

Considérations sur le dimensionnement des pieux ; Eurocode 7 et SIA 267

1. Introduction

1.1 Généralités

La réalisation de pieux, initialement uniquement battus et en bois, est connue depuis l'antiquité pour la construction d'ouvrages d'Art. Au Moyen-âge, l'utilisation des pieux en fondations devient très courante ; les procédés mis en œuvre se perfectionnent au cours de la Renaissance puis de la révolution industrielle. Au passage du XIX^e au XX^e siècle, l'adoption des pieux d'acier et de béton armé, l'utilisation des marteaux diesel, pneumatique, à vapeur, ainsi que le développement d'un grand nombre de types de pieux moulés en place marquent les premiers changements technologiques importants depuis l'époque romaine. Avec l'évolution des techniques et le développement de procédés apparentés l'ingénieur dispose actuellement d'une gamme de moyens extrêmement étendue qui va du micropieu au pieu foré de gros diamètre.

Les formules permettant d'estimer la portance sont également, et bien évidemment, intimement liées au développement technique et aux procédés mis en œuvre. Les premières formules permettant d'estimer la capacité portante sont ainsi liées au battage tandis que les formules analytiques, dites statiques, pour le calcul des pieux forés datent principalement de la seconde moitié du XX^e siècle. L'art de construire de chaque pays, fonction entre autre des conditions géologiques et des matériaux à disposition, se retrouve également dans la réglementation et les documents normatifs.

1.2 Normes européennes, Eurocodes

Afin d'harmoniser les réglementations dans le domaine de la construction et de la sorte faciliter les échanges commerciaux, l'Union Européenne a pris l'initiative d'établir un ensemble de règles techniques pour le dimensionnement des ouvrages (Eurocodes). L'élaboration de cette réglementation supranationale fut confiée au Comité Européen de Normalisation (CEN) dont la Suisse, représentée par la SIA et la VSS, est membre. Il est prévu que l'ensemble des versions définitives des Eurocodes soit publié d'ici fin 2006.

Ces documents normatifs, qui dans leur version provisoire (prénorme) constituaient une alternative aux règles nationales en vigueur dans les Etats membres du CEN, sont appelés à les remplacer. En 2010 au plus tard, les normes nationales devront être ou retirées ou complètement harmonisées aux normes européennes. Des préfaces nationales ou, le cas échéant, des documents nationaux d'application pourront adapter certaines exigences locales aux Eurocodes, sans toutefois en altérer les principes.

1.3 Normes SIA, Swisscodes

La Suisse s'étant engagée à adopter les Eurocodes, et plutôt que d'accompagner chaque parution des Eurocodes d'un document d'application spécifique aux conditions suisses, la SIA a décidé de créer une nouvelle série complète de normes compatibles avec les Eurocodes, les Swisscodes. Ces Swisscodes, ou normes SIA 260 à 267 [1], devraient donc remplir à terme le rôle de documents nationaux d'application.

La première norme suisse traitant des fondations profondes, régissant ainsi les critères minimaux à respecter dans le dimensionnement et l'exécution des pieux, date de 1975 [2], ce qui est relativement tardif, notamment par rapport à l'Amérique du Nord où des documents normatifs étaient déjà en vigueur dans les années 1960. La révision de cette norme dans les années 1990 a conduit à repenser totalement la norme en prenant en compte les « nouveaux » concepts de dimensionnement aux facteurs partiels, introduits dans les normes structures et présents dans la version provisoire (prénorme) de l'Eurocode 7. La norme SIA V 192 « *Pieux* » de 1996 [3] reprend ainsi pratiquement l'entier de cette pré-norme ENV 1997-1 [4].

Avec le projet Swisscodes, l'entier des normes de dimensionnement sur les structures porteuses a été retravaillé et harmonisé pour former un ensemble cohérent. La norme SIA 267 « *Géotechnique* » [5] contient les principes et dispositions à prendre en considération en géotechnique.

2. Comparaisons entre l'Eurocode 7 et la norme SIA 267

2.1 L'Eurocode 7

L'Eurocode 7, ou norme EN 1997, traite des aspects géotechniques du calcul des bâtiments et ouvrages de génie civil. Sa première partie (EN 1997-1) [7], intitulée « *Eurocode 7 Calcul géotechnique - Partie 1 : Règles générales* », a été promulguée et publiée par le CEN en novembre 2004. Elle donne des instructions et des conseils (règles fondamentales) pour le calcul géotechnique.

La partie 2 (EN 1997-2) [8] « *Reconnaissances des terrains et essais* » est rédigée et devrait être disponible au printemps 2006. Elle regroupe les anciennes normes provisoires ENV 1997-2 « *Calcul sur la base d'essais de laboratoire* » et ENV 1997-3 « *Calcul sur la base d'essais en place* ». Cette seconde partie de la EN 1997 est consacrée aux exigences essentielles pour les appareillages, les procédures d'essais, la présentation des résultats, et pour l'interprétation des paramètres mesurés.

2.2 Norme SIA 267

La norme SIA 267 « *Géotechnique* » [5] élaborée dans le cadre des Swisscodes traite des exigences régissant la reconnaissance et la détermination des paramètres de terrain de fondation ainsi que les calculs et dimensionnements géotechniques. Elle est inspirée de la philosophie utilisée pour les autres ouvrages de génie civil (notamment le dimensionnement aux facteurs partiels de sécurité) et des principes énoncés dans la version provisoire de l'Eurocode 7. Bien plus qu'une compilation de diverses normes géotechniques sectorielles (SIA 191, 191/1, 192 et le cahier technique SIA 2009), la SIA 267 constitue réellement le premier document normatif suisse réglant l'ensemble des ouvrages géotechniques.

La norme SIA 267/1 [6] contient diverses spécifications complémentaires à la SIA 267, notamment relatives aux essais et contrôles des pieux, tirants précontraints et ancrages passifs à adhérence totale (chapitres 5 à 7). Elle fait référence à diverses normes de produits et d'essais élaborées ou en cours d'élaboration dans des Comités Techniques du CEN (TC 341 : Reconnaissances et essais géotechniques ; TC 288 : Exécution des travaux géotechniques particuliers) et/ou des groupes de travail de l'EOTA (Organisation Européenne pour Agréments Techniques). Dans le domaine des fondations profondes, sont déjà publiées les normes EN 1536:1999 sur les pieux forés et EN 12699:2000 sur les pieux avec refoulement du sol. D'autres travaux de normalisation relatifs aux micro-pieux (EN 14199) et aux essais de chargement (compression, traction, horizontal, dynamique) sont en cours.

Lors de l'élaboration de la SIA 267, un souci constant a été apporté à la réduction du nombre de facteurs partiels à prendre en compte et aux valeurs de ces derniers, ceci dans une idée d'uniformisation de la méthodologie et pour éviter une énumération de cas particuliers. Cette approche devrait également amener à rechercher où sont les vraies incertitudes et éviter, par un fractionnement de certains facteurs partiels de sécurité, une illusoire impression de maîtriser ces dernières.

2.3 Domaines d'application et contenus de ces deux documents

Le tableau 1 met sommairement en regard le contenu de la SIA 267 et celui de la version définitive de l'Eurocode 7. Hormis le chapitre 7 de la SIA 267 relatif aux séismes qui trouve son pendant dans l'Eurocode 8 : « *Calcul des structures pour leur résistance aux séismes* », et le chapitre 11 sur les ancrages par tirants passifs dont le contenu devrait s'apparenter à une norme sur le clouage en cours d'évaluation au sein du CEN/TC 288, peu de différences de contenu apparaissent de prime abord entre la SIA 267 et l'Eurocode 7 ; tout au plus, une structure légèrement différente dans les premiers chapitres peut être relevée. Cependant, en regardant de plus près ces documents normatifs, on note que l'EC 7, tout comme les autres Eurocodes, traite beaucoup de questions dans le détail tandis que la SIA 267 est plus concise, dans le respect de la tradition suisse de brièveté du texte.

Certaines dissemblances de contenu et d'approche sont observées au niveau des méthodes de dimensionnement en comparant le chapitre 5 de la SIA 267 et le chapitre 2 de l'Eurocode 7. Celles-ci trouvent probablement leur origine dans le fait que les méthodes de vérification des états limites ultimes telles que publiées dans la version définitive de l'Eurocode 7 (EN 1997-1) [7] diffèrent des méthodes préconisées dans les versions provisoires ENV 1997-1:1995 [4] et prEN 1997-1 (12.2001) qui ont servi de base à l'élaboration de la SIA 267.

Une légère évolution se note tout d'abord au niveau des cas d'états limites ultimes à vérifier : les cas A (perte d'équilibre statique), B (défaillance de la structure porteuse) et C (défaillance du sol) de l'époque [4, 9] se subdivisent désormais de la sorte :

- 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 contribue 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 terrain provoqué par la pression de l'eau (poussée d'Archimède) ou par d'autres actions verticales (UPL) ;
- soulèvement local du terrain, érosion interne ou érosion régressive du terrain, sous l'effet des gradients hydrauliques (HYD).

Chapitres de la SIA 267		Sections de la EN 1997-1 (Eurocode 7)	
0	Domaine d'application	1	Généralités
1	Terminologie	1	Généralités
2	Principes	2	Bases du calcul géotechnique
3	Terrain de fondation	3	Données géotechniques
4	Analyse structurale	2	Bases du calcul géotechnique
5	Dimensionnement	2	Bases du calcul géotechnique
6	Contrôle d'exécution et surveillance	4	Surveillance de l'exécution des travaux, suivi et entretien
7	Séismes	-	EC8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes
8	Fondations superficielles	6	Fondations superficielles
9	Fondations sur pieux	7	Fondations sur pieux
10	Ancrages par tirants précontraints	8	Ancrages
11	Ancrages par tirants passifs	-	-
12	Ouvrages de soutènement	9	Ouvrages de soutènement
13	Poussée d'Archimède et renard hydraulique	10	Rupture d'origine hydraulique
14	Pentes, talus et tranchées	11	Stabilité générale
15	Remblais et digues	12,5	Remblais
16	Interventions sur le régime des eaux souterraines	5	Remblais, rabattement de nappe, amélioration et renforcement des terrains

Tableau 1 : Correspondance approximative des chapitres de la norme SIA 267 et des sections de l'Eurocode 7

Parmi ces vérifications de l'état limite ultime, celles relatives aux états limites de la structure (STR) et du terrain (GEO) ont subi des changements très significatifs. Désormais, même si le choix d'une procédure peut être fixé dans chaque annexe nationale, trois approches de calcul sont théoriquement acceptables ! Elles sont présentées dans la section 2.4.7.3 de l'EC7. Les vérifications spécifiques aux pieux sollicités sous charge axiale sont résumées dans le chapitre 3.2.4 de ce texte.

3. Dimensionnement des fondations sur pieux

3.1 Généralités

Les chapitres 7 de l'Eurocode 7 [7] et 9 de la SIA 267 [5] relatifs aux fondations profondes étant organisés de façon relativement différente, une tentative de mise en correspondance de leurs diverses parties a été faite et est résumée dans le tableau 2. Les différences de contenu les plus claires sont les suivantes : l'EC7 présente des méthodes de dimensionnement à partir d'essais d'impact dynamique et de formules de battage, et traite également du dimensionnement des pieux travaillant en traction ; tandis que la SIA 267, de son côté, se distingue par une proposition de méthode pour l'analyse des fondations mixtes pieux-radier.

