



Eaux souterraines et profil piézométrique 26 Profilage des sols et classification des sols 27 Profils non normalisés SBT 27 Profils équivalents SPT N 36 60 Poids unitaire du sol (=) 39 Résistance (s) 41 u Sensibilité du sol (S) 42 t Ratio de résistance (s / '=') 43 u vo Ratio de

.....

.....

.....

La méthode de calcul de la pression interstitielle mesurée est inférieure à la pression interstitielle interstitielle. La pression interstitielle mesurée est inférieure à la pression interstitielle interstitielle. La pression interstitielle normalisée par rapport à la résistance interstitielle.

Le tableau 2 présente une liste partielle des principaux essais in situ et leur applicabilité perçue dans des conditions de sol différentes.

Tableau 2. L'applicabilité et l'utilité des essais in situ (Lunne, Robertson et Powell, 1997, mise à jour par Robertson, 2012)

3 CPT Guide - 2022

Rôle du CPT

Le CPT Test de pénétration du cône (CPT) et ses versions améliorées telles que le piézocône (CPTu) et le sismique (SCPT), ont des applications étendues dans une large gamme de sols. Bien que le CPT ait été initialement limité à des sols plus souples, avec un équipement de poussée moderne et des cônes plus robustes, le CPT peut être effectué dans des sols rigides à très raides, et dans certains cas à des roches molles.

[illegible]

Dans le cas de l'analyse de la charge nulle, les cellules de charge n'ont pas besoin d'être étalonnées. Pour les grands projets, les étalonnages peuvent être effectués avant et après le travail sur le terrain, avec des contrôles fonctionnels pendant le travail. Les contrôles fonctionnels devraient comprendre l'enregistrement et l'évaluation des mesures de la charge nulle (lectures de base). Avec une conception, un étalonnage et un entretien minutieux, les cellules de charge et les transducteurs de pression de déformation peuvent avoir une précision et une répétabilité supérieures à $\pm 0,1 \%$ de la production à pleine échelle (FSO). Le tableau 3 présente un résumé des vérifications et des réétalonnages pour le CPT.

[illegible]

La plupart des corrélations ont un cadre théorique, mais restent semi-empiriques en raison du comportement complexe de la plupart des sols naturels. Ces corrélations varient en termes de fiabilité et d'applicabilité. Comme le CPT a des capteurs supplémentaires (p. ex. pression interstitielle, CPTu et sismique, SCPT), l'applicabilité pour

Si l'expérience CPT, dans un environnement géologique, est disponible et que les diagrammes ont été évalués sur la base de cette expérience, un échantillonnage fréquent peut ne pas être nécessaire. Le comportement du sol peut être amélioré si des mesures de pression interstitielle sont

également recueillies, comme le montre la figure 24. Dans les argiles molles et les limons, les pressions interstitielles de pénétration peuvent être très importantes, tandis que dans les argiles fortement surconsolidées ou les limbes denses et les sables silty, les pressions interstitielles de pénétration (u) peuvent être petites et parfois négatives par rapport aux pressions interstitielles d'équilibre (u_0). La vitesse de dissipation de la pression interstitielle pendant une pause de pénétration peut également guider le type de sol.

L'indice du comportement du sol ne s'applique pas aux zones 1, 8 et 9. Les profils de I fournissent un guide simple de la variation continue du comportement du sol dans chaque profil du sol en fonction des résultats CPT. 32 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Des études indépendantes ont montré que le diagramme SBT normalisé présenté à la figure n 23 présente généralement une fiabilité supérieure à 80 % par rapport aux échantillons. Les différences sont souvent dues à la présence de microstructures du sol (comme le vieillissement et le collage). Schneider et al (2008) ont proposé un diagramme du type de sol basé sur le CPT basé sur la résistance au cône normalisé (Q) et une pression interstitielle excessive normalisée ($U = u / u_0$). L'application du diagramme Schneider et al peut être problématique pour certains projets terrestres où les résultats de la pression interstitielle du CPT peuvent ne pas toujours être fiables, en raison de la perte de saturation du sol.

La figure CPT est la figure CPT (après Robertson, 2016) 33 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Figure 25 (b). La figure CPT normalisée Type de sol (SBT) n Figure $Q - F$ (après Robertson, 2016) La limite entre le comportement contractif et dilatif à de grandes souches sur la figure $Q - F$ est définie par : $tn r CD = 70 = (Q - 11) (1 + 0,06F)$ 17 $tn r$ Robertson (2016) a également suggéré un indice de type de comportement du sol modifié, $I : B I = 100(Q + 10) / (70 + Q F)$ $B tn tn r$ La figure SBT modifiée capture les limites de la SBT mieux que la courbe $B I$ originale. Il s'agit d'une représentation visuelle du type SBT estimé sur le profil CPT, soit la couleur ajoutée sous la courbe de résistance au cône, soit sur la courbe I ou I_c B Profils SPT équivalents 60 Le test de pénétration standard (SPT) a été l'un des essais in situ les plus courants dans de nombreuses parties du monde, en particulier en Amérique du Nord et du Sud. Malgré les efforts continus pour normaliser la procédure et l'équipement SPT, il y a encore des problèmes liés à sa répétabilité et à sa fiabilité. Cependant, certains ingénieurs géotechniques ont acquis une expérience considérable des méthodes de conception basées sur des corrélations SPT locales.

