

Eaux souterraines et profil piezometrique 26 Profilage des sols et
classification des sols 27 Profils non normalises SBT 27 Profils equivalents SPT N 36 60 Poids
unitaire du sol (=) 39 Resistance (s) 41 u Sensibilite du sol (S) 42 t Ratio de resistance (s /=') 43 u

vo Ratio de surconsolidation (OCR) et stress de rendement (=) 44 y Coherence entre les valeurs de k (pour OCR) et N (pour s) 46 kt u Ratio de resistance in situ (K) 47 o Densite relative (Dr) 48 Parametre d'Etat (=) 51 Angle de friction de pointe (=) 53 Echelle et Modulus 55 Modulus de la velocite des ondes de cisaillement 56 Estimation de la velocite des vagues de cisaillement (V) de la fondation CPT 57 s Identification des sols avec microstructure 58 Conductivite hydraulique (k) 60 Caracteristiques de la concentration 67 Application des resultats CPT

.....

Le present glossaire contient les termes les plus utilises en rapport avec le CPT et sont presentes dans l'ordre alphabetique. Le test de penetration du cone du c. du. du c. du. du. du. du La methode de calcul de la pression interstitielle mesuree est inferieure a la pression interstitielle interstitielle. La pression interstitielle mesuree est inferieure a la pression interstitielle interstitielle. La pression interstitielle normalisee par rapport a la resistance interstitielle. D'autres documents techniques sur le CPT peuvent etre telecharges partir de www.cpt-robertson.com а et de https://usucger.org/books/. Les informations supplementaires sur l'interpretation du CPT sont fournies dans une serie de webinaires gratuits qui peuvent etre consultes a l'adresse suivante : https://www.youtube.com/user/GreggCPTWebinars.

https://www.greggdrilling.com/resources/webinars/ Les interpretations decrites dans le present guide ont ete incorporees dans un logiciel CPT facile a utiliser (CPeT-IT et CLiq) qui peut etre telecharge a

partir de https://geologismiki.gr/products/. 1 Guide CPT - 2022 Caracterisation du site basee sur le risque Caracterisation du site basee sur le risque et l'incertitude sont des caracteristiques du sol et ne sont jamais entierement eliminees. Le niveau approprie de sophistication des resultats de l'analyse au-dessus de la fonction du site doit etre determine selon les criteres suivants : Le tableau 2 presente une liste partielle des principaux essais in situ et leur applicabilite percue dans des conditions de sol differentes. Tableau 2. L'applicabilite et l'utilite des essais in situ (Lunne, Robertson et Powell, 1997, mise a jour par Robertson, 2012) 3 CPT Guide - 2022 Role du CPT Le CPT Test de penetration du cone (CPT) et ses versions ameliorees telles que le piezocone (CPTu) et le sismique (SCPT), ont des applications etendues dans une large gamme de sols. Bien que le CPT ait ete initialement limite a des sols plus souples, avec un equipement de poussee moderne et des cones plus robustes, le CPT peut etre effectue dans des sols rigides a tres raides, et dans certains cas a des roches molles. Les echantillons de type Gouda ont une pointe de cone interne qui est retractee a la position verrouillee laissant un echantillonneur creux avec un petit diametre (generalement 25mm/1pouce) en acier inoxydable ou en laiton. L'echantillonneur creux est ensuite pousse pour prelever un echantillon. L'echantillonneur rempli et les tiges de poncage sont ensuite recuperes a la surface du sol. Le 4 CPT Guide - 2022 Role de l'echantillonneur de type MOSTAP contient un fil pour fixer la position de l'embout de cone interieur avant de pousser pour obtenir un echantillon. Des modifications ont egalement ete apportees pour inclure un systeme filaire afin que les echantillons de sol puissent etre recuperes a plusieurs profondeurs plutot que de recuperer et de redeployer l'echantillonneur et les tiges a chaque intervalle. Les systemes filaires ont tendance a fonctionner mieux dans les sols mous. Dans un piezocone, la pression interstitielle est egalement mesuree, generalement derriere le cone a l'emplacement u, comme le montre la figure 2. Si les pressions interstitielles sont mesurees 2 sur la face du cone, c'est l'emplacement u. Certains cones peuvent mesurer simultanement les pressions u et 1 1 u pore. 2 Figure 2. Terminologie pour les penetrometres a cones 6 CPT Guide - 2022 Essai de penetration du cone (CPT) Histoire 1932 Les premiers essais de penetrometre a cones ont ete effectues a l'aide d'un tuyau de gaz de diametre exterieur de 35 mm avec une tige de traction interne en acier de 15 mm. Une pointe de cone avec

une surface projetee de 10 cm2 et un angle de 60o apex a ete fixe aux tiges de traction interieure en acier, comme le montre la figure 3. La premiere classification des sols fondee sur le CPT pour le cone mecanique Begemann 1965 Fugro a mis au point un cone electrique, dont la forme et les dimensions ont servi de base aux cones modernes et a la procedure de la norme internationale et de l'ASTM. Les principales ameliorations par rapport aux penetrometres a cone mecanique ont ete les suivantes : - Elimination des lectures incorrectes dues a la friction entre les tiges interieures et les tiges exterieures et au poids des tiges interieures. - Essais continus a vitesse de penetration continue sans necessite de mouvements alternatifs de differentes parties du penetrometre et aucun mouvement indesirable du sol n'influant sur la resistance au cone. - Mesure electrique plus simple et plus fiable de la resistance au cone et a la friction des manchons. CPT - 2022 Essai de penetration des cones (CPT) Capteurs/Modules additionnels Depuis l'introduction du cone electrique au debut des annees 1960, de nombreux capteurs supplementaires ont ete ajoutes au cone, tels que: (C) Temperature (Geophones/accelerometres) (vitesses d'onde sismigues, V et V) s p (Prescentmetre de pression des cones) (Camera (Iumiere visible)) (C) Radioisotope (gamma/neutron) (C) (C) Resistivite electrique/conductivite (C) (C) Echange d'oxygene (redox) (C) systeme de forage a ciel ouvert, il est possible d'utiliser un systeme de forage a ciel ouvert. Pour un systeme de forage a ciel ouvert, il est possible d'utiliser un systeme de forage a ciel ouvert, un systeme a ciel ouvert, un systeme de forage a ciel ouvert, un systeme a ciel ouvert, un systeme de forage a ciel ouvert, un systeme a ciel ouvert, un systeme de forage a ciel ouvert, un systeme de forage a ciel ouvert, un systeme de forage a ciel ouvert, un systeme a ciel ouvert, un systeme a ciel ouvert, un systeme de forage, un systeme de forage, un systeme de forage a deux a deux a deux a deux a ciel et un systeme a ciel ouvert, un systeme a ciel ouvert, un systeme de forage, un systeme de forage, un Pour les systemes de livraison et de deploiement robotiques, on peut aussi utiliser des systemes a distance non habites. Figure 18. Gregg=s Bumblebee a distance, systeme CPT non habite avec cone 5cm2 et tubulure enroulee 17 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Profondeur de penetration CPT=s peut etre effectue a des profondeurs superieures a 100m (300ft) dans des sols mous et avec un equipement de poussee a grande capacite. Pour ameliorer la profondeur de penetration, le frottement le long des tiges de traction doit etre reduit. Il est egalement courant d'utiliser le premier 1,5m (5ft) dans les zones urbaines pour eviter les travaux souterrains. Vertalite La machine de traction doit etre concue pour obtenir une direction de poussee aussi proche que possible de la verticale. L'ecart de la direction de poussee initiale par rapport a la verticale ne doit pas depasser 2° et les tiges de traction doivent etre verifiees pour la recticite. Les cones modernes doivent etre munis de capteurs de pente simples pour