Tout comme déjà relevé précédemment, dans un souhait de brièveté du texte, le chapitre 9 de la SIA est plus concis que la section 7 correspondante de l'Eurocode 7. Font néanmoins exceptions les considérations pratiques (titre 9.6 de la SIA 267) et les descriptifs des essais de pieux (chapitre 5 de la SIA 267/1) qui sont peu traités dans l'EC7, mais pour lesquels on trouve des analogies dans d'autres documents normatifs européens relatifs aux essais et à l'exécution des pieux (normes ou projets de normes issus des TC 341 et TC 288).

3.2 Calcul des pieux sous charge axiale dans l'Eurocode7

L'Eurocode 7 étant encore peu connu en Suisse, les paragraphes suivants introduisent les principes de dimensionnement et présentent les différents facteurs partiels à prendre en considération pour le calcul des fondations profondes. La méthodologie diffère peu dans son esprit de la prénorme ENV 1997-1.

3.2.1 Principes de calcul

Le calcul doit être fondé sur l'une des approches suivantes (7.4.1(1)P) :

- des résultats d'essais de chargement statique, dont il a été démontré, par des calculs ou une autre méthode, qu'ils sont compatibles avec l'expérience acquise dans des situations comparables ;
- des méthodes de calcul empiriques ou analytiques dont la validité a été démontrée par des essais de chargement statique dans des situations comparables ;
- les résultats d'essais de chargement dynamique dont la validité a été démontrée par des essais de chargement statique dans des situations comparables ;
- le comportement observé d'une fondation sur pieux comparable, à condition que cette approche s'appuie sur les résultats des reconnaissances sur site et d'essais sur les terrains.

Tout comme dans la SIA 267, l'essai de chargement statique constitue donc indéniablement la référence pour le dimensionnement des pieux. L'article 7.5.1(1)P définit les situations dans lesquelles des essais de chargement de pieux, statique ou dynamique, doivent être réalisés :

- lorsqu'on utilise un type de pieu ou une méthode d'installation pour lesquels il n'existe pas d'expériences comparables ;
- lorsque les pieux n'ont pas été testés dans des conditions comparables de sol et de chargement ;
- lorsque les pieux seront soumis à un chargement pour lequel la théorie et l'expérience ne donnent pas une confiance suffisante dans le dimensionnement effectué. Au cours de l'essai de chargement, il convient alors d'appliquer au pieu un chargement semblable au chargement prévu ;
- lorsque les observations effectuées en cours d'installation indiquent un comportement du pieu qui dévie fortement et de façon défavorable du comportement prévu sur la base des reconnaissances du site ou de l'expérience et lorsque les reconnaissances supplémentaires n'expliquent pas les raisons de cet écart.

Diverses recommandations sont données sur les points et phénomènes à considérer dans les calculs de portance (7.4.2 et 7.6.2.1), parmi lesquels les éventuelles variations de contraintes dans le sol (abaissement du niveau de la nappe, charges appliquées sur le sol) susceptibles d'induire du frottement négatif, l'évolution des conditions de chargement pendant la durée de vie de l'ouvrage, la présence éventuelle d'une couche de terrain moins résistant au-dessous de la pointe du pieu, le comportement potentiellement différent des pieux isolés et des groupes de pieux (effet de groupe), ainsi que la technique, les conditions et la qualité d'exécution des pieux.

Section 7 de la EN 1997-1 (Eurocode 7)		Chapitre 9 de la SIA 267	
7.1	Généralités	9.1	Délimitation
7.2	États limites	9.2.1 9.5.1	Généralités dans les Principes (9.2) et le Dimensionnement (9.5)
7.3	Actions et situations de calcul 1. Généralités 2. Actions dues au déplacement du terrain, i.e. frottement négatif, soulèvement du sol, chargement latéral.	9.4.3	Analyse structurale (9.4) Valeurs caractéristiques des actions
7.4	Méthodes de calcul et considérations sur le calcul	9.2.2	Elaboration du projet
7.5	Essais de chargement de pieux 1. Généralités 2. Essais de chargement statique (procédure, pieux d'essai et d'ouvrage) + EN 1536 3. Essais de chargement dynamique 4. Rapport d'essai de chargement	9.7.1	Contrôles d'exécution et surveillance (9.7) Vérification de la capacité portante + Chapitre 5.2 de la SIA 267/1
7.6	Pieux sous charge axiale 1. Calcul à l'état limite 2. Portance (généralités, portance déduite d'essais de chargement statique, d'essais sur les sols, d'essais d'impact dynamique, de formules de battage de pieu, d'essais de propagation des ondes) 3. Résistance à la traction 4. Déplacements verticaux des fondations sur pieux	9.5.1 9.4.1 9.4.4.1 9.5.2.2 9.5.3 - 9.5.4	Généralités dans Dimensionnement (9.5) et Analyse structurale (9.4) Résistance ultime axiale externe dans Valeurs caractéristiques des résistances ultimes (9.4.4) et Valeurs de calcul (9.5.2) Vérification de la sécurité structurale - Vérification de l'aptitude au service
7.7	Pieux chargés latéralement 1. Généralités 2. Résistance aux charges latérales déduite d'essais de chargement de pieux 3. Résistance aux charges latérales déduite des résultats d'essais sur le sol 4. Déplacement latéral	9.4.4.2 9.5.2.3 9.5.4.5	Résistance ultime externe perpendiculairement à l'axe du pieu dans Valeurs caractéristiques des résistances ultimes (9.4.4) et Valeurs de calcul (9.5.2) Vérification de l'aptitude au service
7.8	Calcul de la structure des pieux	9.5.3.4	Sécurité structurale interne du pieu
7.9	Surveillance de l'exécution des travaux	9.7.3	Surveillance + quelques articles tirés des considérations pratiques (9.6)

Tableau 2 : Correspondance approximative des diverses parties traitées dans la section 7 de l'Eurocode 7 avec celles du chapitre 9 de la SIA 267.

Une attention particulière est accordée à la raideur et la résistance de la structure qui relie les pieux dans le groupe (7.6.2.1.(5)P). Lorsque les pieux portent une structure rigide, on peut tirer profit de la capacité de la structure à redistribuer la charge entre les pieux. Un état limite se produira seulement en cas de rupture simultanée d'un nombre significatif de pieux ; par conséquent, il n'est pas nécessaire de considérer des modes de rupture concernant un seul pieu. Réciproquement, lorsque les pieux portent une structure souple, il convient d'admettre que la portance du pieu le plus faible gouverne l'occurrence d'un état limite.

3.2.2 Valeur caractéristique de la portance

La valeur caractéristique de la portance du terrain $R_{c;k}$ peut être déduite des valeurs caractéristiques de la résistance de pointe $R_{b;k}$ et de la résistance latérale $R_{s;k}$:

$$R_{c;k} = R_{b;k} + R_{s;k}$$

Ces deux composantes peuvent être déduites des résultats d'essais de chargement statique ou estimées sur la base de résultats d'essais effectués sur le sol ou d'essais de chargement dynamique.

1. Portance ultime déduite d'essais de chargement statique (7.6.2.2)

Pour les structures qui n'ont pas de capacité de transfert de charges des pieux "faibles" aux pieux "résistants", on doit vérifier au minimum l'équation suivante :

$$R_{c;k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c;m})_{\text{moyen}}}{\xi_1} ; \frac{(R_{c;m})_{\text{min}}}{\xi_2} \right\}$$

où ξ_1 et ξ_2 sont des facteurs de corrélation liés au nombre de pieux testés (tableau 3) appliqués respectivement à la valeur moyenne $(R_{c;m})_{\text{moyen}}$ et à la valeur minimale $(R_{c;m})_{\text{min}}$ des valeurs $R_{c;m}$ mesurées dans les divers essais de chargement.

ξ pour n =	1	2	3	4	≥ 5
ξ_1	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
ξ_2	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

Tableau 3 : Valeurs recommandées des facteurs de corrélation ξ_1 et ξ_2 appliqués respectivement à la valeur moyenne $(R_{c;m})_{\text{moyen}}$ et à la valeur minimale $(R_{c;m})_{\text{min}}$ des portances mesurées lors de n essais de chargement statique [7]. Ces valeurs peuvent être fixées dans l'annexe nationale.

Pour les structures qui ont une raideur et une résistance suffisantes pour transférer les charges des pieux "faibles" aux pieux "résistants", les valeurs de ξ_1 et ξ_2 peuvent être divisées par 1,1, à condition que ξ_1 ne soit jamais inférieur à 1,0.

2. Portance ultime déduite des résultats d'essais sur les sols (7.6.2.3)

Les méthodes d'évaluation de la portance d'une fondation sur pieux à partir des résultats d'essais exécutés sur les sols doivent avoir été établies à partir d'essais de chargement de pieux et d'expériences comparables. Lors de l'évaluation de la validité de tels modèles fondés sur les résultats d'essais réalisés sur le sol, il convient de tenir compte de divers points (7.6.2.3(10)), dont la méthode d'installation du pieu (notamment la méthode de forage ou de fonçage) ainsi que la longueur, le diamètre, le matériau et la forme du fût et de la pointe.

Deux variantes sont suggérées dans le point 7.6.2.3 de l'EC7.

La première méthode consiste à déterminer les valeurs caractéristiques de la résistance de pointe $R_{b;k}$ et de la résistance latérale $R_{s;k}$ au moyen de la formule :

$$R_{c;k} = R_{b;k} + R_{s;k} = \frac{R_{b;cal} + R_{s;cal}}{\xi} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c;cal})_{\text{moyen}}}{\xi_3} ; \frac{(R_{c;cal})_{\text{min}}}{\xi_4} \right\}$$

où ξ_3 et ξ_4 sont des facteurs de corrélation (tableau 4) qui dépendent du nombre de profils d'essais n et sont appliqués respectivement :

- aux valeurs moyennes $(R_{c;cal})_{\text{moyen}} = (R_{b;cal} + R_{s;cal})_{\text{moyen}} = (R_{b;cal})_{\text{moyen}} + (R_{s;cal})_{\text{moyen}}$
- et aux valeurs minimales $(R_{c;cal})_{\text{min}} = (R_{b;cal} + R_{s;cal})_{\text{min}}$

ξ pour n =	1	2	3	4	5	7	10
ξ_3	1,40	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,25
ξ_4	1,40	1,27	1,23	1,20	1,15	1,12	1,08

Tableau 4 : Valeurs recommandées des facteurs de corrélation ξ_3 et ξ_4 appliqués respectivement à la valeur moyenne $(R_{c;cal})_{moyen}$ et à la valeur minimale $(R_{c;cal})_{min}$ des portances calculées à partir de résultats d'essais de sol, n étant le nombre de profils d'essais [7]. Ces valeurs peuvent être fixées dans l'annexe nationale.

Pour les structures qui ont une raideur et une résistance suffisantes pour transférer les charges des pieux "faibles" aux pieux "résistants", les valeurs de ξ_3 et ξ_4 peuvent être divisées par 1,1, à condition que ξ_3 ne soit jamais inférieur à 1,0.

