pratique française).

3. L'Eurocode 7 – Partie 2

3.1 L'organisation du texte

La structure du texte a été complètement modifiée par rapport à la précédente version de l'Eurocode Partie 2 qui était organisée autour d'aspects relevant de l'organisation d'une campagne de reconnaissances géotechniques et des différents types d'essais géotechniques en laboratoire ou sur site. Dorénavant, l'Eurocode 7 – Partie 2 est organisée autour de la présentation des propriétés mécaniques, hydrauliques et thermiques des sols et des roches. Le premier chapitre est néanmoins dédié à la construction du modèle de terrain en insistant sur la nécessité d'intégrer des aspects géologiques, hydrogéologiques, géotechniques et géomécaniques. L'objectif est bien de disposer d'un modèle conceptuel de représentation du terrain. Des développements spécifiques sur les propriétés de cisaillement et les modules de déformation sont ensuite présentés. Pour les propriétés de cisaillement, les critères de rupture les plus simples pour les sols et les roches sont décrits. Pour les modules de déformation, leur variation avec le niveau de déformation est présentée. La présentation de ces différents paramètres se veut être compatible avec l'utilisation de méthodes numériques mettant en œuvre des lois de comportement complexes avec une élasticité non linéaire et des mécanismes plastiques avec écrouissage. Néanmoins, il ne s'agit pas de privilégier un code de calcul particulier : seuls les principes sont présentés. Un chapitre relatif à la prise en compte des chargements sismiques, dynamiques ou cycliques est aussi proposé de manière à compléter les aspects de l'Eurocode 7 Partie 1 relatifs aux chargements dynamiques et cycliques. Enfin, le dernier chapitre décrit la structure d'un rapport géotechnique avec les principales étapes d'un projet et une approche graduée de prise en compte des risques géotechniques.

3.2 Les valeurs dérivées

Un des points clefs de l'Eurocode 7 – Partie 2 est le concept de valeurs dérivées. Ce terme désigne les propriétés mécaniques, hydrauliques ou thermiques obtenues à partir des essais géotechniques en laboratoire ou sur site. Le mode d'obtention peut être plus ou moins direct en fonction de la grandeur recherchée. Par exemple, la cohésion et l'angle de frottement sont des paramètres dérivés des chemins de contraintes mesurés lors d'un essai de cisaillement. L'interprétation des essais est reliée aux états limites à considérer lorsque l'ouvrage à concevoir est défini. L'usage de corrélations est aussi mis en valeur dans la mesure où elles sont validées sur des expériences comparables.

4. L'Eurocode 7 – Partie 3

L'Eurocode 7 – Partie 3 est actuellement en cours de rédaction. Cette partie sera organisée autour de différents chapitres traitant les ouvrages géotechniques suivants : les pentes, les fondations superficielles, les fondations profondes, les soutènements, les tirants d'ancrage, les sols renforcés, l'amélioration des terrains. L'objectif est de fournir pour chacun de ces ouvrages géotechniques des méthodes de calcul permettant une application directe de l'Eurocode 7 – Partie 3 sans le besoin de faire appel à des normes

d'application nationale. Le travail d'harmonisation à réaliser est colossal car chaque pays au cours de son histoire a acquis une expérience propre plus influencée par sa géologie et son organisation professionnelle (influence des pouvoirs publics, mode de passation des marchés, système assurantiels, etc.) que par de réels choix techniques et scientifiques.

5. Conclusions

Les travaux de rédaction relatifs à l'Eurocode 7 entrent dans leur dernière phase. Une seule phase de commentaires sera encore organisée entre novembre 2020 et janvier 2021. Ensuite suivront les différentes phases d'enquête jusqu'à la publication finale du texte en 2023 théoriquement puis la révision de toutes les normes d'application nationale à partir de 2024 ou 2025. En ce qui concerne les principes généraux et les investigations, il serait surtout question d'enrichissement (avec l'insertion de la mécanique des roches et des charges dynamiques) mais notre pratique française ne devrait qu'être peu impactée sur le fond.

Pour les ouvrages géotechniques qui étaient déjà bien décrits dans la version de 2005, les changements pourront paraître mineurs: il sera cependant nécessaire de les anticiper. Les ouvrages qui n'étaient que peu ou pas envisagés en 2005 devront faire l'objet d'une lecture plus attentive car les changements d'approche pourraient être plus significatifs. Les changements présentés ne vont pas changer radicalement la manière de dimensionner les ouvrages géotechniques mais vont malgré tout apporter des évolutions de certaines pratiques françaises qu'il est prudent d'anticiper. On ne doit cependant pas conclure un état des lieux sur la révision de l'Eurocode 7 sans citer l'action qui est menée dans le cadre des révisions des autres Eurocodes, afin qu'ils prennent mieux en compte les spécificités des ouvrages géotechniques.

6. Références bibliographiques

- EN 1997-1 (2005) Eurocode 7 – Partie 1 : Calcul géotechnique – Règles générales, Comité Européen de Normalisation
- EN 1997-2 (2007) Eurocode 7 – Partie 2 : Calcul géotechnique – Reconnaissances des terrains et essai, Comité Européen de Normalisation
- Pr EN 1997-1 (2019) Eurocode 7 – Part 1 : Geotechnical design – General rules, Comité Européen de Normalisation
- Pr EN 1997-2 (2019) Eurocode 7 – Part 2 : Geotechnical design – Ground investigation, Comité Européen de Normalisation
- Pr EN 1997-3 (2019) Eurocode 7 – Part 3 : Geotechnical design – Geotechnical structures, Comité Européen de Normalisation