permettre une mesure de la non- verticalite du sondage. Ceci est utile pour eviter les dommages aux equipements et la rupture des tiges de traction. Pour les profondeurs inferieures a 15m (50ft), la non-verticalite significative 18 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) est inhabituel, a condition que la direction de poussee initiale soit verticale. Les CPT non verticaux ont egalement ete effectues pour des projets speciaux (par exemple, dans les tunnels). En general, la plupart des systemes collectent des données à des intervalles compris entre 10 et 50 mm, avec 20 mm (~1 po) devenant le plus courant. Essais de dissipation Pendant une pause de penetration, toute pression interstitielle excessive generee autour du cone commencera a se dissiper. Le taux de dissipation depend du coefficient de consolidation, qui depend a son tour de la compressibilite et de la permeabilite du sol. Le taux de dissipation depend egalement du diametre de la sonde. Un essai de dissipation peut etre effectue a n'importe quelle profondeur requise (en arretant la penetration et en mesurant le changement de pression interstitielle avec le temps. Il est courant d'enregistrer le temps necessaire pour atteindre 50 % de dissipation (t), comme l'illustre la figure 19. 50 Si la pression interstitielle (u) est necessaire, l'essai de dissipation doit se poursuivre jusqu'a ce qu'il n'y ait pas d'augmentation de la pression interstitielle pendant la duree de la sonde. Dans le cas de l'analyse de la charge nulle, les cellules de charge n'ont pas besoin d'etre etalonnees. Pour les grands projets, les etalonnages peuvent etre effectues avant et apres le travail sur le terrain, avec des controles fonctionnels pendant le travail. Les controles fonctionnels devraient comprendre l'enregistrement et l'evaluation des mesures de la charge nulle (lectures de base). Avec une conception, un etalonnage et un entretien minutieux, les cellules de charge et les transducteurs de pression de deformation peuvent avoir une precision et une repetabilite superieures a +/- 0.1 % de la production a pleine echelle (FSO). Le tableau 3 presente un resume des verifications et des reetalonnages pour le CPT. Dans les sols mous, les conceptions de cones de soustraction souffrent d'un manque de precision dans la determination de la resistance des manchons due principalement a la stabilite de charge nulle variable des deux cellules de charge. Dans les conceptions de cones de soustraction, differentes erreurs de charge zero pour chaque cellule de charge peuvent produire des erreurs cumulatives dans les valeurs de resistance des manchons derivees. Pour des mesures

precises de la resistance des manchons dans les sediments mous, il est recommande que les manchons aient des cellules de charge distinctes (compression)22 CPT Guide - 2022 Essai de penetration des manchons (CPT) Avec une bonne conception (cellules de charge separees, manchon de frottement a l'extremite egale) et un controle de qualite (mesure de la charge nulle, tolerances et rugosite de la surface) il est possible d'obtenir des mesures de resistance des manchons et des manchons tres repetables. Toutefois, les mesures des manchons, en general, seront moins precises que la resistance des manchons (c'est-a-dire, en particulier, dans les sols a grain fin sensible, ou les valeurs de resistance des manchons peuvent etre inferieures a celles de l'eau peuvent etre mesurees plus faibles que celles de l'efficacite de l'effet de l'effet de l'eau de l'eau sur les manometrique sur les manometrique sur les manometriques sur les manometriques sur les manometriques. Dans le cas d'une methode de mesure de la pression de l'eau, la methode de mesure de la pression de l'eau peut etre appliquee a la pression de l'eau de l'e de l'eau de l'e de l'eau de l'e de l'eau de l'e de l'eau de l'e La plupart des correlations ont un cadre theorique, mais restent semi-empiriques en raison du comportement complexe de la plupart des sols naturels. Ces correlations varient en termes de fiabilite et d'applicabilite. Comme le CPT a des capteurs supplementaires (p. ex. pression interstitielle, CPTu et sismique, SCPT), l'applicabilite pour estimer les parametres du sol varie. Puisque le CPT avec des mesures de pression interstitielle (CPTu) est generalement disponible, le

tableau 4 montre une estimation de l'applicabilite percue du CPTu pour estimer les parametres du sol. Il n'y a pas d'autres essais in situ qui puissent fournir ce niveau d'information de maniere quasi continue et rentable. Les conditions d'eau souterraine et le profil piezometrique Le comportement du sol est controle par les contraintes in situ efficaces et la connaissance des conditions d'eau souterraine est important pour determiner le profil piezometrique correct au moment du CPT. Le CPTu fournit des informations detaillees sur le comportement du sol, y compris le profil de pression interstitielle (piezometrique). Dans ces conditions, il est preferable d'effectuer un CPTu standard sans dissipation (et avec des ajouts rapides de tiges si l'on utilise des tiges de 1 m de profondeur) suivies d'un CPTu adjacent ou l'on effectue frequemment des essais de dissipation pour determiner le profil piezometrique correct (le 2e sondage peut comprendre des mesures sismiques (SCPT) puis des arrets/pauses frequents pour effectuer les mesures sismigues et il peut etre utile d'enregistrer les donnees de dissipation au cours de ces arrets/pauses. Il est plus frequent d'effectuer un seul CPTu avec un petit nombre (p. ex., 3 ou 4) essais de dissipation, en tant que guide 26 CPT - 2022 Cone Penetration Test (CPT) compromis entre l'obtention de conditions non drainees, le cas echeant, et la determination du profil piezometrique approximatif. La resistance au cone (q) est generalement elevee dans les sables et faible dans les argiles, t et le rapport de frottement (R = f/q) est faible dans les sables et eleve dans les argiles (voir figure 7). f s t Les systemes traditionnels de classification du sol (par exemple, USCS) sont fondes sur des caracteristiques physiques determinees en laboratoire, telles que la distribution de la taille du grain et la plasticite qui sont mesurees sur des echantillons reformes. Les mesures du CPT repondent au comportement mecanique in situ du sol, comme la resistance, la rigidite et la compressibilite. Les mesures du CPT fournissent un indice repetable du comportement global du sol in situ dans la zone immediate de la sonde. La normalisation lineaire suggeree par Wroth (1984) a ete utilisee : Q ou Q = (q -