La méthode alternative consiste à évaluer les valeurs caractéristiques selon l'article 7.6.2.3(8):

$$R_{b;k} = A_b \cdot q_{b;k} \quad \text{et} \quad R_{s;k} = \sum_i A_{s;i} \cdot q_{s;i;k}$$

où $q_{b;k}$ et $q_{s;i;k}$ sont les valeurs caractéristiques unitaires de la résistance de pointe et du frottement latéral dans les différentes couches, déduites des valeurs des paramètres du sol.

3. Portance ultime déduite d'essais d'impact dynamique (7.6.2.4)

La valeur caractéristique de la portance est déterminée par :

$$R_{c;k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c;m})_{moyen}}{\xi_5}; \frac{(R_{c;m})_{min}}{\xi_6} \right\}$$

où ξ_5 et ξ_6 sont des facteurs de corrélation liés au nombre de pieux testés (tableau 5) appliqués respectivement à la valeur moyenne $(R_{c;m})_{moyen}$ et à la valeur minimale $(R_{c;m})_{min}$ des valeurs $R_{c;m}$ mesurées dans les divers essais d'impact dynamique.

ξ pour n =	≥ 2	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20
ξ_5	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
ξ_6	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

Tableau 5 : Valeurs recommandées des facteurs de corrélation ξ_5 et ξ_6 appliqués respectivement à la valeur moyenne $(R_{c;m})_{moyen}$ et à la valeur minimale $(R_{c;m})_{min}$ des portances mesurées lors de n essais d'impact dynamique [7]. Les valeurs de ξ peuvent être multipliées par un facteur de modèle de 0,85 si l'on utilise des essais d'impact dynamique avec calage de signaux. Ces valeurs peuvent être fixées dans l'annexe nationale.

4. Portance ultime déduite de l'application de formules de battage de pieu (7.6.2.5)

Pour les pieux portant en pointe forcés dans un sol non cohérent, la valeur caractéristique de la portance $R_{c;k}$ doit être évaluée selon la même procédure que les essais d'impact dynamique (7.6.2.4). L'utilisation d'une formule de battage pour vérifier la portance d'un pieu est conditionnée à la réalisation d'essais de battage sur au moins cinq pieux suffisamment distants.

Il convient de multiplier les valeurs de ξ du tableau 5 par un facteur de modèle de 1,10 si l'on utilise une formule de battage avec mesure du déplacement quasi élastique de la tête du pieu lors de l'impact. Si par contre on utilise une formule de battage de pieux sans mesurer ce déplacement quasi-élastique, les valeurs de ξ doivent être multipliées par un facteur de modèle de 1,20.

Un rebattage des pieux est conseillé, et même préconisé dans des sols limoneux. Si le rebattage donne des résultats plus faibles, ces derniers doivent être utilisés pour évaluer la portance ultime du pieu. Si il donne des résultats plus élevés, ces résultats peuvent être pris en compte.

3.2.3 Valeur de calcul de la portance

La valeur de calcul de la portance d'un pieu $R_{c;d}$ doit être déterminée au moyen de l'une des formules suivantes :

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} \quad \text{ou} \quad R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t}$$

où γ_b , γ_s et γ_t sont des facteurs partiels de résistance (γ_R) pour respectivement, la résistance de pointe, la résistance par frottement sur le fût des pieux en compression, et la résistance totale/combinaison des pieux en compression. Pour les situations permanentes et transitoires, les valeurs recommandées de ces facteurs partiels de résistance sont données dans le tableau 6, en fonction des ensembles R1, R2, R3 ou R4 à considérer selon l'approche de calcul retenue pour la vérification de la sécurité vis-à-vis d'une rupture par défaut de portance (cf. chapitre 3.2.4). Pour les situations accidentelles, l'article 2.4.7.1(3) recommande que les valeurs de ces facteurs partiels γ_b , γ_s et γ_t tiennent compte des circonstances particulières de la situation ; une valeur unitaire est en pratique couramment admise. Les valeurs de ces facteurs partiels peuvent être fixées dans l'annexe nationale.

Type de pieu	Résistance	Symbole	Ensemble			
			R1	R2	R3	R4
foncés	Pointe	γ_b	1,0	1,1	1,0	1,3
	Fût (compression)	γ_s	1,0	1,1	1,0	1,3
	Total/combinaison (compression)	γ_t	1,0	1,1	1,0	1,3
forés	Pointe	γ_b	1,25	1,1	1,0	1,6
	Fût (compression)	γ_s	1,0	1,1	1,0	1,3
	Total/combinaison (compression)	γ_t	1,15	1,1	1,0	1,5
Tarière continue (CFA)	Pointe	γ_b	1,1	1,1	1,0	1,45
	Fût (compression)	γ_s	1,0	1,1	1,0	1,3
	Total/combinaison (compression)	γ_t	1,1	1,1	1,0	1,4

Tableau 6 : Valeurs recommandées des facteurs partiels de résistance γ_b , γ_s et γ_t pour les fondations profondes en fonction du type de pieu et de l'ensemble R1, R2, R3 ou R4 à considérer dans la vérification des états limites de la structure (STR) et du terrain (GEO) [7]. Ces valeurs peuvent être fixées dans l'annexe nationale.

En sus de ces facteurs partiels de résistance, un facteur de modèle supérieur à 1,0 peut être introduit afin d'assurer que la portance estimée ou calculée soit suffisamment sécuritaire. Cette éventualité doit être notamment considérée lorsque l'on applique la procédure alternative de calcul de la portance ultime à partir des résultats d'essais sur les sols. La valeur du facteur de modèle peut être fixée dans l'annexe nationale.

3.2.4 Sécurité vis-à-vis d'une rupture par défaut de portance

Comme déjà signalé, les méthodes de vérification de certains états limites ultimes diffèrent entre l'Eurocode 7 et la SIA 267. Ceci est notamment le cas pour les vérifications de la résistance de la structure (STR) et du terrain (GEO) lors du calcul de pieux sous charge axiale.

La vérification de l'EC7 consiste à s'assurer, comme pour la SIA 267, que pour tous les cas de charge et de combinaisons de charge à l'état limite ultime, la valeur de calcul de l'action $F_{c;d}$ reste bien inférieure à la valeur de calcul de la résistance $R_{c;d}$:

$$F_{c;d} \leq R_{c;d}$$

La différence majeure réside dans le fait que trois approches de calcul sont possibles dans l'EC7, même si une note mentionne que le choix de la procédure à utiliser peut être fixé dans l'annexe nationale (2.4.7.3.4.1). Dans ces approches de calcul, les facteurs partiels de sécurité sont appliqués selon des combinaisons différentes et sont groupés en ensembles notés A pour les actions ou effets des actions, M pour les paramètres du sol et R pour les résistances.

Approche de calcul 1

Pour le calcul des pieux sous charge axiale, on doit vérifier qu'aucun état limite de rupture ou de déformation excessive ne sera atteint sous chacune des deux combinaisons d'ensembles de facteurs partiels suivantes :

Combinaison 1: $A1 "+" M1 "+" R1$

Combinaison 2: $A2 "+" (M1 \text{ ou } M2) "+" R4$

Des notes commentent que dans la combinaison 1, les facteurs partiels sont appliqués aux actions (A1) et aux résistances du terrain (R1) ; tandis que dans la combinaison 2, les facteurs partiels sont appliqués à certaines actions (A2), aux résistances du terrain (R4) et parfois aux paramètres de résistance du terrain (M2). Dans cette seconde combinaison, l'ensemble de facteurs partiels (M1) est utilisé pour calculer les résistances des pieux et l'ensemble (M2) est utilisé pour calculer les actions défavorables sur ceux-ci, dues par exemple au frottement négatif ou aux charges transversales.

S'il est évident que l'une des deux combinaisons gouverne le résultat du calcul, il n'est pas nécessaire de faire les calculs avec l'autre combinaison. Toutefois, des combinaisons différentes peuvent être critiques pour des aspects différents du même projet.

Approche de calcul 2

On doit vérifier qu'aucun état limite de rupture ou de déformation excessive ne sera atteint avec la combinaison d'ensembles de facteurs partiels suivante :

Combinaison: $A1 "+" M1 "+" R2$

Dans cette approche, les facteurs partiels sont appliqués aux actions ou aux effets des actions (A1) et aux résistances du terrain (R2).

Approche de calcul 3

On doit vérifier qu'aucun état limite de rupture ou de déformation excessive ne sera atteint avec la combinaison d'ensembles de facteurs partiels suivante :

Combinaison: $(A1 \text{ ou } A2) "+" M2 "+" R3$

Dans cette approche, les facteurs partiels sont appliqués aux actions ou aux effets des actions (A1 sur les actions provenant de la structure ; A2 sur les actions géotechniques) et aux paramètres de résistance du terrain (M2). Des facteurs partiels doivent alors être appliqués sur les valeurs caractéristiques des propriétés des terrains pour obtenir les valeurs de calcul de ces paramètres en vue de calculer la valeur de calcul de la portance du pieu (tableau 7).

Paramètres du sol	Symbole	Ensemble	
		M1	M2
Angle de frottement interne	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Cohésion effective	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Cohésion non drainée	γ_{cu}	1,0	1,4
Compression simple	γ_{qu}	1,0	1,4
Poids volumique	γ_y	1,0	1,0

Tableau 7 : Valeurs recommandées des ensembles de facteurs partiels M1 et M2 à appliquer sur les paramètres du sol (γ_M) pour la vérification des états limites de la structure (STR) et géotechniques (GEO) [7]. $\gamma_{\phi'}$ est appliqué sur la tangente de l'angle de frottement interne. Les valeurs de ces facteurs partiels à utiliser dans un pays donné peuvent être trouvées dans son annexe nationale à la norme EN 1997-1.

Les ensembles de facteurs partiels (A1) et (A2) à appliquer sur les actions ou les effets des actions pour la vérification des états limites de la structure (STR) et géotechniques (GEO) sont repris au tableau 8. Ils sont valables pour les situations permanentes et transitoires. Pour les situations accidentelles par contre, il convient normalement de prendre tous ces facteurs partiels sur les actions (γ_F) égaux à 1,0 (art. 2.4.7.1(3)).

Action		Symbole	Ensemble	
			A1	A2
Permanente	Défavorable	γ_G	1,35	1,0
	Favorable		1,0	1,0
Variable	Défavorable	γ_Q	1,5	1,3
	Favorable		0	0

Tableau 8 : Valeurs recommandées des ensembles de facteurs partiels A1 et A2 à appliquer sur les actions (γ_F) ou les effets des actions (γ_E) pour la vérification des états limites de la structure (STR) et géotechniques (GEO) [7]. γ_G est relatif aux actions permanentes et γ_Q aux actions variables. Les valeurs de γ_G et γ_Q à utiliser dans un pays donné peuvent être trouvées dans l'annexe nationale à la norme EN 1990:2002.

3.2.5 Etat limite de service de la structure portée par les pieux

Dans les conditions des états limites de service, les déplacements verticaux des fondations sur pieux doivent être estimés et comparés à des valeurs limites convenues pendant la conception de l'ouvrage :

$$E_d \leq C_d$$

Il convient normalement de donner aux facteurs partiels pour les états limites de service une valeur de 1,0.

Une méthode alternative est autorisée dans certaines situations où il n'est pas exigé de valeur de la déformation pour vérifier les états limites de service, et lorsqu'une expérience comparable bien établie existe pour un terrain, une structure et une méthode de construction semblables. La vérification consiste à s'assurer qu'une fraction suffisamment faible de la résistance du terrain est mobilisée pour maintenir les déformations dans les limites admissibles pour l'ouvrage en service.