CPT-SPT corrélations avec la taille moyenne du grain (Robertson et al., 1983) Les corrélations ci-dessus nécessitent l'information sur la taille du grain du sol pour déterminer la taille moyenne du grain (ou la teneur en fines) Les caractéristiques du grain peuvent être estimées directement à partir des résultats du CPT à l'aide des diagrammes du type de comportement du sol (STB). Les diagrammes du CPT-SBT montrent une tendance claire à l'augmentation du rapport de frottement avec la teneur en fines et la taille décroissante du grain. Robertson et al. (1986) ont suggéré des ratios $(q / p) / N$ pour chaque c a 60 37 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test de comportement du sol à l'aide du diagramme du CPT non normalisé et du rapport $(q / p) / N$ suggéré pour chaque type de comportement du sol est donné dans le tableau 5. c a 60 Ces valeurs fournissent une estimation raisonnable des valeurs de N du SPT à partir des données du CPT. 60 Pour simplifier les corrélations ci-dessus sont données en fonction de la nature de l'argile sempée.

Dans le cas du sol, l'indice du type de sol, I_c peut être combiné avec les rapports CPT-SPT pour donner la relation simple et continue suivante:

(q/p) $I_t a = 8.5, 1, c, N, 4, 6, 60$ Robertson (2012) a suggéré une mise à jour de la relation ci-dessus qui fournit des estimations améliorées de N pour les argiles insensibles: 60 38 CPT Guide - 2022 Essai de pénétration des cônes (CPT) (q/p) $t a = 10 (1.1268 - 0.2817I_c)$ N 60 Jefferies et Davies (1993) a suggéré que l'approche ci-dessus peut fournir de meilleures estimations de N - valeurs SPT réelles en raison de la faible répétabilité du SPT.

La méthode utilisée pour estimer les poids unitaires du sol à partir des données CPT (p. ex., Mayne et al., 2010; Lengkeek et al., 2018) ainsi que les méthodes fondées sur l'apprentissage par machine. La méthode utilisée par Lengkeek et al. (2018) était basée principalement sur les sols organiques mous des Pays-Bas. 40 CPT Guide - 2022 Essai de pénétration du cône (CPT) Résistance au cisaillement non drainé (s_u) Il n'existe pas de valeur unique de résistance au cisaillement non drainée, s_u , puisque la réponse u non drainée du sol dépend de la direction de chargement, de l'anisotropie du sol, du taux de déformation et de l'historique des contraintes.

Dans des conditions très sensibles de sol à grain fin, où $B \sim 1,0$, N peut être inférieur à q_{kt} . Pour déterminer la concentration en rainure élevée, Mayne et Peuchen (2022) suggèrent la relation suivante à partir de données provenant de 70 dépôts d'argile : $N = 10,5 - 4,6 \ln (B + 0,1)$ kt q Cette approche nécessite des données fiables sur la pression interstitielle pour déterminer B . q 41 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Pour les dépôts où peu d'expérience est disponible, estimer s_u en utilisant les valeurs corrigées de résistance au cône $u(q)$ et les valeurs préliminaires de facteur de cône (N) de 14 à 16. Pour une estimation plus prudente, choisir une valeur proche de la limite supérieure.

En conséquence, la sensibilité d'une argile peut être estimée en calculant les pics à partir de l'un ou l'autre site, c'est-à-dire des corrélations simples avec q ou u , c'est-à-dire les valeurs suivantes : 42 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) s_q , $S = u = t v (1 / f) \sim 7 / F$ (sur la base de $N = 14$) t_r kt s_N u (Rem) kt Pour les argiles relativement sensibles ($S > 10$), la valeur de f peut être très faible avec des difficultés inhérentes de précision. Par conséquent, l'estimation de la sensibilité (et de la résistance reformée) du CPT doit être utilisée comme guide.

Par conséquent, le rapport de résistance non drainée (Rem) s_u ($s_u \neq k$) est: $u(Rem) v o s \neq f \neq = (F \cdot Q) / 100 u(Rem) v o s t$ 43 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Il est donc possible de représenter ($s_u \neq f \neq$) les contours linéaires sur le graphique $U(Rem) v o s$ normalisé SBT (Robertson, 2009 - voir Figure 23) lorsque $I > \sim 2.6$. n_c Rapport de surconsolidation (OCR) et le rapport de surconsolidation (YD Stress (=) y La surconsolidation (OCR) est souvent définie comme le rapport du stress de consolidation effectif maximal et du stress de surcharge actuel: $= OCR = p \phi' vslidé = sole$ sursolidé mécaniquement (SR) et le rapport de surconsolidation (SR) sont également calculés.