------ Si l'experience CPT, dans un

environnement geologique, est disponible et que les diagrammes ont ete evalues sur la base de cette experience, un echantillonnage frequent peut ne pas etre necessaire. Le comportement du sol peut etre ameliore si des mesures de pression interstitielle sont egalement recueillies, comme le montre la figure 24. Dans les argiles molles et les limons, les pressions interstitielles de penetration peuvent etre tres importantes, tandis que dans les argiles fortement surconsolidees ou les limbes denses et les sables siltiques, les pressions interstitielles de penetration (u) peuvent etre petites et 2 parfois negatives par rapport aux pressions interstitielles d'equilibre (u). La vitesse de dissipation de la pression interstitielle pendant une pause de penetration peut egalement 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 quide simple de la variation continue du comportement du sol dans chaque profil du sol en fonction des resultats CPT. 32 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Des etudes independantes ont montre que le diagramme SBT normalise presente a la figure n 23 presente generalement une fiabilite superieure a 80 % par rapport aux echantillons. Les differences sont souvent dues a la presence de microstructures du sol (comme le vieillissement et le collage). Schneider et al (2008) ont propose un diagramme du type de sol base sur le CPT base sur la resistance au cone normalise (Q) et une pression interstitielle excessive normalisee (U = u / u / u). t 2 vo L'application du diagramme Schneider et al peut etre problematique pour certains projets terrestres ou les resultats de la pression interstitielle du CPT peuvent ne pas toujours etre fiables. en raison de la perte de saturation du sol. La figure CPT est la figure CPT (apres Robertson, 2016) 33 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Figure 25 (b). La figure CPT normalisee Type de sol (SBT) n Figure Q -F (apres Robertson, 2016) tn r La limite entre le comportement contractif et dilatif a de grandes souches sur la figure Q -F est definie par : tn r CD = 70 = (Q 11) (1 + 0,06F) 17 tn r Robertson (2016) a egalement suggere un indice de type de comportement du sol modifie, I : B I = 100(Q + 10) / (70 + Q F) B tn tn r La figure SBT modifiee capture les limites de la SBT mieux que la courbe B I originale. Il s'agit d'une representation visuelle du type SBT estime sur le profil CPT, soit la couleur ajoutee sous la courbe de resistance au cone, soit sur la courbe I ou I. c B Profils SPT equivalents 60 Le test de penetration standard (SPT) a ete l'un des essais in situ les plus courants

dans de nombreuses parties du monde, en particulier en Amerique du Nord et du Sud. Malgre les efforts continus pour normaliser la procedure et l'equipement SPT, il y a encore des problemes lies a sa repetabilite et a sa fiabilite. Cependant, certains ingenieurs geotechniques ont acquis une experience considerable des methodes de conception basees sur des correlations SPT locales. CPT-SPT correlations avec la taille moyenne du grain (Robertson et al., 1983) Les correlations ci-dessus necessitent l'information sur la taille du grain du sol pour determiner la taille moyenne du grain (ou la teneur en fines) Les caracteristiques du grain peuvent etre estimees directement a partir des resultats du CPT a l'aide des diagrammes du type de comportement du sol (STB). Les diagrammes du CPT-SBT montrent une tendance claire a l'augmentation du rapport de frottement avec la teneur en fines et la taille decroissante du grain. Robertson et al. (1986) ont suggere des ratios (q /p)/N pour chaque c a 60 37 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test de comportement du sol a l'aide du diagramme du CPT non normalise et du rapport (q /p)/N suggere pour chaque type de comportement du sol est donne dans le tableau 5. c a 60 Ces valeurs fournissent une estimation raisonnable des valeurs de N du SPT a partir des donnees du CPT. 60 Pour simplifier les correlations 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 etre combine 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 suggere une mise a jour de la relation ci-dessus qui fournit des estimations ameliorees de N pour les argiles insensibles: 60 38 CPT Guide - 2022 Essai de penetration des cones (CPT) (q/p) t a = 10 (1.1268 0.2817lc) N 60 Jefferies et Davies (1993) a suggere que l'approche ci-dessus peut fournir de meilleures estimations de N - valeurs SPT reelles en raison de la faible repetabilite du SPT. La methode utilisee pour estimer les poids unitaires du sol a partir des donnees CPT (p. ex., Mayne et al., 2010; Lengkeek et al., 2018) ainsi que les methodes fondees sur l'apprentissage par machine. La methode utilisee par Lengkeek et al. (2018) etait basee principalement sur les sols organiques mous des Pays-Bas. 40 CPT Guide - 2022 Essai de penetration du cone (CPT) Resistance au cisaillement non draine (s) u Il n'existe pas de valeur unique de resistance au cisaillement non drainee, s, puisque la reponse u non drainee du sol depend de la direction de chargement, de

l'anisotropie du sol, du taux de deformation et de l'historique des contraintes. Dans des conditions tres sensibles de sol a grain fin, ou B ~ 1,0, N peut etre inferieur a q kt. Pour determiner la concentration en rainure elevee, Mayne et Peuchen (2022) suggerent la relation suivante a partir de donnees provenant de 70 depots d'argile : N = 10,5 4,6 ln (B + 0,1) kt q Cette approche necessite des donnees fiables sur la pression interstitielle pour determiner B. q 41 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Pour les depots ou peu d'experience est disponible, estimer s en utilisant les valeurs corrigees de resistance au cone u (q) et les valeurs preliminaires de facteur de cone (N) de 14 a 16. Pour une estimation plus prudente, choisir une valeur proche de la limite superieure. En consequence, la sensibilite d'une argile peut etre estimee en calculant les pics a partir de l'un ou l'autre site, c'est-a-dire des correlations simples avec q ou , c'est-a-dire les valeurs suivantes : 42 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) s q , S = u = t v (1 / f) ~ 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 etre tres faible avec des difficultes inherentes de precision. Par consequent, l'estimation de la sensibilite (et de la resistance reformee) du CPT doit etre utilisee comme guide. Par consequent, le rapport de resistance non drainee (Rem) s (s /= k) est: u(Rem) vo s /== f /== = (F. Q) / 100 u(Rem) vo s t 43 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test II est donc possible de representer (s /= f /==) les contours lineaires sur le graphique U(Rem) vo s normalise SBT (Robertson, 2009 - voir Figure 23) lorsque I > ~2.6. n c Rapport de surconsolidation (OCR) et le rapport de surconsolidation (YD Stress (=) y La surconsolidation (OCR) est souvent definie comme le rapport du stress de consolidation effectif maximal et du stress de surcharge actuel: = OCR = p ' vslide = sole sursolide mecaniquement (SR) et le rapport de surconsolidation (SR) sont egalement calcules. 44 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Si l'experience anterieure est disponible dans le meme gisement, la valeur de k devrait etre ajustee pour refleter cette experience et pour fournir un profil plus fiable de l'OCR. La methode plus simple Kulhawy et Mayne est valable pour Q < 20. t Pour les projets de grande envergure, a risque modere a eleve, ou des donnees de terrain et de laboratoire de haute qualite supplementaires peuvent etre disponibles, des correlations specifiques au site devraient etre developpees sur la base de valeurs coherentes et pertinentes de l'OCR (ou de