3.3 Commentaires

La comparaison des principes de dimensionnement des pieux sous charge axiale dans l'Eurocode 7 et la SIA 267 suscite les quelques commentaires d'ordre théorique suivants :

- Comme l'illustrent clairement les articles 7.4.1(1)P et 7.5.1(1)P relatifs aux principes de calcul des pieux sous charge axiale (cf. chapitre 3.2.1 de ce texte), l'Eurocode 7 insiste sur l'expérience acquise dans des situations comparables et privilégie les informations locales disponibles. Cette notion d'expérience comparable, définie à l'article 1.5.2.2 de l'EC7, est également bien présente dans la SIA 267.
- La méthode de vérification de la portance des pieux sous charge axiale préconisée dans la SIA 267 semble s'apparenter à la deuxième des 3 approches de calcul proposées dans l'EC7. En effet, elles appliquent toutes deux des facteurs partiels de sécurité sur les actions et sur les résistances du terrain et font intervenir un troisième facteur fonction du mode de détermination de la valeur caractéristique de la portance du terrain. Il s'agit du facteur de corrélation ξ de l'EC7 et du facteur dit de conversion η de la SIA 267, le premier intervenant au dénominateur et le second au numérateur. Vu cette similitude de méthodes de vérification de la portance sous charge axiale entre la SIA 267 et l'approche de calcul n°2 de l'EC7, une harmonisation de ces deux documents normatifs sera aisée en spécifiant dans la future annexe nationale suisse à l'EN 1997-1 que la procédure à utiliser en Suisse pour cette vérification est la 2.
- L'évaluation des actions et les valeurs des facteurs partiels de sécurité sur ces actions (γ_F) étant très semblables dans la SIA 267 et l'EC7 (ensemble A1), les valeurs de calcul obtenues ne devraient présenter que des différences mineures. Bien que les valeurs du facteur partiel de résistance du terrain

diffèrent entre la SIA 267 et l'ensemble R2 de l'EC7 (noté respectivement γ_M et γ_R), il est intéressant de noter que, dans les deux documents normatifs, elles sont indépendantes de la méthode d'exécution du pieu (foncés, forés, CFA), mais varient en fonction du mode de travail (compression, traction). Les facteurs de conversion η et de corrélation ξ sont difficilement comparables, les valeurs recommandées dans l'EC7 étant définies très précisément en fonction du type et du nombre d'essais réalisés pour déterminer la résistance des pieux. Les annexes nationales aux Eurocodes pouvant fixer les valeurs des facteurs partiels de sécurité et des facteurs de corrélation, il conviendra à l'avenir d'apprécier si la Suisse maintient ou adapte en tout ou en partie les valeurs actuellement fixées dans la SIA 267.

3.4 Autres considérations sur le dimensionnement des pieux

Les normes traitent principalement du dimensionnement de pieux sollicités axialement. La littérature propose en général des méthodes de calculs analytiques basées sur le calcul des termes de pointe et de frottement latéral à partir de formules faisant intervenir, pour le terme de pointe les facteurs N_q et N_c (par analogie aux semelles de fondation) et la contrainte verticale à la base du pieu σ'_{vp} , et pour le terme de frottement latéral un coefficient K multiplié par $\tan\delta$ et la contrainte verticale moyenne le long du fût σ'_{vm} . Cette manière de procéder privilégie le terme de pointe par rapport au frottement latéral, en général très sous-estimé par rapport aux valeurs déduites d'essais. En toute rigueur, et compte tenu des importantes déformations nécessaires à la mobilisation de la résistance de pointe, il serait préférable de limiter le terme de pointe, comme le propose du reste les DTU [15] -ce terme ne croissant pas indéfiniment avec la profondeur-, et de prendre en compte des coefficients K plus élevés, compris entre 1,75 et 3,0 selon Ireland [10, 11] sur la base d'essais sur pieux dans des sables.

Il est également intéressant de signaler que la plupart des développements de méthodes analytiques liés au dimensionnement des pieux datent des années 1955 à 1980 environ. Par la suite, l'accent a été mis sur l'interprétation et l'analyse d'essais in situ comme le pénétromètre statique et le pressiomètre, en France du moins, ce qui a débouché sur des nouvelles approches de dimensionnement, souvent semi-empiriques. Comme présenté précédemment (cf. 3.2.2), les méthodes du point 7.6.2.3 de l'EC7 permettent d'intégrer ce type d'estimation de la portance à partir de profils d'essais in situ.

La sollicitation des pieux à des efforts horizontaux, bien qu'objet de publications assez abondantes, reste relativement marginalisée dans la littérature technique et, à défaut de formulations concises et pratiques, relativement peu enseignée. Elle est à peine traitée dans la SIA 267 et fait l'objet de deux pages dans l'Eurocode 7. Il en est de même de l'interaction pieux-fondation, quasi-inexistante dans l'EC 7 et sommairement mentionnée dans la SIA 267. Ces deux types de problèmes nécessitent en général le recours à des méthodes de calcul en déformation sans toutefois toujours être du niveau d'une vérification de l'aptitude au service. Le passage des efforts obtenus à une vérification de la sécurité structurale reste donc à déterminer de cas en cas !

Le calcul de la résistance interne des fondations profondes selon la SIA 267 permet, par le coefficient η_i admis généralement à 0,8, une meilleure utilisation du matériau, ceci sans qu'il y ait eu de sensible amélioration dans la mise en œuvre de ces matériaux (bétonnage par goulotte pour les pieux forés, battage de pieux préfabriqués, ...) depuis la norme SIA 192 de 1975 [2]. Hors, dans les articles 5.31 (pieux battus en bois), 5.32 (acier) et 5.33 (béton) de cette dernière, il était prescrit une réduction de la contrainte admissible par un facteur 1,5 pour tenir compte des pertes de qualité dues au battage et des contraintes additionnelles après battage, ce qui ne se retrouve pas dans les SIA 262 et 263 auxquelles se réfère la SIA 267 à ce sujet ! Dans ce cas, comme pour celui du bétonnage de pieux forés, l'ingénieur est appelé à faire preuve de bon sens dans le choix d'un facteur η_i plus adapté au matériau mis en œuvre.

Enfin, d'un point de vue purement terminologique, les valeurs unitaires de résistance en pointe et au frottement latéral, calculées à partir des paramètres géotechniques caractéristiques (valeurs x_k) ou tirées de l'expérience, sont fréquemment données dans les rapports géotechniques. Il est souvent admis que ces valeurs « caractéristiques » correspondent approximativement aux anciennes valeurs dites « de rupture ». Ceci peut parfois prêter à confusion lorsque la définition de la valeur caractéristique est comprise comme "une valeur moyenne prudente" (art. 4.2.3.1 de la SIA 267), surtout par des interlocuteurs peu familiarisés avec les calculs aux coefficients partiels. Il est possible d'expliquer cette apparente contradiction par le fait que les anciennes valeurs dites « de rupture » étaient déjà, pour la plupart, des valeurs moyennes, très probablement même des valeurs moyennes prudentes ! En toute rigueur, il est cependant essentiel de garder à l'esprit que la valeur caractéristique d'un paramètre de sol n'est pas une valeur intrinsèque de celui-ci. Elle dépend du mécanisme de ruine ou de déformation considéré et du volume de sol intéressé par le mécanisme en question, un ouvrage de petite taille étant plus vulnérable vis-à-vis de défauts localisés qu'un grand ouvrage. De plus, la connaissance (expérience) du terrain ainsi que le nombre et les conditions des essais effectués devraient être considérés lors de la détermination de cette valeur caractéristique.

4. Applications

Dans le cadre du comité technique CEN/TC 250 chargé de l'élaboration des Eurocodes, un groupe de travail a été chargé, en collaboration avec le TC23 de la Société Internationale de Mécanique des Soils et de la Géotechnique (SIMSG), de l'élaboration de divers problèmes typiques de géotechnique en vue d'une évaluation des nouvelles normes européennes [12]. Parmi les 10 applications proposées, 2 exemples ont trait aux fondations sur pieux : l'une dimensionnée à partir de résultats d'essais de chargement statique (exemple 4) et l'autre dimensionnée à partir des paramètres de sol (exemple 3). Ces deux cas sont présentés ci-après et évalués selon la SIA 267 et l'Eurocode 7.

4.1 Fondation sur pieu dimensionnée à partir d'essais de chargement statique

4.1.1 Donnée

Un ouvrage repose sur des pieux battus de diamètre $D = 0.4$ m et de longueur $L = 15$ m. La conception de sa structure est telle qu'une redistribution éventuelle des charges des pieux "faibles" vers les pieux "résistants" n'est pas possible. Le tassement absolu admissible est de 10 mm.

Deux essais de chargement statique ont été menés sur des pieux d'essai de même diamètre et de même longueur mis en place par battage dans les mêmes formations de sol. Afin de déterminer leur charge de rupture, le chargement a été poussé jusqu'à induire des tassements supérieurs à $0,1 D = 40$ mm (figure 1).

Sachant que les valeurs caractéristiques des charges permanente G_k et variable Q_k que l'ouvrage exerce sur la fondation valent respectivement 20 MN et 5 MN, on demande de déterminer le nombre de pieux nécessaires pour vérifier les états limites ultimes (ELU) et de service (ELS). On admet qu'aucun effet de groupe ne se développe.

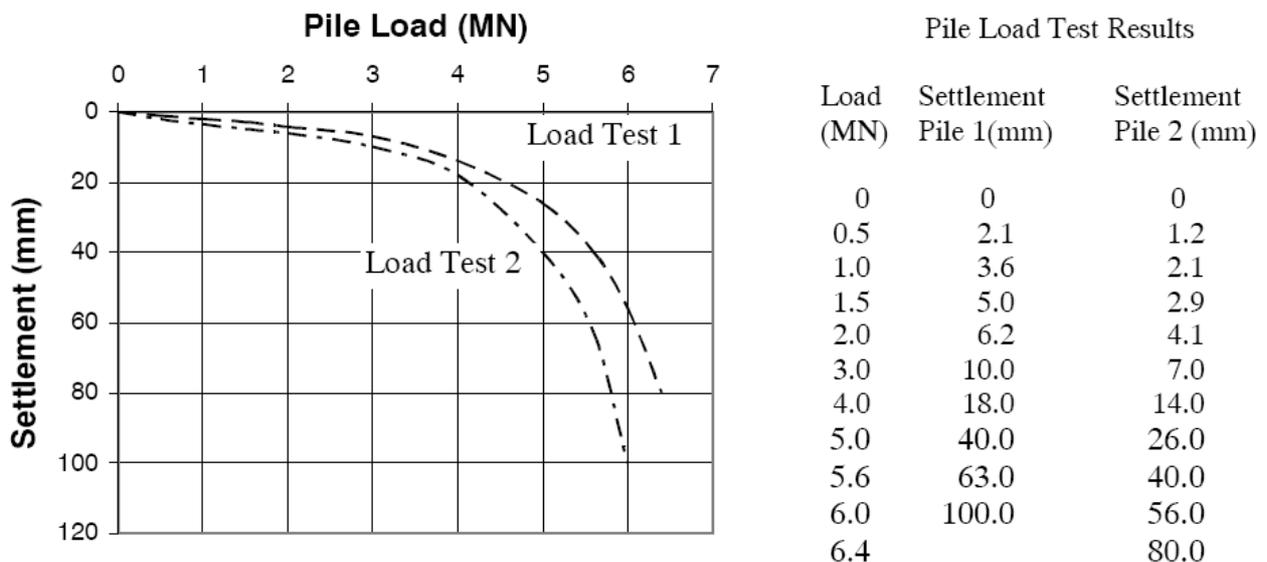


Figure 1 : Courbes charge-tassement mesurées lors de deux essais de chargement statique. Exemple de calcul n°4 élaboré pour évaluer l'Eurocode 7 (ERTC 10 & TC23) [12].