44 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Si l'expérience antérieure est disponible dans le même gisement, la valeur de k devrait être ajustée pour refléter cette expérience et pour fournir un profil plus fiable de l'OCR. La méthode plus simple Kulhawy et Mayne est valable pour $Q < 20$. t Pour les projets de grande envergure, à risque modéré à élevé, où des données de terrain et de laboratoire de haute qualité supplémentaires peuvent être disponibles, des corrélations spécifiques au site devraient être développées sur la base de valeurs cohérentes et pertinentes de l'OCR (ou de l'YSR). Agaiby et Mayne (2019) ont suggéré une extension de cette approche qui peut être appliquée à tous les sols sur la base de ce qui suit :

Par conséquent, la constante d'estimation de l'OCR peut être automatiquement estimée à partir des résultats CPT en utilisant: $k = [(Q)0.2 / (0.25 (10,5+7 \log F))]1.25$ t $ROC = (2.625+ 1,75 \log F) -1.25 (Q)1.25$ r t Ceci représente une méthode d'estimation automatique de l'état in situ (OCR) dans les sols à grains fins, basée sur des résultats CPT mesurés, de manière cohérente. Ceci se compare très étroitement à la forme suggérée par Karlsrud et al (2005) à partir d'échantillons de blocs de haute qualité en Norvège (lorsque la sensibilité du sol est inférieure à 15) et t à partir de CSSM: $OCR = 0,25 (Q)1.2$ t Lorsque $Fr \sim 2\%$ les deux approches donnent essentiellement le même résultat. 46 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) In-Situ Stress Ratio (K) Il n'existe pas de méthode fiable pour déterminer K à partir de CPT.

La relation peut alors être simplifiée pour la plupart des jeunes sables propres non cimentés ($I < 1,6$) à : $c D^2 = Q / 350 r_{tn}$ L'approche peut être étendue aux sables silts ($I < 2,6$), où le processus de pénétration CPT est drainé, en utilisant l'équivalent de sable propre normalisé, Q (voir $t_{n,cs}$ Figure 48 pour les détails). $D^2 = Q / 350 r_{n,cs}$ Bray et Olaya (2022) a suggéré une version simplifiée mise à jour basée sur des sables silents non plastiques : $D^2 = (Q I^{3.5}) / 1500 r_{tn}$ c Les corrélations ci-dessus ne s'appliquent qu'aux sols qui n'ont que peu ou pas de microstructure. La figure 30 montre les données du projet de recherche CANLEX (Fear et al., 2000) qui illustrent la variation de la corrélation avec l'âge.

En ce qui concerne la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal est la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'état normal, la méthode de calcul de l'estimation de l'état de l'état de l'état de l'état

On a développé de nombreuses solutions théoriques pour calculer le coefficient de consolidation à partir des données de dissipation de la pression interstitielle CPT. Le coefficient de consolidation peut être interprété à 50 % de dissipation, à l'aide de la formule de base ci-après : $T = \frac{r^2}{c}$ où T = rayon du pénétromètre ou I = indice de rigidité du sol = G/s r u 63 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Il est clair de cette formule que le temps de dissipation est inversement proportionnel au rayon de la sonde. Ainsi, dans les sols de très faible perméabilité, le temps de dissipation peut être diminué en utilisant des sondes plus petites de diamètre (Robertson et al. (1992) ont examiné les données de dissipation provenant du monde entier et ont comparé les résultats de la solution théorique de Teh et de Houlsby (1991), comme le montre la figure 36. Dans le cas de l'élimination des pores, la grande différence entre les pressions interstitielles sur la face du cône (u) et derrière le cône (u) peut entraîner une augmentation initiale des pressions interstitielles au cours d'un 2 2 65 CPT Guide - 2022 Essai de pénétration des cônes Test de dissipation en raison de la redistribution locale ou des pressions interstitielles autour du cône avant que la dissipation radiale ne domine. Il faut veiller à ce que la dissipation soit maintenue à l'équilibre correct (u) et ne s'arrête pas prématurément après la montée initiale. Dans ces cas, le capteur de pression interstitielle peut être déplacé vers la face du cône (u) ou le temps t peut être estimé en utilisant la pression interstitielle maximale de 1 50 la valeur initiale. Le gradient de la ligne droite initiale est le suivant : $c = \frac{(m/M)^2 r^2}{(I)^0,5 h T r M}$ = 1,15 pour la position u et le cône de 10cm² (c.-à-d. r = 1,78 cm). T 2 66 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT)

Constrained Modulus Les règlements de consolidation peuvent être estimés à l'aide des résultats du CPT 1-D Constrained Modulus, M , où : $M = 1/ m =$

[illegible]

[illegible]