l'YSR). Agaiby et Mayne (2019) ont suggere une extension de cette approche qui peut etre appliquee a tous les sols sur la base de ce qui suit : Pour un sol argileux, la limite entre le comportement contractif et le comportement dilatif a grande souche est d'environ YSR = 5, tout comme -0,05 est la limite pour les sols sableux. Une modification de l'approche Agaiby et Mayne peut fournir une methode simplifiee pour lier YSR et () en utilisant la methode suivante : YSR = 0,33 (Q) m=1 tn Ou Q a ete defini par Robertson (2009) et m=1 est modifiee pour devenir : tn m=1 [0,28] /(1+(I/2.6)15) c Quand I > 2,8, m=1,0. c La methode simplifiee ci-dessus peut produire des valeurs similaires de l'etat in situ (YSR) pour les sols argileux et sableux, a condition qu'il n'y ait pas ou peu de microstructure. Par consequent, la constante d'estimation de l'OCR peut etre automatiquement estimee a partir des resultats 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 represente une methode d'estimation automatique de l'etat in situ (OCR) dans les sols a grains fins, basee sur des resultats CPT mesures, de maniere coherente. Ceci se compare tres etroitement a la forme suggeree par Karlsrud et al (2005) a partir d'echantillons de blocs de haute qualite en Norvege (lorsque la sensibilite du sol est inferieure a 15) et t a partir de CSSM: OCR = 0,25 (Q)1.2 t Lorsque Fr ~2% les deux approches donnent essentiellement le meme resultat. 46 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) In-Situ Stress Ratio (K) Il n'existe pas de methode fiable pour determiner K a partir de CPT. = densite relative, D, ou indice de densite, I, est definie comme suit : r D e e I = D = D r e e max min ou : e et e sont les rapports de vides maximaux et minimums et e sont le rapport de vides maximaux in situ. Les problemes associes a la determination de e et e sont bien connus. max min Des recherches ont egalement montre que la contrainte et le comportement de resistance des sols a grains grossiers sont trop compliques pour etre representes par la seule densite relative du sol. Cependant, pendant de nombreuses annees, la densite relative C a ete utilisee par les ingenieurs comme parametre pour decrire l'etat in situ des depots de sable. La relation peut alors etre simplifiee pour la plupart des jeunes sables propres non cementes (ou I < 1,6) a: c D 2 = Q / 350 r tn L'approche peut etre etendue aux sables silts (I < 2,6), ou le processus de penetration CPT est draine, en utilisant l'equivalent de sable propre normalise, Q (voir tn,cs Figure 48 pour les details). D 2 = Q / 350 rn,cs

Bray et Olaya (2022) a suggere une version simplifiee mise a jour basee sur des sables silents non plastiques: D 2 = (Q I 3.5) / 1500 r tn c Les correlations ci-dessus ne s'appliquent qu'aux sols qui n'ont que peu ou pas de microstructure. La figure 30 montre les donnees du projet de recherche CANLEX (Fear et al., 2000) qui illustrent la variation de la correlation avec l'age. En ce qui concerne la methode de calcul de l'etat normal, la methode de calcul de l'etat normal est la methode de calcul de l'etat normal, la methode de calcul de l'estimation de l'etat de l'e l'etat de l'e l'etat de l'etat l'etat de l'etat de l'etat de l'etat de l'etat l'etat Dans les sables, ou B ~ 0, la normalisation suggeree par Jefferies et Been q (2006) est essentiellement la meme que celle utilisee par Robertson (1990). Sur la base des donnees presentees par Jefferies et Been (2006) et Shuttle et Cunning (2007), ainsi que des mesures du projet CANLEX (Wride et al, 2000) pour les sables jeunes non cementes (c'est-a-dire peu ou pas de microstructure), combines avec le lien entre le parametre OCR et le parametre d'etat dans les sols a grains fins, Robertson (2009) a developpe des contours du parametre d'etat (-) sur le diagramme SBT n Q - F mis a jour pour les sols a ages holocenes. Les modeles d'expansion de la cavite sont populaires puisqu'ils sont relativement simples et peuvent

incorporer de nombreuses caracteristiques importantes de la reponse du sol. Cependant, les correlations empiriques basees sur les resultats d'essais de la chambre d'etalonnage et les resultats sur le terrain sont encore les plus utilises. Robertson et Campanella (1983) ont suggere une correlation pour estimer l'angle de frottement maximal (= 22) pour les sables non cementes, non agences, moderement compressibles, principalement a quartz sur la base des resultats d'essais de la chambre d'etalonnage. Pour les sables dont la compressibilite est plus elevee (c'est-a-dire les sables carbonates ou a forte teneur en mica), la methode aura tendance a prevoir des angles de predire des valeurs de cv tn, cs plus proches des valeurs mesurees dans les sables calcaires ou la resistance a la pointe du CPT peut etre faible pour des valeurs elevees de , en raison d'une valeur elevee pour, cv Pour les sols a grains fins, c'est le meilleur moyen de definir l'angle de frottement effectif du pic de contrainte qui est obtenu en laboratoire sur des echantillons non perturbes de haute qualite. Une valeur supposee de , 26° pour les argiles et de 30° pour les limbes est souvent suffisante pour de nombreux projets a faible risque. Pour les conditions plus chargees (c'est-a-dire les plus grandes souches), le module diminuerait (voir la section "Applications"). Figure 32. Evaluation du module de Young draine (a ~ 0,1 %) du CPT pour les jeunes sables de silice non cementes, E = 2 applications (q -) E t vo ou: = 0,015 [10 (0,55lc + 1,68)] E 55 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Modulus from Shear Wave Velocity Un avantage majeur du CPT sismique (SCPT) est la mesure supplementaire de la vitesse d'onde de cisaillement, V . La vitesse d'onde de cisaillement est mesuree a l'aide d'une technique de downhole pendant les pauses dans le CPT resultant en un profil continu de V. La theorie elastique indique que le modulus de cisaillement de petite souche, G peut etre determine s o de: G = 2 V 2 o s ou la methode d'analyse de la methode

de cisaillement de petite taille est la suivante: L'analyse de l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evol l'evolution de l'evolution de la La plupart des correlations existantes s'appliquent aux sols a base de silice qui sont jeunes et non cementes (c'est-a-dire sans liaison). L'application des correlations empiriques existantes dans les sols qui sont plus anciens et/ou lies peut donner lieu a des interpretations incorrectes. Il est donc important de pouvoir identifier les sols presentant des caracteristiques inhabituelles (c'est-a-dire les sols presentant une microstructure significative). La resistance au cone (g) est une mesure de la resistance du sol a une grande souche de t, et la vitesse de l'onde de cisaillement (V) est une mesure de la rigidite du sol de petite souche (G). Robertson (2016) a montre que la combinaison des donnees V mesurees avec les donnees CPT peut etre utilisee pour identifier les sols ayant une microstructure significative, comme le montre la figure 34. La valeur moyenne de G pour les sols d'age holocene non cementes, qui representent la plupart des antecedents de cas de liquefaction, est d'environ 200. K* peut egalement etre utilise pour estimer la quantite de liaison, representee par une intercepte de G de cohesion, c. L'application des figures 34 et K* est une methode plus fiable pour estimer la possibilite de G de microstructure que pour comparer les V estimes (a l'aide de la figure 33) avec les V mesures,