4.1.2 SIA 267

La valeur de calcul des charges agissant sur la fondation s'obtient par : $E_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k$. L'ELU à vérifier étant de type 2, $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$. Dès lors, $E_d = 1,35 \cdot 20 + 1,5 \cdot 5 = 34,5$ MN. Il est à noter que la détermination de E_d ne pourrait se faire sur la base des facteurs de charge EL type 3 car une redistribution des charges n'est pas possible à l'état de rupture.

La résistance ultime axiale externe R_a déterminée sur la base d'un essai de chargement statique est égale à la force de rupture ou, si celle-ci n'est pas atteinte, à la force correspondant à un tassement d'un dixième du diamètre du pieu. Les résistances ultimes axiales externes R_a des deux pieux d'essai valent donc 5,0 MN et 5,6 MN.

La valeur caractéristique $R_{a,k}$ est égale à la résistance ultime axiale externe la plus basse de ces deux essais de chargement, soit 5,0 MN.

La valeur de calcul de la résistance ultime externe du pieu $R_{a,d}$ vaut : $R_{a,d} = \frac{\eta_a R_{a,k}}{\gamma_{M,a}}$

avec η_a : facteur de conversion tenant compte des incertitudes de détermination de R_a . Pour les essais de chargement statique, $\eta_a \leq 1,0$. Vu que seuls deux essais ont été réalisés, on prendra par prudence $\eta_a = 0,95$.

$\gamma_{M,a}$: coefficient de résistance pour la résistance ultime externe dépendant du mode de travail du pieu. Les pieux étant sollicités en compression, $\gamma_{M,a} = 1,3$.

$$R_{a,d} = 0,95 \cdot 5,0 / 1,3 = 3,65 \text{ MN}$$

Le nombre de pieux nécessaires pour assurer la sécurité structurale externe de cette fondation sur pieux (pas d'effet de groupe éventuel) vaut donc : $N \geq E_d / R_{a,d} = 34,5 / 3,65 = 9,5 \rightarrow 10$ pieux.

Pour la vérification de l'aptitude au service, les facteurs de charge sont pris égaux à 1,0 et la valeur de calcul des charges vaut $E_d = 1,0 \cdot 20 + 1,0 \cdot 5 = 25$ MN. Aucune redistribution des charges n'étant possible dans la structure, la charge par pieu est de $25 / 10 = 2,5$ MN. Le pieu d'essai le plus faible tassant de 8,1 mm sous cette sollicitation et le tassement admissible ayant été fixé à 10 mm, l'aptitude au service est donc assurée. Une vérification complémentaire du tassement du groupe de pieux s'avèrerait également nécessaire.

4.1.3 Eurocode 7

Les valeurs moyenne $(R_{c,m})_{\text{moyen}}$ et minimale $(R_{c,m})_{\text{min}}$ des portances ultimes $R_{c,m}$ mesurées dans les deux essais de chargement statique valent respectivement 5,3 MN et 5 MN. Pour 2 essais, les facteurs de corrélation ξ_1 et ξ_2 recommandés sont de 1,3 et 1,2 (non divisés par 1,1 car la structure n'offre pas de possibilité de report des charges), et donc la valeur caractéristique de la portance du terrain est égale à : $R_{c,k} = \min(5,3/1,3 ; 5/1,2) = 4,08$ MN.

La suite des vérifications varie d'une approche de calcul à l'autre. Elles sont reprises en parallèle ci-après, à l'exception de la troisième approche qui n'est pas applicable ici parce qu'elle utilise des paramètres élémentaires de la résistance du sol (p.ex. c' et ϕ'), alors que les essais de pieux fournissent directement les résistances.

	Approche de calcul 1		Approche de calcul 2
	Combinaison 1	Combinaison 2	
Combinaison	$A1 + M1 + R1$	$A2 + (M1 \text{ ou } M2) + R4$	$A1 + M1 + R2$
A	A1 : $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $F_{c,d} = 34,5$ MN	A2 : $\gamma_G = 1,0$ et $\gamma_Q = 1,3$ $F_{c,d} = 26,5$ MN	A1 : $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $F_{c,d} = 34,5$ MN
M	M1 : $\gamma_M = 1$	M1 : $\gamma_M = 1$	M1 : $\gamma_M = 1$
R	R1 : $\gamma_t = 1,0$ (pieux foncés) $R_{c,d} = R_{c,k} / \gamma_t = 4,08$ MN	R4 : $\gamma_t = 1,3$ (pieux foncés) $R_{c,d} = R_{c,k} / \gamma_t = 3,14$ MN	R2 : $\gamma_t = 1,1$ $R_{c,d} = R_{c,k} / \gamma_t = 3,7$ MN
Vérification	$N \geq F_{c,d} / R_{c,d} = 8,45$	$N \geq F_{c,d} / R_{c,d} = 8,44$	$N \geq F_{c,d} / R_{c,d} = 9,3$
Nombre de pieux	N = 9		N = 10

L'aptitude au service est vérifiée de façon analogue à la SIA 267 et est dès lors satisfaite.

4.1.4 Synthèse

Sur base de cet exemple, on pourrait donc conclure que la vérification des ELU et ELS à partir d'essais de chargement statique conduit à pratiquement les mêmes résultats selon la SIA 267 et l'Eurocode 7. Ceci est heureux car l'essai de chargement statique est considéré par les deux documents normatifs comme la méthode de référence pour la détermination de la capacité portante de pieux.

Il est par ailleurs intéressant de noter que le nombre de pieux évalué ci-dessus selon l'EC7 est cohérent avec les résultats obtenus par les représentants de 10 pays de l'Union Européenne ayant participé à l'évaluation de l'Eurocode 7 [20], à savoir $N = 9$ pour l'approche de calcul 1, et $N = 9$ à 10 pour l'approche 2.

4.2 Fondation sur pieu dimensionnée à partir des paramètres de sol

4.2.1 Donnée

Un immeuble repose sur des pieux forés de diamètre $D = 0.6$ m fondés dans un sable caractérisé par les propriétés suivantes : $c'_k = 0$, $\phi'_k = 35^\circ$, $N_{SPT} = 25$ et $\gamma = 21$ kN/m³ (figure 2). La nappe phréatique se trouve à une profondeur de 2 m sous la surface du sol.

Sachant que les valeurs caractéristiques des charges permanente G_k et variable Q_k agissant sur le pieu valent respectivement 1200 kN et 200 kN, on demande de déterminer la longueur L du pieu nécessaire pour assurer la capacité portante.

Pour ne pas surcharger le texte, les calculs qui suivent négligent le poids propre du pieu (poids volumique du béton de 24 kN/m³).

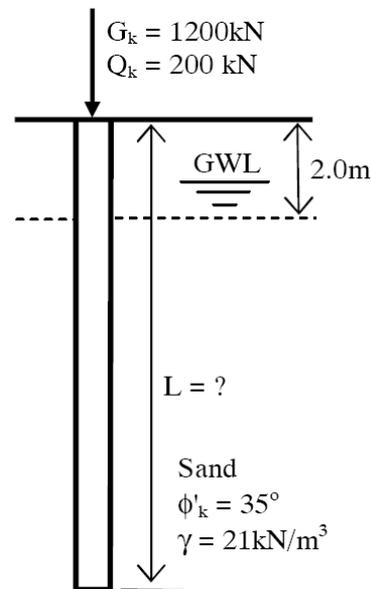


Figure 2 : Exemple de calcul n°3 élaboré pour évaluer l'Eurocode 7 (ERTC 10 & TC23) [12].

4.2.2 Ancienne pratique et SIA 267

Les vérifications faites sous ce titre le sont selon l'ancienne pratique des facteurs globaux de sécurité et selon la SIA 267. Les calculs sont menés au moyen de 4 méthodes différentes :

- Calcul analytique selon Lang & Huder (ETHZ) ;
- Estimation empirique à partir du SPT selon Rollberg ;
- Calcul selon le DTU français avec estimation théorique du frottement latéral ;
- Calcul selon le DTU français avec estimation empirique du frottement latéral.

Calculs préalables

$$\text{Aire : } A = \pi \cdot D^2 / 4 = 0,282743 \text{ m}^2$$

$$\text{Périmètre : } U_p = \pi \cdot D = 1,885 \text{ m}$$

Contrainte verticale effective à la base du pieu (profondeur L) :

$$\sigma'_v = 21 \cdot 2 + (21 - 10) \cdot (L - 2) = 20 + 11 \cdot L \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Contrainte verticale moyenne sur la profondeur L :

$$\sigma'_{vm} = [1/2 \cdot 42 \cdot 2 + 1/2 \cdot (42 + 20 + 11 \cdot L) \cdot (L - 2)] / L = [-20 + 20 \cdot L + 5,5 \cdot L^2] / L \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Calcul analytique selon Lang & Huder (ETHZ)

Les termes de pointe et de frottement latéral sont évalués à partir d'expressions analytiques reprises du livre : Bodenmechanik und Grundbau [13].

	Ancienne pratique	SIA 267
Charge:	$F = 1200 + 200 = 1400 \text{ kN}$	$\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $E_d = 1,35 \cdot 1200 + 1,5 \cdot 200 = 1920 \text{ kN}$
Terme de pointe :	Rupture locale : $^{2/3} \varphi'_k = 23,3^\circ$ $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right) = 8,96$ $\chi = f(23,3^\circ ; L/D \geq 20) \approx 2$ $Q_{pu} = A \cdot (c' \cdot N_c + \sigma'_v \cdot N_q) \cdot \chi$ $Q_{pu} = 0,282743 \cdot (20 + 11 \cdot L) \cdot 8,96 \cdot 2$	Rupture globale : $\varphi'_k = 35^\circ$ $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right) = 33,3$ $\chi = f(35^\circ ; L/D \geq 20) \approx 3$ $R_b = A \cdot (c' \cdot N_c + \sigma'_v \cdot N_q) \cdot \chi$ $R_b = 0,282743 \cdot (20 + 11 \cdot L) \cdot 33,3 \cdot 3$
Frottement latéral :	K entre K_a et K_0 K admis égal à $K_0 = 1 - \sin \varphi'_k = 0,426$ $\delta = \varphi'_k = 35^\circ$; $\tan \delta = 0,7$ et $K \cdot \tan \delta = 0,3$ $Q_{su} = U_p \cdot L \cdot (c' + \sigma'_{vm} \cdot K \cdot \tan \delta)$ $Q_{su} = 1,885 \cdot [-20 + 20 \cdot L + 5,5 \cdot L^2] \cdot 0,3$	K entre K_a et K_0 K admis égal à $K_0 = 1 - \sin \varphi'_k = 0,426$ $\delta = \varphi'_k = 35^\circ$; $\tan \delta = 0,7$ et $K \cdot \tan \delta = 0,3$ $R_s = U_p \cdot L \cdot (c' + \sigma'_{vm} \cdot K \cdot \tan \delta)$ $R_s = 1,885 \cdot [-20 + 20 \cdot L + 5,5 \cdot L^2] \cdot 0,3$
Vérification :	$F_{sp} = 1,0$ (rupture locale) et $F_{ss} = 2,0$ $1400 \leq Q_{pu} / F_{sp} + Q_{su} / F_{ss}$ $L \geq 15,3 \text{ m}$	$\gamma_{M,a} = 1,3$ et $\eta_a \leq 0,7$ $\eta_a = 0,6$ (car surévaluation probable de R_b) $1920 \leq \eta_a / \gamma_{M,a} \cdot (R_b + R_s)$ $L \geq 10,2 \text{ m}$

Estimation empirique à partir du SPT selon Rollberg

Rollberg [14] a proposé des relations empiriques entre le travail total développé lors du battage d'un carottier SPT et la charge de rupture de pieux forés ou battus dans des sols non cohérents. Ces expressions n'étant pas homogènes au niveau des unités, il convient d'être attentif à celles-ci.