Pour la plupart des valeurs de l'élasticité du sol E = modulus de
l'élasticité du sol F = largeur de la base I = moment d'inertie F =
coefficient d'inertie G = coefficient d'élasticité G = coefficient
d'élasticité G = coefficient d'élasticité G = coefficient d'élasticité G
= coefficient d'élasticité G = coefficient d'élasticité G = coefficient
d'élasticité G = coefficient d'élasticité G = coefficient d' élasticité G
= coefficient d' élasticité G = coefficient d' élasticité G = coefficient
d' élasticité G = coefficient d' élasticité G = coefficient d' élasticité
G = coefficient d' élasticité G = coefficient d' élasticité G =
coefficient d' élasticité G = coefficient d' élasticité G = coefficient
d' élasticité G = coefficient d' élasticité G = coefficient d' élasticité
G = coefficient d' élasticité G = coefficient d' élasticité G =
coefficient d' élasticité G = coefficient d' élasticité

[illegible][illegible]

En règle générale, pour les sols cohésifs: 0.25 - 0.32, et $N = 3 - 10$ t. Les concepts de contrainte efficaces peuvent ne pas modifier radicalement les règles de conception empiriques, mais peuvent accroître la confiance dans ces règles et permettre l'extrapolation à de nouvelles situations. Approche de contrainte totale (=) Il a été courant de concevoir des pieux dans des sols cohésifs, en fonction de la contrainte totale et de la résistance au cisaillement non drainée, s_u . 92 CPT Guide - 2022 CPT Test de pénétration des cônes (CPT) frottement latéral unitaire, $f = p - p_u$ roulement à l'extrémité de l'unité, $q = N_s p t u$ Où : $= 0.5 - 1.0$ selon l'OCR et N varie de 6 à 9 t selon la profondeur d'enrobage et la taille des pieux. Approche empirique Méthode CPT La recherche a montré (Robertson et al., 1988; Briaud et Tucker, 1988; Tand et Funegard, 1989; Les facteurs CPT sont les suivants :

La méthode CPT (Bustamante et GIANESELLI, 1982) La méthode de Bustamante et GIANESELLI est basée sur l'analyse de la charge des pieux (et de l'extraction) avec une large gamme de types de pieux et de sols, ce qui peut expliquer en partie les bons résultats obtenus avec la méthode. La méthode, également connue 93 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test comme la méthode LCPC, est résumée dans le tableau 12 et le tableau 13. La méthode LCPC a été mise à jour avec de petits changements par Bustamante et Frank, (1997) Tableau 12 Facteurs de capacité de roulement, k_c (Bustamante et GIANESELLI, 1982) La méthode de roulement à l'extrémité des pieux, q , est calculée à partir de la résistance moyenne à l'extrémité des pieux, q , multipliée par un coefficient de roulement final, q (tableau 12).

La deuxième étape consiste à éliminer les valeurs supérieures à $1,3q'$ le long de la longueur $-a$ à $+a$, et ca les valeurs inférieures à $0,7q'$ le long de la longueur $-a$, qui génère la courbe épaisse ca montrée à la figure 43. La troisième étape consiste à calculer q , la valeur moyenne de la courbe épaisse ca. 95 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Figure 43. Calcul de la résistance moyenne équivalente au cône (Bustamante et GIANESELLI, 1982). Plus récemment, de nouvelles méthodes ont été développées pour estimer la capacité axiale des pieux (p. ex. Niazi, F.S. et Mayne P.W., 2016 et Lehane et al., 2022). Fellenius (2022) décrit une approche de conception unifiée basée sur la conception de fondations en tenant compte des règlements réels et acceptables, au lieu de fonder la conception sur une "capacité" de pieux réduite par divers facteurs de sécurité ou de résistance.

Les facteurs de sécurité sont généralement de l'ordre de 2, bien que les valeurs réelles soient parfois plus élevées, car des facteurs partiels de sécurité sont parfois appliqués au cours des calculs (en particulier aux forces du sol) avant d'arriver à la capacité de pieux ultime. Les facteurs de sécurité recommandés pour le calcul de la capacité axiale des pieux du CPT sont donnés dans le tableau 14. Facteur de méthode de sécurité (FS) Bustamante et 2.0 (Q) s GIANESELLI (1982) 3.0 (Q) b de Ruiter et Beringen 2.0 (charges statiques) (1979) 1.5 (charges statiques + tempêtes) Tableau 14 Facteurs de sécurité du calcul de la capacité axiale des pieux du CPT.

Pour les grands projets, il est courant d'appliquer des méthodes statiques (c'est-à-dire la méthode LCPC CPT) pour obtenir une première estimation de la capacité, d'appliquer la dynamique des pieux si des pieux entraînés sont sélectionnés (aide à la sélection des marteaux, aux contraintes de conduite, aux critères de conduite) et d'effectuer un petit nombre d'essais de charge des pieux pour évaluer la réponse des pieux et pour étalonner la méthode statique. Les résultats des essais de charge des pieux peuvent être utilisés pour modifier la prévision statique (c'est-à-dire la prévision CPT) de la capacité des pieux et la méthode modifiée appliquée à travers le site.