puisque la base de données utilisée pour developper la figure 33 contenait des depots plus anciens de Pleistocene-age qui avaient probablement une certaine microstructure. Le graphique presente a la figure 34 peut egalement etre utilise pour estimer G, et donc V, pour une gamme de sols avec une microstructure differente (ou age). Ces estimations sont approximatives au mieux, mais peuvent fournir un guide des variations de la permeabilite possible. SBT SBT Gamme de k SBT I n c Zone (m/s) 1 Sensible a grain fin 3x10-10 a 3x10-8 NA 2 Sols organiques - argile 1x10-10 a 1x10-8 I > 3,60 c 3 Clay 1x10-10 a 1x10-9 2,95 < I < 3,60 c 4 Melange de silt 3x10-9 a 1x10-7 2,60 < I < 2,95 c 5 Melange de sable 1x10-7 a 1x10-5 2,05 < I < 2,60 c 6 Sable 1x10-5 a 1x10-3 1,31 < I < 2,05 c 7 Sable dense a sable 1x10-3 a 1 I < 1,31 c 8 * Tres dense a sol rigide a 1x10-8 a 1x10-3 NA 9 * Tres rigide a partir de la relation de SBT 1x10-9 a 1x10-7 NA *Surconsolide et/ou cimente Tableau 6 Permeabilite estimee (k) a partir de la relation de SBT 1x2 (1985) ont suggere une gamme de valeurs possibles de k/k pour les argiles molles, comme le montre le tableau 7. Nature des argiles k/k h v Pas de macrofabric, ou seulement legerement developpees de 1 a 1,5 macrofabric, depots essentiellement homogenes De macrofabric assez bien a bien developpe, 2 a 4 p.ex. argiles sedimentaires avec lentilles discontinues et couches de materiaux plus permeables argiles varvees et autres depots contenant 3 a 10 couches permeables integrees et plus ou moins continues Tableau 7 Gamme de valeurs de champ possibles de k/k pour les argiles molles h v (modifiee de Jamiolkowski et al., 1985) 61 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Figure 35. On a developpe de nombreuses solutions theoriques pour calculer le coefficient de consolidation a partir des donnees de dissipation de la pression interstitielle CPT. Le coefficient de consolidation peut etre interprete a 50 % de dissipation, a l'aide de la formule de base ci-apres: T = rayon du penetrometre o I = indice de rigidite du sol = G/s r u 63 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test II est clair de cette formule que le temps de dissipation est inversement proportionnel au rayon de la sonde. Ainsi, dans les sols de tres faible permeabilite, le temps de dissipation peut etre diminue en utilisant des sondes plus petites de diametre (Robertson et al. (1992) ont examine les donnees de dissipation provenant du monde entier et ont compare les resultats de la solution theorique de Teh et de Houlsby (1991), comme le montre la figure 36. Dans le cas de l'elimination des pores, la grande difference entre les pressions interstitielles sur la face du cone (u) et derriere le cone (u) peut entrainer une augmentation initiale des pressions interstitielles au cours d'un 2 2 65 CPT Guide - 2022 Essai de penetration des cones Test de dissipation en raison de la redistribution locale ou des pressions interstitielles autour du cone avant que la dissipation radiale ne domine. Il faut veiller a ce que la dissipation soit maintenue a l'equilibre correct (u) et ne s'arrete pas prematurement apres la montee initiale. Dans ces cas, le capteur de pression interstitielle peut etre deplace vers la face du cone (u) ou le temps t peut etre estime en utilisant la pression interstitielle maximale de 1 50 la valeur initiale. Le gradient de la ligne droite initiale est le suivant : c = (m/M)2 r2 (l)0,5 h T r M = 1,15 pour la position u et le cone de 10cm2 (c.-a-d. r = 1,78 cm). T 2 66 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Constrained Modulus Les reglements de consolidation peuvent etre estimes a l'aide des resultats du CPT 1-D Constrained Modulus, M, ou : M = 1/ m =

Le

tableau 8 presente un resume de l'applicabilite du CPT aux applications de conception directe. Les cotes indiquees dans le tableau ont ete attribuees en fonction de l'experience actuelle et representent une evaluation qualitative du niveau de confiance evalue pour chaque probleme de conception et type general de sol. Les details des conditions au sol et des exigences du projet peuvent influer sur ces cotes. Dans les sections suivantes, plusieurs applications directes des resultats CPT/CPTu sont decrites. Ces sections ne sont pas destinees a fournir des details complets sur la conception geotechnique (c'est-a-dire le plan CPT, le plan CTP, le plan CTP, le plan CPT, le plan, le plan, CPT, le plan CPT, le plan, le plan

le plan, le pla le plan, le pla L'etude de 1200 cas de problemes de fondations en Europe a montre que les problemes pouvaient etre attribues aux causes suivantes : 25 % des fondations sur le remplissage recent (principalement un mauvais jugement d'ingenierie) 20 % du tassement differentiel (50 % auraient pu etre evites avec une bonne conception) 20 % de l'effet de l'eau souterraine 10 % de la defaillance de la couche faible 10 % des travaux a proximite (excavations, tunnels, etc.) 15 % des causes diverses (seisme, explosion, etc.) Lors de la conception, le tassement est generalement la guestion critique. Dans les sols cohesifs (homogenes), la rupture se produit le long d'une surface circulaire approximativement. Les parametres significatifs sont : la nature des sols ; la densite et la resistance des sols ; la largeur et la forme de la base ; la profondeur de la base ; la position de la charge. Un sol donne n'a pas une capacite de roulement unique ; la capacite de roulement est fonction de la forme de la base, de la profondeur et de la largeur ainsi que de l'excentricite de la charge. 70 CPT Guide - 2022 Test de penetration des cones (CPT) Theorie generale de la capacite de roulement Initialement developpee par Terzaghi (1936) ; il existe maintenant plus de 30 theories avec la meme forme generale, comme suit : Capacite de roulement ultime, (q) : f q = 0,5 B N s i + c N s i +) D N s if) c c q q q ou: N N N = coefficients de capacite de roulement, (fonction de la methode la methode la methode la methode la la

methode la methode la

._____

Dans le de l'eau cas souterraine, la capacite portante est basee sur une analyse de contrainte efficace, c'est-a-dire sur la position de la nappe phreatique, c'est-a-dire sur la valeur de la masse unitaire du sol. En general, on suppose que K = 0,16 pour le rapport de colonisation de s/B = 0,1. Lehane (2019) a egalement suggere K = 0.16 pour l'evaluation de la capacite de fondation a s/B = 0.1, (voir la figure 38). En general, la colonisation controlera la conception. Les sols cohesifs a grains fins : q = K q + , D f su c (av) K = 0,30 a 0,60 selon la base B/D et la forme et le sol OCR et la sensibilite su pour s/B = 0,1 (figure 38). En general, on suppose que K = 0.30 dans l'argile pour une estimation prudente. Figure 38. Donnees sur le terrain pour la mobilisation du stress de roulement par rapport au rapport de colonisation (s/B) pour la base sur l'argile (Lehane (2017) 74 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Shallow Foundation Design Settlement General Design Principes Necessite egalement une concentration elevee de la concentration de la

concentration de la concentration la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration la concentration de la plus de la concentration de la concentration de la concentration de la plus de la concentration de la plus de la plus de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de Dans les argiles rigides, surconsolidees (OCR > 4), environ 50% de la colonisation peut etre due a un tassement immediat de l'age de la deformation et a un tassement secondaire est generalement faible. Methodes pour les sols granulaires a grains grossiers, la plupart des methodes sont basees sur des essais in situ, soit directs, soit par l'estimation d'un module elastique equivalent (E'). Pour la plupart des essais, le lien entre le resultat de l'essai et le module est empirique, puisqu'il depend de nombreuses variables, p.ex. mineralogie, histoire du stress, etat de contrainte, age, cimentation, etc. CPT Meyerhof (1974) a suggere que la colonisation totale, s, pourrait etre calculee a l'aide de la formule suivante : Methode d'influence de la souche sur le sable (Schmertmann, 1970) Dans cette methode, le sable est divise en plusieurs couches, n, d'epaisseur, z, jusqu'a une profondeur inferieure a la base de la base egale a 2B pour une base carree et 4B pour une base a bandes (longueur de la base, L > 10B). Une valeur de q est attribuee a chaque couche c. Note dans les sols sablonneux q = q. La methode de Schmertmann