	Ancienne pratique	SIA 267
Charge:	$F = 1200 + 200 = 1400 \text{ kN}$	$\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $E_d = 1,35 \cdot 1200 + 1,5 \cdot 200 = 1920 \text{ kN}$
Charge ultime :	$\log Q_{b3} = 0,067 + 0,468 \log(F_p \cdot U_p \cdot A_{SPT})$ $A_{SPT} = 0,161 \sum_0^{L+4D} N_{SPT} \cdot \Delta L$ $U_p = \pi \cdot D = 1,885 \text{ m}$ $F_p = \pi \cdot D^2 / 4 = 2827 \text{ cm}^2$ $N_{SPT} = 25$	$\log Q_{b3} = 0,067 + 0,468 \log(F_p \cdot U_p \cdot A_{SPT})$ $A_{SPT} = 0,161 \sum_0^{L+4D} N_{SPT} \cdot \Delta L$ $U_p = \pi \cdot D = 1,885 \text{ m}$ $F_p = \pi \cdot D^2 / 4 = 2827 \text{ cm}^2$ $N_{SPT} = 25$
Vérification :	$F_s = 2$ sur $Q_{bmax} = ^{2/3} Q_{b3}$ d'où $F_s = 3,0$ sur Q_{b3} $1400 \leq Q_{b3} / F_s$ $L \geq 11,2 \text{ m}$	$\gamma_{M,a} = 1,3$ et $\eta_a \leq 0,7$ $\eta_a = 0,6$ (car formule empirique) $1920 \leq \eta_a / \gamma_{M,a} \cdot (Q_{b3})$ $L \geq 10,9 \text{ m}$

Calcul selon le DTU français avec estimation théorique du frottement latéral

Suite au constat que la contrainte à la rupture sous la pointe d'une fondation profonde n'augmente plus au-delà d'une certaine profondeur L_c qualifiée de critique, le Document Technique Unifié 13.2 français [15] plafonne la résistance de pointe à une valeur limite. La résistance au frottement latéral est quant à elle évaluée analytiquement selon une expression analogue à celle de Lang & Huder [13].

	Ancienne pratique	SIA 267
Charge:	$F = 1200 + 200 = 1400 \text{ kN}$	$\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $E_d = 1,35 \cdot 1200 + 1,5 \cdot 200 = 1920 \text{ kN}$
Terme de pointe :	Pour $L \geq L_c = 6 \cdot D = 3,6 \text{ m}$ $N_{q_{\max}} = 10^{3,04 \cdot \tan \varphi'} = 134,5$ $Q_{pu} = A \cdot (50 \cdot N_{q_{\max}} + \lambda \cdot c' \cdot N_c)$ $Q_{pu} = 0,282743 \cdot (50 \cdot 134,5) = 1901 \text{ kN}$	Pour $L \geq L_c = 6 \cdot D = 3,6 \text{ m}$ $N_{q_{\max}} = 10^{3,04 \cdot \tan \varphi'} = 134,5$ $R_b = A \cdot (50 \cdot N_{q_{\max}} + \lambda \cdot c' \cdot N_c)$ $R_b = 0,282743 \cdot (50 \cdot 134,5) = 1901 \text{ kN}$
Frottement latéral :	K entre K_a et K_0 K admis égal à $K_0 = 1 - \sin \varphi'_k = 0,426$ $\delta = \varphi'_k = 35^\circ$; $\tan \delta = 0,7$ et $K \cdot \tan \delta = 0,3$ $Q_{su} = U_p \cdot L \cdot (c' + \sigma'_{vm} \cdot K \cdot \tan \delta)$ $Q_{su} = 1,885 \cdot [-20 + 20 \cdot L + 5,5 \cdot L^2] \cdot 0,3$	K entre K_a et K_0 K admis égal à $K_0 = 1 - \sin \varphi'_k = 0,426$ $\delta = \varphi'_k = 35^\circ$; $\tan \delta = 0,7$ et $K \cdot \tan \delta = 0,3$ $R_s = U_p \cdot L \cdot (c' + \sigma'_{vm} \cdot K \cdot \tan \delta)$ $R_s = 1,885 \cdot [-20 + 20 \cdot L + 5,5 \cdot L^2] \cdot 0,3$
Vérification :	$F_{sp} = 3,0$ et $F_{ss} = 2,0$ $1400 \leq Q_{pu} / F_{sp} + Q_{su} / F_{ss}$ $L \geq 20,5 \text{ m}$	$\gamma_{M,a} = 1,3$ et $\eta_a \leq 0,7$ admis égal à $0,7$ $1920 \leq \eta_a / \gamma_{M,a} \cdot (R_b + R_s)$ $L \geq 21,5 \text{ m}$

Calcul selon le DTU français avec estimation empirique du frottement latéral

Cette méthode est une variante du DTU fréquemment préconisée. Alors que le terme de pointe demeure inchangé, le frottement latéral est évalué à partir d'une estimation empirique de la résistance au frottement latéral unitaire q_s (kN/m^2) fonction de la nature et de la compacité du sol.

	Ancienne pratique	SIA 267
Charge:	$F = 1200 + 200 = 1400 \text{ kN}$	$\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $E_d = 1,35 \cdot 1200 + 1,5 \cdot 200 = 1920 \text{ kN}$
Terme de pointe :	identique à l'évaluation précédente $Q_{pu} = 0,282743 \cdot (50 \cdot 134,5) = 1901 \text{ kN}$	identique à l'évaluation précédente $R_b = 0,282743 \cdot (50 \cdot 134,5) = 1901 \text{ kN}$
Frottement latéral :	Sable moyennement compact ($N_{SPT} = 25$). Résistance au frottement latéral unitaire estimée à : $q_s = 70 \text{ kN/m}^2$ $Q_{su} = U_p \cdot q_s \cdot L$ $Q_{su} = 1,885 \cdot 70 \cdot L$	Sable moyennement compact ($N_{SPT} = 25$). Résistance au frottement latéral unitaire estimée à $q_{s,k} = 70 \text{ kN/m}^2$ (valeur caractér.) $R_s = U_p \cdot q_{s,k} \cdot L$ $R_s = 1,885 \cdot 70 \cdot L$
Vérification :	$F_{sp} = 3,0$ et $F_{ss} = 2,0$ $1400 \leq Q_{pu} / F_{sp} + Q_{su} / F_{ss}$ $L \geq 11,6 \text{ m}$	$\gamma_{M,a} = 1,3$ et $\eta_a \leq 0,7$ admis égal à $0,7$ $1920 \leq \eta_a / \gamma_{M,a} \cdot (R_b + R_s)$ $L \geq 12,6 \text{ m}$

4.2.3 Eurocode 7

Une comparaison des différentes approches de calcul acceptées dans l'EC7 nécessite l'application de 4 combinaisons différentes des actions (A), paramètres du sol (M) et résistances (R). Dès lors, afin de ne pas surcharger le texte, on se contentera sous ce titre des vérifications selon 3 méthodes de calcul différentes :

- Calcul analytique selon Lang & Huder (ETHZ) ;
- Estimation empirique à partir du SPT selon Rollberg ;
- Calcul selon le DTU français avec estimation empirique du frottement latéral.

Calcul analytique selon Lang & Huder (ETHZ)

	Résistance de pointe	Résistance latérale
Valeur calculée	$R_{b,cal} = A \cdot (c' \cdot N_c + \sigma'_v \cdot N_q) \cdot \chi$ avec : <ul style="list-style-type: none"> • $A = \pi \cdot D^2 / 4 = 0,282743 \text{ m}^2$ • $\sigma'_v = 20 + 11 \cdot L \text{ [kN/m}^2\text{]}$ • $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right)$ • $\chi = f(\varphi' ; L/D)$ $R_{b,cal} = 0,282743 \cdot (20 + 11 \cdot L) \cdot N_q \cdot \chi$	$R_{s,cal} = U_p \cdot L \cdot (c' + \sigma'_{vm} \cdot K \cdot \tan \delta)$ avec : <ul style="list-style-type: none"> • $U_p = \pi \cdot D = 1,885 \text{ m}$ • $\sigma'_{vm} = [-20 + 20 \cdot L + 5,5 \cdot L^2] / L$ • K admis égal à $K_0 = 1 - \sin \varphi'$ • δ pris égal à φ' $R_{s,cal} = 1,885 \cdot [-20 + 20 \cdot L + 5,5 \cdot L^2] \cdot K \cdot \tan \delta$
Valeur caractéristique	$R_{b,k} = R_{b,cal} / \xi$	$R_{s,k} = R_{s,cal} / \xi$

$$\text{Vérification : } F_{c;d} \leq R_{c;d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} = \frac{R_{b,cal}}{\xi \cdot \gamma_b} + \frac{R_{s,cal}}{\xi \cdot \gamma_s}$$

	Approche de calcul 1		Approche de calcul 2	Approche de calcul 3
	Combinaison 1	Combinaison 2		
Combi.	A1 + M1 + R1	A2 + (M1 ou M2) + R4	A1 + M1 + R2	(A1 ou A2) + M2 + R3
A	A1 $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $F_{c;d} = 1920 \text{ kN}$	A2 $\gamma_G = 1,0$ et $\gamma_Q = 1,3$ $F_{c;d} = 1460 \text{ kN}$	A1 $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $F_{c;d} = 1920 \text{ kN}$	A1 $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $F_{c;d} = 1920 \text{ kN}$
M	M1 $\gamma_M = 1$ $\varphi' = \varphi'_k = 35^\circ$ $N_q = 33,3$ $\chi \approx 3$ $K \cdot \tan \delta = 0,3$ $\xi \geq 1,4$ (1,5 choisi)	M1 $\gamma_M = 1$ $\varphi' = \varphi'_k = 35^\circ$ $N_q = 33,3$ $\chi \approx 3$ $K \cdot \tan \delta = 0,3$ $\xi \geq 1,4$ (1,5 choisi)	M1 $\gamma_M = 1$ $\varphi' = \varphi'_k = 35^\circ$ $N_q = 33,3$ $\chi \approx 3$ $K \cdot \tan \delta = 0,3$ $\xi \geq 1,4$ (1,5 choisi)	M2 $\gamma_{\varphi'} = 1,25$ $\varphi' = \varphi'_d = 29^\circ$ $N_q = 16,44$ $\chi \approx 2,3$ $K \cdot \tan \delta = 0,286$ $\xi = 1,0$
R	R1 $\gamma_b = 1,25$ et $\gamma_s = 1,0$ $R_{c;d} = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s$	R4 $\gamma_b = 1,6$ et $\gamma_s = 1,3$ $R_{c;d} = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s$	R2 $\gamma_b = 1,1$ et $\gamma_s = 1,1$ $R_{c;d} = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s$	R3 $\gamma_b = 1,0$ et $\gamma_s = 1,0$ $R_{c;d} = R_{b,k}/\gamma_b + R_{s,k}/\gamma_s$
Vérific.	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$
longueur	$L \geq \max(8,5 \text{ m} ; 8,3 \text{ m}) = 8,5 \text{ m}$		$L \geq 7,6 \text{ m}$	$L \geq 10,7 \text{ m}$