La résistance à l'arbre doit être estimée avec prudence, en raison d'un éventuel mauvais 98 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) contact entre la roche et le pieu, concentration de contrainte possible et défaillance progressive résultante. Règlement du pieu Bien que l'installation des pieux modifie les caractéristiques de déformation et de compressibilité du sol, la masse du sol qui régit le comportement des pieux isolés sous charge, cette influence ne s'étend généralement que sur quelques diamètres de pieux sous la base du pieu. Meyerhof (1976) a suggéré que le règlement total d'un groupe de pieux à la charge de travail peut généralement être estimé en supposant une fondation équivalente.

Il est donc souvent important de définir correctement les proportions de résistance (Q/Q). b s Des méthodes ont été développées pour estimer les courbes charge-transfert ($t-z$) (Verbrugge, 1988, Lehane et al., 2022). Cependant, ces méthodes sont approximatives et sont fortement influencées par l'installation des pieux et le type de sol. La méthode recommandée pour estimer la réponse charge-reportage pour les pieux simples est de suivre les directives générales ci-dessus concernant le développement de chaque élément de résistance. 99 CPT Guide - 2022 Essai de pénétration des cônes Friction de l'arbre négatif et descente sur les pieux Lorsque le sol autour d'un tas s'installe, le mouvement vers le bas peut induire des forces vers le bas sur le tas. L'ampleur de l'installation peut être très faible pour développer ces forces vers le bas.

Il peut s'agir d'une solution théorique simplifiée (Poulos et Davis, 1980; Randolph, 1981). La direction de la charge appliquée par rapport au groupe est importante pour les groupes de pieux chargés latéralement. 100 CPT Guide - 2022 Essai de pénétration des cônes (CPT) Contrôle de l'amélioration du sol L'amélioration du sol peut se produire sous de nombreuses formes selon le type de sol et les exigences du projet. Pour les sols à grains grossiers tels que les sables et les sables silty, le compactage initial profond est une technique commune d'amélioration du sol. Le compactage profond peut comprendre: vibro-compaction, vibro-replacement (colonnes de pierre), compactage dynamique, pieux de compactage et blasting profond. Le CPT est l'une des meilleures méthodes pour surveiller et documenter l'effet du compactage profond, souvent en raison de l'effet de la formation de sol en général, mais pas en raison de l'effet initial et répétable des données. La plupart des techniques de compactage profond comportent des contraintes cycliques de cisaillement sous forme de vibration pour induire une augmentation de la densité du sol.

Le CPTu fournit les informations nécessaires sur les conditions des eaux souterraines. Souvent, le compactage en profondeur est destiné à un ou plusieurs des facteurs suivants: augmentation de la capacité portante (c'est-à-dire augmentation de la résistance au cisaillement) / réduction des peuplements (c'est-à-dire augmentation de la rigidité) / augmentation de la résistance à la liquéfaction (c'est-à-dire augmentation de la densité). La nécessité d'un compactage en profondeur et des conditions géotechniques sera spécifique au projet et il est important que les spécifications de conception tiennent compte de ces exigences spécifiques au site. La résistance au cône dans les sols à grains grossiers est régie par de nombreux facteurs, y compris la densité du sol, les contraintes in situ, l'historique des contraintes et la compressibilité du sol.

Dans l'analyse des sables témoins (où l'on utilise la méthode initiale $I < 2,0$), il y a un aspect important du compactage profond qui n'est pas encore bien compris : l'augmentation de la résistance aux cônes avec le temps après compactage. Cet effet de temps a été observé dans des conditions de sol différentes et avec des méthodes de compactage différentes. Souvent, aucun changement mesurable de la pression

être déclenché pour la déformation-souvent et si les contraintes de cisaillement gravitationnel sont plus grandes que la résistance minimale au cisaillement non drainée. Le déclencheur peut être monotonique ou cyclique. Si une pente ou une structure du sol échouera, et le glissement dépendra de la quantité de sol adoucissant de la contrainte par rapport au sol durcissant dans la structure, de la fragilité du sol ramollissant de la souche et de la géométrie du sol.

Dans le cas d'une perte de temps, il est possible que les contraintes effectives soient essentiellement de 108 CPT Guide - 2022 Essai de pénétration des cônes (CPT) atteignent zéro dans les sols de type sable, pendant la charge cyclique, résultant en de grandes déformations. L'inversion de la contrainte de cisaillement est fréquente dans le niveau et le sol en pente douce pendant les tremblements de terre où les contraintes statiques de cisaillement sont faibles par rapport aux contraintes de cisaillement cycliques imposées. Des exemples de liquéfaction cyclique ont été fréquents dans les tremblements de terre majeurs de Niigata (1964) et Christchurch (2010/11) et se manifestent sous forme d'ébullitions de sable, les lignes de vie endommagées (pipelines, etc.) les spreads latéraux, les effondrements du sable, les fissures de surface. Si la liquéfaction cyclique se produit et les voies de drainage sont souvent limitées en raison de la surpression du sol, les pertes de temps peuvent être réduites en raison de la perte de temps. On trouve un exemple d'approche fondée sur le risque pour les résidus miniers à l'adresse suivante: <https://www.icmm.com/en-gb/guidance/innovation/2021/tailings-management-good-practice> 109 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Cyclical Liquefaction (Nivel or Gently Sloping Ground Sites) (Refer to Robertson & Wride, 1998; Zhang et al., 2002 et 2004; Robertson, 2009 pour plus de détails) La plupart des travaux en cours sur la liquéfaction cyclique ont porté principalement sur les tremblements de terre.