(1970) ne s'applique qu'aux sables propres et est difficile a appliquer dans les depots intercouches. 77 CPT Guide - 2022 Cone Pene Penetration Test Figure 40. Evaluation du module de Young draine du CPT pour les sols sablonneux non cementes, E = 0 (q - 0) E t vo Ou: -= 0.015 [10 (0,55lc + 1,68)] E Basee sur un examen de 30 essais de base complete sur 12 sables differents, Mayne et Illingsworth (2010) ont suggere la relation simple suivante (voir Figure 38) : g s'applique a la methode de base peu de CPT par mesure de la methode de la me de la methode de la me de la methode de la methode la methode de la methode de la methode la Dans le cas de la methode de calcul de la concentration, on peut estimer la concentration de la

concentration de la plus de la concentration de la concentration de la concentration de la plus la plus de la concentration de la plus de la plus de la plus la concentration de la plus la plus la plus la plus la plus la la concentration de la concentration de la plus la plus la plus la concentration de la plus la concentration de la concentration de la plus la concentration de la plus la plus la concentration de la plus la plus la concentration de la plus la concentration de la II est utile de relier les resultats d'essais de laboratoire de haute qualite avec des profils continus du CPT. En general, pour maintenir des etablissements de faible taille, le stress applique doit etre < , . Dans le sol souple, cela peut necessiter une certaine forme

d'amelioration du sol. Les composantes de la colonisation sont: s = reglement immediat (distorsion) i s = reglement de consolidation c s = reglement secondaire dependant du temps (creux) s Reglement immediat Selon la theorie elastique, Janbu (1963) propose: , p B , , , s = , , , E , , , 1 , , u ou: B = largeur de base, p = pression nette E = module du sol (non draine) u , , , , = facteurs d'influence sur la profondeur du sol et l'epaisseur de la couche compressible, c'est-a-dire le mode de construction non draine, c'est-a-dire la resistance au cisaillement, c'est-a-dire la concentration du sol, c'est-a-dire la concentration du sol, c'est-a-d. L'approche ci-dessus est plus simple que l'approche de Schmertmann (1970) qui est limitee a l'utilisation du sol. Lorsqu'on utilise les resultats du CPT, l'approche ci-dessus peut etre appliquee a tous les sols, etant donne que M peut etre estimee pour une large gamme de sols. Pour les structures sensibles a l'etablissement, essayer de minimiser les peuplements differentiels (par exemple, l'aeroport d'Osaka - ajustements mecaniques dus a des peuplements tres importants a long terme). Etablissements secondaires Les peuplements dependants du temps dependent de la mineralogie du sol et du degre de charge. Les sols organiques peuvent avoir un peuplement secondaire eleve. En general, eviter les sols comportant des peuplements secondaires eleves. Mesri, (1994) a suggere une approche simplifiee qui relie le coefficient de consolidation secondaire (C) et l'indice de compression, C, pour les argiles inorganiques et les limonces, comme suit : (C) C (C) = 0,04 (C) C (C) = 0,1 (C) (C) = 0,1 (C) v (C) (C) (C) (C) (C) (C) (C) (C) (C) La structure d'un radeau peut etre optimisee en tenant compte de l'interaction entre le radeau et le sol de support. Les ingenieurs structuraux effectuent habituellement une analyse elastique a l'aide de ressorts elastiques (Winkler). Par consequent, ils aimeraient la constante de ressort, k. s k = coefficient de reaction de subgrade (kN/m3) s p k = s s ou: p = contrainte nette appliquee s = tassement resultant d'une contrainte appliquee, p Le processus est regi par la rigidite relative de la structure et du sol. Le coefficient de reaction de

subgrade n'est pas un parametre du sol puisqu'il depend de la taille du sol et du degre de chargement. Souvent, les estimations sont faites a partir de tables globales (p. ex., Terzaghi; voir le tableau 9; le coefficient de reaction de subgrade n'est pas un parametre du sol puisqu'il depend de la taille du sol et du degre de chargement. Pour la plupart des valeurs de l'elasticite du sol E = modulus de l'elasticite du sol F = largeur de la base I = moment d'inertie F = coefficient d'inertie G = coefficient d'elasticite G = coefficient d' elasticite Pour la plupart des fondations bien concues, q/q = 0.3 (c.-a-d. FS > 3) et par consequent, 0.3, ult alors: k.G .S. 88 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Deep Foundation Design Piles Les piles peuvent etre utilisees pour: .Transferer des charges de surface elevees, a travers des couches molles vers des couches plus fortes .S. Transferer des charges par frottement sur une longueur significative du sol .S. Charges laterales resistantes .S. Protection contre l'eboulement, etc. Protection contre les sols enflammes, etc. Les piles sont generalement beaucoup plus couteuses que les bases peu profondes. Pour le calcul de la capacite d'utilisation, on utilise le calcul de la capacite d'utilisation. Pour le calcul de la capacite d'utilisation, on utilise le calcul de la capacite d'utilisation. Pour le calcul de la capacite d'utilisation, on utilise le calcul de la capacite d'utilisation, le

calcul de la capacite d'utilisation, le calcul de la capacite d'utilisation, le calcul de la capacite
d'utilisation, le calcul de la capacite d'utilisation, le calcul de la capacite d'utilisation. La plus notable
est l'application du CPT, puisque le CPT est un modele etroit du processus de pieux. L'analyse
detaillee est generalement limitee a la conception de pieux a haut risque, comme les grands pieux
en mer. Approche efficace du stress (=) L'approche efficace du stress (=) (=) (Eurland, 1973), a
ete tres utile pour donner un apercu de la performance des pieux. friction laterale de l'unite, f =
======================================
3 - 10 t Les concepts de contrainte efficaces peuvent ne pas modifier radicalement les regles de
conception empiriques, mais peuvent accroitre la confiance dans ces regles et permettre
l'extrapolation a de nouvelles situations. Approche de contrainte totale (=) Il a ete courant de
concevoir des pieux dans des sols cohesifs, en fonction de la contrainte totale et de la resistance au
cisaillement non drainee, s . u 92 CPT Guide - 2022 CPT Test de penetration des cones (CPT)
frottement lateral unitaire, $f = = = = p u$ roulement a l'extremite de l'unite, $q = N s p t u Ou : = 0.5$
1.0 selon l'OCR et N varie de 6 a 9 t selon la profondeur d'enrobage et la taille des pieux. Approche
empirique Methode CPT La recherche a montre (Robertson et al., 1988; Briaud et Tucker, 1988;
Tand et Funegard, 1989; Les facteurs CPT sont les suivants : La methode CPT (Bustamante et
Gianeselli, 1982) La methode de Bustamante et Gianeselli est basee 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 resultats obtenus avec la methode. La methode, egalement connue 93 CPT
Guide - 2022 Cone Pene Pentration Test comme la methode LCPC, est resumee dans le tableau 12
et le tableau 13. La methode LCPC a ete mise a jour avec de petits changements par Bustamante
et Frank, (1997) Tableau 12 Facteurs de capacite de roulement, k c (Bustamante et Gianeselli,