Estimation empirique à partir du SPT selon Rollberg

Valeur calculée de la charge ultime : $R_{cal} = Q_{b3}$ obtenue par : $\log Q_{b3} = 0,067 + 0,468 \log(F_p \cdot U_p \cdot A_{SPT})$

avec : $A_{SPT} = 0,161 \sum_0^{L+4D} N_{SPT} \cdot \Delta L$

$U_p = \pi \cdot D = 1,885 \text{ m}$

$F_p = \pi \cdot D^2 / 4 = 2827 \text{ cm}^2$

$N_{SPT} = 25$

Valeur caractéristique de la charge ultime : $R_{c;k} = \frac{R_{cal}}{\xi \cdot 1,4}$

avec $\xi = 1,4$ (un seul profil d'essai SPT supposé) et un facteur de modèle supplémentaire de 1,4 introduit afin de s'assurer que la portance estimée soit suffisamment sécuritaire. Ceci semble justifié si l'on garde à l'esprit que l'on estime la capacité portante statique d'un pieu (de plus foré) au moyen d'une sonde de petit diamètre enfoncée dynamiquement dans le terrain.

Vérification : $F_{c;d} \leq R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t}$

La troisième approche de calcul n'est pas appliquée ici parce qu'elle nécessite l'utilisation de paramètres élémentaires de la résistance du sol, alors que l'estimation empirique selon Rollberg fournit directement la résistance.

	Approche de calcul 1		Approche de calcul 2
	Combinaison 1	Combinaison 2	
Combinaison	$A1 + M1 + R1$	$A2 + (M1 \text{ ou } M2) + R4$	$A1 + M1 + R2$
A	$A1 : \gamma_G = 1,35 \text{ et } \gamma_Q = 1,5$ $F_{c;d} = 1920 \text{ kN}$	$A2 : \gamma_G = 1,0 \text{ et } \gamma_Q = 1,3$ $F_{c;d} = 1460 \text{ kN}$	$A1 : \gamma_G = 1,35 \text{ et } \gamma_Q = 1,5$ $F_{c;d} = 1920 \text{ kN}$
M	$M1 : \gamma_M = 1$	$M1 : \gamma_M = 1$	$M1 : \gamma_M = 1$
R	$R1 : \gamma_t = 1,15$ $R_{c;d} = R_{c;k} / \gamma_t$	$R4 : \gamma_t = 1,5$ $R_{c;d} = R_{c;k} / \gamma_t$	$R2 : \gamma_t = 1,1$ $R_{c;d} = R_{c;k} / \gamma_t$
Vérification	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$
Longueur	$L \geq \max(12,0 \text{ m} ; 11,9 \text{ m}) = 12,0 \text{ m}$		$L \geq 10,7 \text{ m}$

Calcul selon le DTU français avec estimation empirique du frottement latéral

	Résistance de pointe	Résistance latérale
Valeur calculée	$R_{b;cal} = A \cdot (50 \cdot N_{qmax} + \lambda \cdot c' \cdot N_c)$ avec : <ul style="list-style-type: none"> $A = \pi \cdot D^2 / 4 = 0,282743 \text{ m}^2$ $N_{qmax} = 10^{3,04 \cdot \tan \phi'}$ $R_{b;cal} = 0,282743 \cdot 50 \cdot N_q$	$R_{s;cal} = U_p \cdot q_{s,k} \cdot L$ avec : <ul style="list-style-type: none"> $U_p = \pi \cdot D = 1,885 \text{ m}$ $q_{s,k} = 70 \text{ kN/m}^2$ (valeur caract. estimée) $R_{s;cal} = 1,885 \cdot 70 \cdot L$
Valeur caractéristique	$R_{b;k} = R_{b;cal} / \xi$	$R_{s;k} = R_{s;cal} / \xi$

$$\text{Vérification : } F_{c;d} \leq R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} = \frac{R_{b;cal}}{\xi \cdot \gamma_b} + \frac{R_{s;cal}}{\xi \cdot \gamma_s}$$

	Approche de calcul 1		Approche de calcul 2	Approche de calcul 3
	Combinaison 1	Combinaison 2		
Combi.	A1 + M1 + R1	A2 + (M1ou M2) + R4	A1 + M1 + R2	(A1ou A2) + M2 + R3
A	A1 $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $F_{c;d} = 1920$ kN	A2 $\gamma_G = 1,0$ et $\gamma_Q = 1,3$ $F_{c;d} = 1460$ kN	A1 $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $F_{c;d} = 1920$ kN	A1 $\gamma_G = 1,35$ et $\gamma_Q = 1,5$ $F_{c;d} = 1920$ kN
M	M1 $\gamma_M = 1$ $\varphi' = \varphi'_k = 35^\circ$ $N_{q \max} = 134,5$ $q_s = q_{s;k} = 70$ kN/m ² $\xi \geq 1,4$ (1,4 choisi)	M1 $\gamma_M = 1$ $\varphi' = \varphi'_k = 35^\circ$ $N_{q \max} = 134,5$ $q_s = q_{s;k} = 70$ kN/m ² $\xi \geq 1,4$ (1,4 choisi)	M1 $\gamma_M = 1$ $\varphi' = \varphi'_k = 35^\circ$ $N_{q \max} = 134,5$ $q_s = q_{s;k} = 70$ kN/m ² $\xi \geq 1,4$ (1,4 choisi)	M2 $\gamma_{\varphi'} = 1,25$ $\varphi' = \varphi'_d = 29^\circ$ $N_{q \max} = 48,43$ $q_s = q_{s;d} = q_{s;k} / 1,25$ $\xi = 1,0$
R	R1 $\gamma_b = 1,25$ et $\gamma_s = 1,0$ $R_{c;d} = R_{b;k}/\gamma_b + R_{s;k}/\gamma_s$	R4 $\gamma_b = 1,6$ et $\gamma_s = 1,3$ $R_{c;d} = R_{b;k}/\gamma_b + R_{s;k}/\gamma_s$	R2 $\gamma_b = 1,1$ et $\gamma_s = 1,1$ $R_{c;d} = R_{b;k}/\gamma_b + R_{s;k}/\gamma_s$	R3 $\gamma_b = 1,0$ et $\gamma_s = 1,0$ $R_{c;d} = R_{b;k}/\gamma_b + R_{s;k}/\gamma_s$
Vérfic.	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$	$F_{c;d} \leq R_{c;d}$
longueur	$L \geq \max(8,9 \text{ m} ; 8,5 \text{ m}) = 8,9 \text{ m}$		$L \geq 8,0 \text{ m}$	$L \geq 11,7 \text{ m}$

4.2.4 Synthèse

Le tableau ci-après synthétise les longueurs de pieux nécessaires pour vérifier la portance du sol, en fonction des différentes méthodes de calcul (lignes) et des divers documents normatifs (colonnes).

	Ancienne pratique	SIA 267	Eurocode 7		
			Approche 1	Approche 2	Approche 3
Lang & Huder	15,3 m	10,2 m	8,5 m	7,6 m	10,7 m
Berezantzev ¹	14,2 m (18,1)	16,9 m	-	-	-
Rollberg	11,2 m	10,9 m	12,0 m	10,7 m	-
DTU avec q_s analytique	20,5 m	21,5 m	-	-	-
DTU avec q_s empirique	11,6 m	12,6 m	8,9 m	8,0 m	11,7 m

Tableau 9 : Tableau récapitulatif des calculs de comparaison selon l'ancienne pratique, la norme suisse SIA 267 et l'Eurocode 7 EN1997-1.

Sur ce même exemple n°3 de dimensionnement à partir des paramètres de sol, les représentants de 10 pays de l'Union Européenne ont obtenu selon l'EC7 des longueurs de pieux comprises entre 10 et 42,8 m !, 8 solutions étant dans la fourchette de 10 à 20 m. Une analyse des résultats [20] montre que les différences

¹ Selon des calculs de H.R. Schneider [16], qui représente la Suisse auprès du groupe de travail de l'EC7, pour un dimensionnement sans prise en compte du poids propre du pieu. Les calculs sont basés sur Berezantzev [17] en tenant compte de la réduction proposée du terme N_q en fonction de la profondeur (N_q d'environ 50 pour un rapport L/D de 25) et en prenant, pour l'ancienne pratique, un facteur de sécurité global de 2 pour le terme de pointe et de 3 sur le frottement latéral ; ce dernier étant calculé de manière pratiquement identique à la méthode de Lang & Huder. La valeur donnée entre parenthèses correspond à un facteur global de sécurité de 3 sur le terme de pointe et de 2 sur le frottement latéral.

résultent essentiellement des modèles de calcul utilisés et que l'approche de calcul retenue joue un rôle moins significatif. Comme pour les résultats synthétisés dans le tableau 9, la troisième approche de calcul apparaît comme la plus conservatrice. Dans l'approche 1, la première combinaison est un peu plus conservatrice que la seconde.

Cet exemple de calcul de fondation sur pieu à partir des paramètres de sol souligne que le choix de la méthode (modèle) de calcul est susceptible de conditionner beaucoup plus le résultat que la norme utilisée pour la vérification. Ceci confirme donc, si besoin était, l'importance du modèle de calcul retenu et la connaissance des hypothèses et incertitudes qui lui sont associées. Cet exemple permet également de saisir pourquoi il est tellement impératif qu'un modèle de calcul, qu'il soit analytique, semi-empirique ou numérique, ait été validé par des essais de chargement statique dans des situations comparables (sol, pieu, chargement...).

Alors que la méthode de vérification de la portance des pieux sous charge axiale préconisée dans la SIA 267 s'apparente le plus à la deuxième approche de calcul proposée dans l'EC7, il ressort de cet exemple de dimensionnement à partir des paramètres de sol que les résultats obtenus par ces deux approches sont souvent les plus éloignés. En revanche, les longueurs obtenues par la troisième approche de calcul de l'Eurocode 7, quand elle est applicable, sont comparables avec celles calculées par la SIA 267.

Pour ce type de vérification basé sur des paramètres de résistance du sol, un travail d'harmonisation semble donc encore nécessaire afin que la SIA 267 puisse à terme (au-delà de 2010) être conforme à l'Eurocode 7 et remplir le rôle de document national d'application. Après évaluation et comparaison des deux documents normatifs sur plusieurs exemples, cet objectif pourra être atteint en spécifiant dans la future annexe nationale à l'EN 1997-1 laquelle des procédures de calcul est à utiliser en Suisse et/ou en adaptant les valeurs des facteurs partiels de sécurité et des facteurs de conversion.