Le facteur r peut être estimé à l'aide de la fonction tri-linéaire suivante, d qui fournit un bon ajustement à la moyenne de l'intervalle suggéré dans r initialement d proposé par Seed et Idris (1971): $r = 1,0 - 0,00765z$ si $z < 9,15$ m = $1,174 - 0,0267z$ si $z = 9,15$ à 23 m = $0,744 - 0,008z$ si $z = 23$ à 30 m 110 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) = $0,5$ si $z > 30$ m Où z est la profondeur en mètres. Ces formules sont au mieux approximatives et ne représentent que des valeurs moyennes puisque r montre une variation considérable avec la profondeur. d Idris et Boulanger (2008) suggèrent des valeurs alternatives pour r , mais elles sont également associées à des valeurs alternatives du CRR. La séquence d'évaluation de la liquéfaction cyclique pour le niveau ou la pente douce des sols du sol est: 1. Évaluer la sensibilité du sol à la liquéfaction cyclique du sol et du sol du sol du sol du sol du même type de sol du même type de sol du même type de sol du même type de sol du sol du même type de sol du mode de sol du mode de sol.

Les sols de type CPT ont généralement un indice de SBT basé sur le CPT $I < 2,8$ (ou $I > 22$). c B = Projets à faible risque : Les sols de type C sont sensibles à la liquéfaction cyclique sur la base de critères ci-dessus, à moins que l'expérience locale précédente n'en montre autrement. ϕ Projets à haut risque : Soit supposent que les sols sont sensibles à la liquéfaction cyclique ou obtiennent des échantillons de haute qualité et évaluent la susceptibilité sur la base d'essais de laboratoire appropriés, à moins qu'une expérience locale antérieure n'existe. 111 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Comportement de type Clay : Les sols de type Clay ne sont généralement pas sensibles à la liquéfaction cyclique < les sols de type Clay ne sont pas susceptibles à la liquéfaction cyclique lorsque leur comportement est caractérisé par le $PI > 18$, mais ils peuvent subir un adoucissement cyclique.

[illegible]

[illegible]

Le CPT a l'avantage que les résultats soient répétables et fournissent un profil détaillé en continu de l'OCR et donc du CRR. 7.5 Robertson (2009) a recommandé l'approche CPT suivante qui peut être appliquée à tous les sols (c.-à-d. pas de coupe I) : c Lorsque $I \leq 2,50$, supposons que les sols peuvent être en forme de sable et que la pénétration CPT est essentiellement drainée : Utiliser Robertson et Wride (1998) recommandation basée sur $Q = K Q_{tn, cn}$ où K est une fonction de I (mise à jour par Robertson, 2022, voir Figure 48) c Lorsque $I > 2,70$, supposons que les sols sont en forme d'argile et que la pénétration CPT est essentiellement non drainée, où : $RER = 0,053 Q K^{7,5} t_n$, 123 CPT Guide - 2022 Cone Test de pénétration Lorsque $2,50 < I < 2,70$, observations aussi en forme de sol en forme de sol en forme de sol en forme de sol en forme de sol en forme de sol en voie de sol en voie de transition.

Il peut être utile d'effectuer une analyse à la fois à l'aide d'une méthode RCERE/RW98 pour les sols ressemblant à du sable et à la méthode Robertson (2009) pour tous les sols, afin d'évaluer la sensibilité des résultats au type de sol. 124 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Figure 50. Le rapport de résistance cyclique (CRR) à l'aide de CPT $M = 7,5$ (Après Robertson, 2009) 3. Évaluation des déformations post-séisme Plusieurs indices simplifiés ont été développés pour estimer le niveau de dommages de surface dus à la liquéfaction. La première était l'indice de potentiel de liquéfaction (IPL) proposé par Iwasaki (1978) qui a fourni une pondération linéaire au facteur calculé de sécurité contre la liquéfaction (1-FS) dans le liq supérieur et a lié l'IPL à la gravité des dommages de surface.

Pour les projets à faible ou moyen risque et pour les estimations préliminaires pour les projets à haut risque, on peut estimer les concentrations de CPT après le tremblement de terre en utilisant la méthode du CPT après le tremblement de terre en utilisant la méthode du CTP après le tremblement de terre en utilisant la méthode du Robertson et de Wride (1998) pour obtenir un profil vertical détaillé des concentrations de CPT après le tremblement de terre en utilisant la méthode du CTP en utilisant la méthode du CTP après le tremblement de terre.