1982) La methode de roulement a l'extremite des pieux, q, est calculee a partir de la resistance moyenne a l'extremite des pieux, q, multipliee par un coefficient de roulement final, q (tableau 12). La deuxieme etape consiste a eliminer les valeurs superieures a 1,3q' le long de la longueur -a a +a, et ca les valeurs inferieures a 0,7g' le long de la longueur -a, qui genere la courbe epaisse ca montree a la figure 43. La troisieme etape consiste a calculer q , la valeur moyenne de la courbe epaisse ca. 95 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Figure 43. Calcul de la resistance moyenne equivalente au cone (Bustamante et Gianeselli, 1982). Plus recemment, de nouvelles methodes ont ete developpees pour estimer la capacite axiale des pieux (p. ex. Niazi, F.S. et Mayne P.W., 2016 et Lehane et al., 2022). Fellenius (2022) decrit une approche de conception unifiee basee sur la conception de fondations en tenant compte des reglements reels et acceptables, au lieu de fonder la conception sur une "capacite" de pieux reduite par divers facteurs de securite ou de resistance. Les facteurs de securite sont generalement de l'ordre de 2, bien que les valeurs reelles soient parfois plus elevees, car des facteurs partiels de securite sont parfois appliques au cours des calculs (en particulier aux forces du sol) avant d'arriver a la capacite de pieux ultime. Les facteurs de securite recommandes pour le calcul de la capacite axiale des pieux du CPT sont donnes dans le tableau 14. Facteur de methode de securite (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 + tempetes) Tableau 14 Facteurs de securite du calcul de la capacite axiale des pieux du CPT. Pour les grands projets, il est courant d'appliquer des methodes statiques (c'est-a-dire la methode LCPC CPT) pour obtenir une premiere estimation de la capacite, d'appliquer la dynamique des pieux si des pieux entraines sont selectionnes (aide a la selection des marteaux, aux contraintes de conduite, aux criteres de conduite) et d'effectuer un petit nombre d'essais de charge des pieux pour evaluer la reponse des pieux et pour etalonner la methode statique. Les resultats des essais de charge des pieux peuvent etre utilises pour modifier la prevision statique (c'est-a-dire la prevision CPT) de la capacite des pieux et la methode modifiee appliquee a travers le site. La resistance a l'arbre doit etre estimee avec prudence, en raison d'un eventuel mauvais 98 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) contact entre la roche et le pieu, concentration de contrainte possible et defaillance progressive resultante. Reglement du pieu Bien que l'installation des pieux modifie les caracteristiques de deformation et de compressibilite du sol, la masse du sol qui regit le comportement des pieux isoles sous charge, cette influence ne s'etend generalement que sur quelques diametres de pieux sous la base du pieu. Meyerhof (1976) a suggere que le reglement total d'un groupe de pieux a la charge de travail peut generalement etre estime en supposant une fondation equivalente. Il est donc souvent important de definir correctement les proportions de resistance (Q/Q). b s Des methodes ont ete developpees pour estimer les courbes charge-transfert (t-z) (Verbrugge, 1988, Lehane et al., 2022). Cependant, ces methodes sont approximatives et sont fortement influencees par l'installation des pieux et le type de sol. La methode recommandee pour estimer la reponse charge-reportage pour les pieux simples est de suivre les directives generales ci-dessus concernant le developpement de chaque element de resistance. 99 CPT Guide - 2022 Essai de penetration des cones Friction de l'arbre negatif 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 etre tres faible pour developper ces forces vers le bas. Il peut s'agir d'une solution theorique simplifiee (Poulos et Davis, 1980; Randolph, 1981). La direction de la charge appliquee par rapport au groupe est importante pour les groupes de pieux charges lateralement. 100 CPT Guide - 2022 Essai de penetration des cones (CPT) Controle de l'amelioration du sol L'amelioration du sol peut se produire sous de nombreuses formes selon le type de sol et les exigences du projet. Pour les sols a grains grossiers tels que les sables et les sables silty, le compactage initial profond est une technique commune d'amelioration 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 methodes pour surveiller et documenter l'effet du compactage profond, souvent en raison de l'effet de la formation de sol en general, mais pas en raison de l'effet initial et repetable des donnees. La plupart des techniques de compactage profond comportent des contraintes cycliques de cisaillement sous forme de vibration pour induire une augmentation de la densite du sol. Le CPTu fournit les informations necessaires sur les conditions des eaux souterraines. Souvent, le

compactage en profondeur est destine a un ou plusieurs des facteurs suivants: augmentation de la capacite portante (c'est-a-dire augmentation de la resistance au cisaillement) / reduction des peuplements (c'est-a-dire augmentation de la rigidite) / augmentation de la resistance a la liquefaction (c'est-a-dire augmentation de la densite). La necessite d'un compactage en profondeur et des conditions geotechniques sera specifique au projet et il est important que les specifications de conception tiennent compte de ces exigences specifiques au site. La resistance au cone dans les sols a grains grossiers est regie par de nombreux facteurs, y compris la densite du sol, les contraintes in situ, l'historique des contraintes et la compressibilite du sol. Dans l'analyse des sables temoins (ou l'on utilise la methode initiale I < 2,0), il y a un aspect important du compactage profond qui n'est pas encore bien compris : l'augmentation de la resistance aux cones avec le temps apres compactage. Cet effet de temps a ete observe dans des conditions de sol differentes et avec des methodes de compactage differentes. Souvent, aucun changement mesurable de la pression interstitielle n'a ete observe et l'augmentation a lieu sans tassement visible du sol. Charlie et al. (1992) ont etudie plusieurs cas ou la resistance aux cones a ete mesuree avec le temps apres compactage. On a utilise une gamme de techniques de compactage et les resultats sont presentes a la figure 44. Les cas etaient representatifs d'une vaste gamme de climats et de conditions geologiques avec des temperatures moyennes variant de -10oC (mer de Beaufort) a +27oC (Nigeria). Charlie et al. (1992) ont suggere que l'effet de temps pourrait etre lie a la temperature moyenne de l'air. L'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de l'eau (c'est-a-dire l'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de l'eau) (c'est-a-dire l'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de l'eau) (c'est-a-dire l'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de l'eau) (c'est-a-dire l'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de l'eau (c'est-a-dire l'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de l'eau) (c'est-a-dire l'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de l'eau) (c'est-a-dire l'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de l'eau (c'est-a-dire l'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de l'eau) (c'est-a-dire l'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de l'eau) (c'utilisation d'une methode de calcul de la concentration de la concentration de l'eau) (c'eau)

pour l'eau (c'eau) (c'eau) pour l'eau (c'eau) pour l'eau (c'eau) pour l'eau (d'eau) (c'eau) pour laquelle l'eau) pour l'eau (d'eau) pour l'eau (d'eau) pour l'eau) pour l'eau (d'eau) pour l'eau (d'eau (d'eau (d'eau (c'eau) pour l'eau) pour l'eau) pour l'eau (d'eau (d'eau) pour l'une methode d'une methode d La valeur derivee du CPTu est particulierement utile puisque, le cone represente un modele tres similaire a l'installation et au processus de drainage autour du drain de meche. Bien qu'il y ait un risque de demangeaison et de perturbation du sol autour du CPT, il existe souvent un risque de demangeaison et de perturbation similaire autour du meche et, par consequent, la valeur calculee du c provenant du CPTU est generalement representative du sol pour la conception du drain de meche. Les details sur l'estimation du c provenant des essais de dissipation ont ete donnes dans la section sur les caracteristiques de consolidation h (parametres geotechniques). Pour fournir une estimation raisonnable du c un nombre suffisant d'essais de dissipation doit etre effectue h, dans la zone d'interet. Le CPT est un essai in situ ideal pour evaluer le potentiel de liquefaction du sol en raison de sa repetabilite, de sa fiabilite, de ses mesures continues et de son rapport cout-efficacite. Liquefaction Plusieurs phenomenes sont decrits comme liquefaction du sol; par consequent, les definitions suivantes sont fournies pour faciliter la comprehension du phenomene. Liquefaction du flux (statique) Ne s'applique qu'a la deformation des sols en cisaillement non draine (c'est-a-dire les sols susceptibles de subir une perte de resistance/reduction en cisaillement non draine). La figure 45 presente un diagramme d'ecoulement pour clarifier les phenomenes et les definitions de la liquefaction du sol. Si un sol est contractif a de grandes souches et qu'il n'y a pas d'adoucissement de la contrainte (c'est-a-dire qu'il peut y avoir perte de resistance/reduction du cisaillement non draine), la liquefaction est possible si le sol peut etre declenche pour la deformation-souvent et si les contraintes de cisaillement gravitationnel sont plus grandes que la resistance minimale au cisaillement non drainee. Le declencheur peut etre monotonique ou