4.2.5 Proposition

Les développements récents ont privilégié l'apparition de méthodes semi-empiriques de dimensionnement des fondations profondes, basées sur les résultats d'essais in situ et calées sur des essais de pieux. Il est ainsi fortement recommandé de baser son dimensionnement sur de telles méthodes, ou du moins de vérifier avec celles-ci les ordres de grandeurs obtenus par les méthodes analytiques.

Si toutefois une méthode de calcul analytique était employée, cette dernière devrait tenir compte des considérations suivantes, essentiellement tirées des enseignements des essais de pieux :

- Le terme de pointe ne croît pas indéfiniment avec la profondeur et devient pratiquement constant à partir d'une certaine profondeur, parfois qualifiée de critique. Cette constatation avait déjà amené Berezantzev [17], en 1961, à introduire un facteur de réduction du terme de pointe en fonction de l'angle de frottement et du rapport L/D. Pour ces mêmes raisons, les DTU [15] proposent de prendre, pour le calcul du terme de pointe, la formule de Tcheng, également basée sur des essais de pieux.
- Les valeurs de frottement latéral tirées de l'expérience sont bien souvent supérieures à celles déduites des formules analytiques ; ce qui a pour corollaire de sous-estimer la part reprise par frottement latéral.

Partant de ces constats, si le dimensionnement des pieux est effectué au moyen d'une méthode analytique, il est proposé de se baser sur les DTU pour le calcul du terme de pointe et d'augmenter le paramètre K du terme de frottement latéral dans la formule suivante :

$$R_{a,k} = R_{b,k} + R_{s,k} = A \cdot (50 \cdot N_{qmax} + \lambda \cdot c' \cdot N_c) + \sum U_p \cdot L \cdot (c' + \sigma'_{vm} \cdot K \cdot \tan \delta)$$

avec $N_{qmax} = 10^{3,04 \cdot \tan \varphi'}$ (Tcheng)

K : pieux battus à refoulement : $\frac{2}{3} K_p$ avec une valeur "minimale" de K_p (p.ex Rankine)
 pieux battus sans refoulement : $\frac{1}{2} K_p$
 pieux forés : $\frac{1}{3} K_p$

Ce coefficient K a été déterminé de manière purement «subjective» pour retrouver, pour les pieux forés du moins, des ordres de grandeur de la résistance au frottement latéral unitaire approchant les valeurs tirées de l'expérience. Il est à noter que ce coefficient est significativement plus grand que les valeurs habituellement admises sur base de considérations d'ordre théorique, en particulier $K_a \leq K \leq K_0$ pour les pieux forés simple ou sous boue et K_0 pour les pieux forés tubés ou battus sans refoulement. En toute rigueur, en plus du procédé d'exécution, l'estimation du coefficient K de poussée des terres devrait également considérer la géométrie du pieu (profondeur, rapport L/D) et les conditions géotechniques locales (état initial de contrainte, compacité, présence d'eau). Finalement, il convient de remarquer que la résistance au frottement latéral unitaire s'avère parfois être indépendante de la profondeur, et donc de la contrainte verticale moyenne...

Avec la formule proposée, et pour l'exemple n°3 de l'ERTC 10 repris ci-dessus, les longueurs de pieux seraient de 14,0 m selon l'ancienne pratique (pas de minoration de l'angle de frottement) et de 12,1 m selon la SIA 267. Pour les calculs de comparaison présentés dans la documentation SIA D 0187 [18], les longueurs d'encastrement obtenues avec la méthode proposée sont, pour l'exemple de *pieu colonne*, de 1,0 m pour un dimensionnement selon la SIA 267 et de 1,3 m selon l'ancienne pratique, et pour l'exemple de *pieu flottant*, de 18,0 et 17,0 m respectivement. Les longueurs ainsi obtenues sont pratiquement identiques à celles calculées et exposées dans cette documentation D 0187 [18].

5. Conclusions

L'Eurocode 7 contribue à l'identification d'un langage commun à la profession géotechnique, au dialogue indispensable entre géotechniciens et ingénieurs de structure, et à la promotion d'une assurance-qualité unifiée à l'échelle européenne. La SIA 267, qui est amenée à remplir à terme le rôle de document national d'application, s'inscrit dans cet effort d'unification.

Les règles générales du calcul géotechnique de l'EC7 et de la SIA 267 ne constituent cependant pas un manuel d'apprentissage, mais bien des codes rédigés à l'intention d'ingénieurs compétents et expérimentés [9]. L'article 1.3(2) de l'EC7 signale à ce propos que les dispositions normatives reposent notamment sur les hypothèses que :

- les données nécessaires au calcul sont recueillies, enregistrées et interprétées par du personnel possédant les qualifications nécessaires ;
- les structures sont calculées par du personnel possédant les qualifications et l'expérience nécessaires ;
- l'exécution des travaux est effectuée conformément aux normes et spécifications correspondantes, par un personnel possédant les compétences et l'expérience appropriées.

Ces conditions soulignent l'importance de chacune des étapes d'un projet : recueil des données, calcul, exécution des travaux. L'article 2.4.1(2) de l'EC7 relativise même le dimensionnement par calcul en stipulant que la connaissance des conditions de terrain 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 coefficients partiels. Des méthodes de dimensionnement alternatives sont d'ailleurs proposées, par mesures prescriptives, par essais de chargement ou par la méthode observationnelle.

L'exemple de dimensionnement de fondation sur pieu à partir des paramètres de sol (exemple n°3 de l'ERTC 10 du CEN/TC 250), en soulignant que le choix du modèle de calcul est susceptible de conditionner significativement les résultats, illustre clairement pourquoi il est tellement impératif qu'un modèle de calcul, qu'il soit analytique, semi-empirique ou numérique, ait été validé par des essais de chargement statique dans des situations comparables. Il est de ce point de vue heureux de constater que la SIA 267 et l'Eurocode 7 conduisent aux mêmes résultats lorsque les vérifications des ELU et ELS sont basées sur des essais de chargement statique (exemple n°4 de l'ERTC 10 du CEN/TC 250).

D'un point de vue théorique, il ressort de la comparaison des documents normatifs suisse et européen que la méthode de vérification de la portance des pieux sous charge axiale préconisée dans la SIA 267 s'apparente à la deuxième des 3 approches de calcul proposées dans l'EC7. Une harmonisation de ces deux documents devrait être aisée en spécifiant dans la future annexe nationale suisse à l'EN 1997-1 que la procédure à utiliser en Suisse pour cette vérification de la portance sous charge axiale est l'approche n° 2.

Cependant, sur base de l'exemple de dimensionnement à partir des paramètres de sol, il apparaît que les résultats numériques obtenus par la SIA 267 et cette deuxième approche de calcul proposée dans l'EC7 sont assez éloignés. En revanche, les longueurs de pieux obtenues par la troisième approche de l'Eurocode 7 sont comparables avec celles calculées par la SIA 267.

En conclusion, on note que, même si les principes des Eurocodes ont largement inspiré la rédaction des Swisscodes et donc de la SIA 267, certaines différences subsistent. Les recommandations et directives des normes nationales transposant les Eurocodes ne devant pas créer de contradictions avec ceux-ci, il sera nécessaire, dès que tous les Eurocodes seront publiés (2006), de procéder à la révision des normes SIA dans le but de parvenir à une « parfaite » conformité des principes [19]. Ce travail, piloté par la KTN/CNS, devrait permettre une harmonisation complète des Swisscodes aux normes européennes et dès lors leur maintien comme documents de base à l'élaboration des projets de structures porteuses en Suisse au-delà de 2010.

6. Références

- [1] Swisscodes. Normes suisses sur les structures porteuses SIA 260 à 267 éditées par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, 2003.
- [2] Norme SIA 192 : Fondations sur pieux. Norme suisse éditée par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, 1975.
- [3] Norme SIA V 192 : Pieux. Norme suisse éditée par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, SN 533 192, 1996, 44 pp.
- [4] Eurocode 7, Calcul géotechnique - Partie 1 : Règles générales. Prénorme européenne éditée par le Comité Européen de Normalisation CEN/TC 250, ENV 1997-1, SIA V 193.001, 1995, 139 pp.
- [5] SIA 267, Géotechnique. Norme suisse éditée par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, SN 505 267, 2003, 102 pp.
- [6] SIA 267/1, Géotechnique - spécifications complémentaires. Norme suisse éditée par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, SN 505 267/1, 2003, 44 pp.
- [7] Eurocode 7, Calcul géotechnique - Partie 1 : Règles générales. Norme européenne éditée par le Comité Européen de Normalisation CEN/TC 250, EN 1997-1, 2004, 170 pp.
- [8] Eurocode 7, Calcul géotechnique - Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais. Norme européenne éditée par le Comité Européen de Normalisation CEN/TC 250, EN 1997-2, 2006, 195 pp.
- [9] Descoedres F., 1996. L'Eurocode 7 : Règles de conception et principes de dimensionnement. Documentation SIA D 0130 : Nouvelles normes en géotechnique (CEN et SIA). pp. 7-14.
- [10] Ireland H.O., 1957. Pulling Tests on Piles in Sand. Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London. Vol. 2, pp. 43-45.
- [11] Sinniger R. et al. (1981), Fondations - Première partie. Polycopié de cours, EPFL, 292 pp
- [12] ERTC 10 - Evaluation of Eurocode 7, 2005. Design Examples For Eurocode 7 Workshop at Trinity College on 31 March & 1 April 05. Document CEN/TC 250 N 662. 7 pp.
- [13] Lang H.J., Huder J., Amann P., 2003. Bodenmechanik und Grundbau - Das Verhalten von Boden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. Ed. Springer. 317 pp.
- [14] Rollberg D., 1977. Bestimmung der Tragfähigkeit und des Rammwiderstandes von Pfählen und Sondierungen. T.H. Aachen.
- [15] Document Technique Unifié DTU 13.2 : Fondations profondes pour le bâtiment. Fascicule P 11-212 élaboré par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment français CSTB. 1992.
- [16] Schneider H.-R., 2005. Exemples ERTC no 1 à 10. Communication personnelle.
- [17] Berezantzev V. G., Khristoforov V.S., Golubkov V.N., 1961. Load Bearing Capacity and Deformation of Piled Foundations. Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris. Vol. 2, pp. 11-15.
- [18] Fontana O., 2003. Fondations. Documentation SIA D 0187 : Géotechnique, introduction à la norme SIA 267. pp. 49-63.
- [19] Matt P., Hirt M., 2003. Importance de la réglementation européenne pour les nouvelles normes de structures SIA 260 à SIA 267. Documentation SIA D 0181 : Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses ; Actions sur les structures porteuses. pp. 91-106.
- [20] Frank R., 2005. Les différentes approches de calcul. Communication faite dans le cadre d'une formation continue de l'Ecole des Ponts: Applications de l'Eurocode 7 - Le calcul des fondations. Novembre 2005.

Auteurs

V. Labieuse
Laboratoire de Mécanique des Roches LMR
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL
Station 18
1015 Lausanne (VD)

O. Fontana
De Cérenville Géotechnique SA
17 ch. des Champs-Courbes
1024 Ecublens (VD)