Pour les projets à haut risque, un échantillonnage de haute qualité et des essais en laboratoire appropriés peuvent être nécessaires dans les zones critiques identifiées par l'approche simplifiée. Le jugement technique est nécessaire pour évaluer les conséquences des constructions verticales 1D calculées à partir de souches induites par le volume, compte tenu de la variabilité du sol, de la profondeur des couches liquéfiées, de l'épaisseur des sols non liquéfiables au-dessus des sols liquéfiés et des détails du projet (voir Zhang et al., 2002). Le déplacement des bâtiments situés au-dessus des sols qui subissent une liquéfaction dépendra des détails de la fondation et de la profondeur, de l'épaisseur et de la distribution latérale des sols liquéfiés.

En outre, une couche profonde à faible FS peut réduire la demande sismique à des profondeurs peu profondes, ce qui permet d'obtenir une liquéfaction simplificatrice, ce qui conduit à une liquéfaction de l'échantillon (après Hutabarat et Bray, 2022) la déformation par liquéfaction de l'échantillon, qui tend à être plus élevée à des sites présentant des couches de sable liquéfiables épaisses à proximité de la surface du sol, combinée à une mince croûte non liquidable faible, ce qui est conforme aux observations faites par Ishihara (1985) qui ont lié les dommages de surface causés par la liquéfaction à l'épaisseur de la couche de sable liquéfiable et à l'épaisseur de la croûte non liquidable de la surface du dessus.

Il n'est donc pas possible de comparer l'approche Zhang et al (2002) calculée en DL avec celle de Boulanger et d'Idriss de performance (2008). L'approche fondée sur le CPT est généralement prudente car elle est appliquée à toutes les données du CPT et capte des valeurs de cônes faibles (minimum) dans les couches de sol et dans les zones de transition aux limites du sol. Ces valeurs de cônes faibles dans les zones de transition entraînent souvent des déformations de cisaillement accumulées qui tendent à augmenter les déformations latérales estimées. Le jugement technique doit être utilisé pour éliminer le conservatisme excessif dans les dépôts fortement intercôtés où il y a des zones de transition fréquentes aux limites du sol. Le logiciel peut enlever des valeurs dans les zones de transition aux limites du sol (p. ex. CLiq de <http://www.geologismiki.gr/>). Le jugement technique est nécessaire pour évaluer les conséquences des déplacements latéraux calculés en tenant compte, de la variabilité du sol, de la géométrie du site, de la profondeur des couches de sol liquéfiés et des détails du projet. La méthode de Hutabarat et Bray (2022) comprend une approche simplifiée pour estimer la quantité de pressions interstitielles induites par les tremblements de terre qui peut être utile pour comprendre la distribution probable de fortes pressions interstitielles et la façon dont les couches d'argile peuvent limiter les effets de ces pressions interstitielles sur la performance globale du site. Lorsque les déformations latérales calculées à l'aide des méthodes empiriques ci-dessus sont très importantes (c.-à-d., des souches de cisaillement de plus de 30 %) les sols devraient également être évalués pour déterminer leur susceptibilité à la perte/réduction de force (voir la section suivante sur la liquéfaction de l'écoulement dans le sol en pente) et la stabilité globale par rapport à un glissement de l'écoulement évalué.

Dans la figure 52, on présente une mise à jour du diagramme, ainsi que des lignes directrices générales relatives à l'évaluation de la liquéfaction cyclique ou de la liquéfaction de flux. 130 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Figure 52 Zones de liquéfaction/souplesse potentielle fondées sur le CPT (voir la figure 25b pour plus de détails)

Sols de type sable (SD & SC, $I > 32$) - Évaluer le comportement potentiel en utilisant des corrélations de liquéfaction de cas et d'histoire B de CPT. SD Liquéfaction cyclique possible en fonction du niveau et de la durée de la charge cyclique. SC Liquéfaction cyclique et (liquéfaction de flux) Perte de résistance possible en fonction de la charge et de la géométrie du sol. CC/CC, $I < 22$) - Évaluer le comportement potentiel en fonction de la sensibilité du sol et de la plasticité, du chargement et de la géométrie du sol.

Si les résultats sont significativement différents, ils doivent être évalués pour déterminer les raisons probables des différences. Généralement, lorsqu'un site est composé principalement de sols ressemblant à du sable dans les zones supérieures et avec un niveau élevé d'eau souterraine ($z < 4\text{m}$) et pour un tremblement de terre de conception avec $M < 8$ (voir w w résumé de la base de données dans la figure 47), les méthodes fournissent souvent des résultats similaires, étant donné qu'elles étaient toutes basées sur des sites similaires.

Exemple d'approche fondée sur le CPT pour évaluer la liquéfaction cyclique au site d'atterrissage de Moss montrant (a) des paramètres intermédiaires (b) le CRR, la FS et les déformations post-sismales à l'aide du logiciel «CLiq» (<http://www.geologismiki.gr/>) CLiq offre la possibilité de comparer les résultats sur une gamme d'entrées de tremblements de terre (p. ex., la plage de M et d'un , comme le montre la figure 54. L'exemple montre que si le séisme maximal était plus grand (p. ex., plus élevé a) les colonies verticales résultantes ne sont pas trop sensibles, puisque la liquéfaction a été déclenchée pour la plupart.

La relation entre Q et la grande souche de résistance liquéfiée non drainée t_n , cs ratio ($s = /$), suggérée par Robertson (2010) pour les sols qui ressemblent principalement à du sable $u(liq)$ vo , a également été mise à jour et simplifiée pour permettre l'extension de la relation à des

une grande souche et principalement argileux ($I > 3,0$), c'estimeront la résistance à l'écoulement de la grande souche liquéfiée/remorquée non drainée directement à partir de f puisque le processus de pénétration du CPT n'est pas drainé. Dans les sols argileux, des données supplémentaires peuvent être obtenues à partir d'essais appropriés sur des fourgons de terrain ainsi que d'un échantillonnage de haute qualité et d'essais en laboratoire, lorsque cela est possible.

Dans le cas des projets à risque élevé, la possibilité d'une redistribution nulle peut être évaluée à l'aide de modèles numériques de stress plus complexes. Dans le cas des projets à risque élevé où les conséquences de l'instabilité sont très élevées (p. ex., pertes de vie, dommages environnementaux importants, perte de réputation, etc.), si la $FS < 1.1$ prend des mesures d'atténuation pour assurer la stabilité et réduire les conséquences possibles. Dans certains cas, il peut être approprié d'effectuer une modélisation numérique avancée pour évaluer si les performances sont acceptables à l'aide de modèles constitutifs appropriés et de valeurs de résistance à la cisaillement de grandes déformations. Toutefois, la conception globale devrait être effectuée dans un cadre fondé sur les risques.

Dans le cas du sol en pente raide, les contraintes de cisaillement statique sont généralement élevées et lorsque les sols sont contractifs à grande souche, K est inférieur à 1,0. Par conséquent, le K est généralement inférieur à 1,0 dans le sol en pente raide avec des sols contractifs. 147 CPT Guide - 2022 Logiciels Au cours des dernières années, le logiciel commercial est devenu disponible pour faciliter l'interprétation et la conception géotechnique du CPT à l'aide des résultats du CPT. Robertson a participé au développement de deux programmes : CPeT-IT (pron. C-petit) et CLiq (pron. slick). Les deux programmes sont peu coûteux et très convivial et peuvent être téléchargés à partir de <http://www.geologismiki.gr/Products.html>. Le CPeT-IT est un logiciel facile à utiliser pour l'interprétation des données du CPT et du CPTu.

Il comprend également les méthodes de liquéfaction fondées sur le CPT suggérées par Moss et al (2006) et Boulanger et Idris (2008/2014). Une caractéristique 2D unique fournit un moyen de créer des cartes de contours colorés de l'indice global de liquéfaction potentielle (IPL) et des peuplements post-séisme dans la vue du plan, ce qui permet à l'utilisateur de visualiser la variation spatiale du potentiel de liquéfaction et des peuplements sur un site. Les variations des peuplements après tremblement de terre calculés sur un site permettent d'estimer les peuplements différentiels pour un site donné et le tremblement de terre de conception. Une fonction d'analyse paramétrique permet à l'utilisateur de varier à la fois l'amplitude du tremblement de terre et l'accélération de la surface pour évaluer la sensibilité du guide général 148 CPT - 2022 L'indice de liquéfaction du logiciel et les peuplements après tremblement de terre en fonction du chargement et des résultats du tremblement de terre sont présentés sous une forme graphique 3D.

Dans les procès-verbaux de la 12e Conférence internationale sur la mécanique des sols et l'ingénierie de la fondation, Rio de Janeiro, Balkema Pub., Rotterdam, vol. 1, p. 165 à 170. Boggess, R. et Robertson, P.K., 2010. CPT pour les sédiments mous et les études sur les eaux profondes, C.P. 151, 2e Symposium international sur les essais de pénétration des cônes, C.P. 10, Huntington Beach, CA, États-Unis, www.cpt10.com Bolton, M.D., 1986. La force et la dilatation des sables. Geotechnique, 36(1): 65-78. Canadian Geotechnical Society, 2006 Canadian Foundation Engineering Manual, 4e édition, BiTech Publishers, Vancouver,

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(3): 179-186. Zhang, G., Robertson, P.K. and Brachman, R.W.I., 2002, Estimation des règlements terrestres induits par la liquéfaction, CPT for Level Ground, Canadian Geotechnical Journal, 39(5): 1168-1180 156 G R E G G D R I L I N G L L C Southern California (Corporate Siège) 2726 Walnut Ave. Signal Hill, CA 90755 Tél: 562-427-6899 Northern California 950 Howe Rd. Martinez, CA 94553 Tél: 925-313-5800 info@greggdrilling.com www.greggdrilling.com Pitcher Services - Northern California 218 Demeter St, East Palo Alto, CA 94303 Tél: (650) 328-8910 puterservicesllc.com QUALITÉ - SÉCURITÉ - VALUE