cyclique. Si une pente ou une structure du sol echouera, et le glissement dependra de la quantite de sol adoucissant de la contrainte par rapport au sol durcissant dans la structure, de la fragilite du sol ramollissant de la souche et de la geometrie 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 penetration des cones (CPT) atteignent zero dans les sols de type sable, pendant la charge cyclique, resultant en de grandes deformations. L'inversion de la contrainte de cisaillement est frequente dans le niveau et le sol en pente douce pendant les tremblements de terre ou les contraintes statiques de cisaillement sont faibles par rapport aux contraintes de cisaillement cycliques imposees. Des exemples de liquefaction cyclique ont ete frequents dans les tremblements de terre majeurs de Niigata (1964) et Christchurch (2010/11) et se manifestent sous forme d'ebullitions de sable, les lignes de vie endommagees (piplines, etc.) les spreads lateraux, les effondrements du sable, les fissures de surface. Si la liquefaction cyclique se produit et les voies de drainage sont souvent limitees en raison de la surpression du sol, les pertes de temps peuvent etre reduites en raison de la perte de temps. On trouve un exemple d'approche fondee sur le risque pour les residus miniers l'adresse suivante: а https://www.icmm.com/en-gb/guidance/innovation/2021/tailings-managementgood-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 details) La plupart des travaux en cours sur la liquefaction cyclique ont porte principalement sur les tremblements de terre. Le facteur r peut etre estime a l'aide de la fonction tri-lineaire suivante, d qui fournit un bon ajustement a la moyenne de l'intervalle suggere dans r initialement d propose par Seed et Idris (1971): $r = 1.0 \, 0.00765z \, d \, si \, z < 9.15 \, m = 1.174 \, 0.0267z \, si \, z = 9.15 \, a \, 23 \, m = 0.744$ 0,008z si z = 23 a 30 m 110 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) = 0,5 si z > 30 m Ou z est la profondeur en metres. Ces formules sont au mieux approximatives et ne representent que des valeurs moyennes puisque r montre une variation considerable avec la profondeur. d Idris et Boulanger (2008) suggerent des valeurs alternatives pour r, mais elles sont egalement associees a des valeurs alternatives du CRR. La sequence d'evaluation de la liquefaction cyclique pour le

niveau ou la pente douce des sols du sol est: 1. Evaluer la sensibilite du sol a la liquefaction cyclique du sol et du sol du sol du sol du meme type de sol du sol du meme type de sol du mode de sol du mode de sol. Les sols de type CPT ont generalement un indice de SBT base sur le CPT I < 2,8 (ou I > 22). c B = Projets a faible risque : Les sols de type C sont sensibles a la liquefaction cyclique sur la base de criteres ci-dessus, a moins que l'experience locale precedente n'en montre autrement. Projets a haut risque: Soit supposent que les sols sont sensibles a la liquefaction cyclique ou obtiennent des echantillons de haute qualite et evaluent la susceptibilite sur la base d'essais de laboratoire appropries, a moins gu'une experience locale anterieure n'existe. 111 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Comportement de type Clay: Les sols de type Clay ne sont generalement pas sensibles a la liquefaction cyclique < les sols de type Clay ne sont pas susceptibles a la liquefaction cyclique lorsque leur comportement est caracterise par le PI > 18, mais ils peuvent subir un adoucissement cyclique. 2.5 < I < 2.8), comme l'illustrent les figures 23 et 25 b). Pour les sols B c qui se trouvent dans cette region de transition ou a proximite de celle-ci, des echantillons devraient etre obtenus pour verifier le comportement. 2. Evaluer le declenchement de la Liquefaction cyclique Materiaux semblables a des sables Seed et al., (1985), a mis au point une methode pour estimer le rapport de resistance cyclique (RRC) pour le sable propre avec des conditions de sol de niveau base sur le test standard de penetration (SPT). Le CPT est devenu plus populaire pour estimer le CRR, en raison de la nature continue, fiable et repetable des donnees (Youd et al., 2001; Robertson, 2009) et maintenant une base de donnees plus vaste sur l'historique des cas de liquefaction cyclique. La correlation de declenchement du CPT recommandee pour les sols sableux peut etre estimee a l'aide des equations simplifiees suivantes suggerees par Robertson et Wride, (1998): () () () () Q () CRR = 93 tn,cs () () 0,08 7,5 () () 1 000 () si 50 () Q () 160 tn,cs () = () Q () CRR = 0,833 tn,cs () = () 1 000 () = () si Q < 50 tn,cs 113 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Les observations de terrain ont ete basees principalement sur les conditions suivantes : () les depots de sable a base d'Holocene, non cimentes a base de silice avec K < 0,7 () () () le rapport de contrainte cyclique (CSR) est ajuste en fonction de l'amplitude M = 7.5 () La valeur de la valeur de la

valeur de la En regle generale, une correction est apportee pour determiner une resistance equivalente a la penetration normalisee du sable propre (Q) tn,cs basee sur les caracteristiques du grain, telles que la teneur en fines, bien que les corrections soient dues a plus d'une teneur en fines et soient influencees par la plasticite (mineralogie) des amendes 114 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Figure 47. Resume de la base de donnees sur l'historique des cas de Liquefaction cyclique (modifiee de Boulanger et Idriss, 2008) L'une des raisons pour lesquelles le SPT a continue d'etre utilise a ete la necessite d'obtenir un echantillon de sol pour determiner la teneur en fines du sol. (c'est-a-dire une valeur de la valeur de la

valeur de la Dans le cas de la region CPT, la valeur de la concentration de CPT dans la region CPT est la suivante: c n = 0,381 (I) + 0,05 (=" /p) 0,15 c vo a ou n 1,0 (voir la figure 48 pour le diagramme d'ecoulement). Robertson et Wride (1998) ont suggere un facteur de correction (K) pour corriger la resistance au cone normalise (Q) mesuree a une resistance au sable propre equivalente (Q) et Robertson (2021) ont mis a jour le facteur de correction a la region Tn, cs suivant la version simplifiee: K = 1,0 si I = 1,7 c c Le facteur de correction, K, est approximatif puisque le CPT repond a de nombreux facteurs c tels que la plasticite du sol, la teneur en mineraux, la sensibilite au sol, l'age et l'historique du stress. On recommande que les sols soient echantillonnes a l'aide d'un echantillon simple push-in (disturbed) lorsque I > 2.4 (I < 32) a c B verifier le type de comportement base sur des tests d'indices simples (p. ex., distribution de la taille des grains, limites d'Atterberg et teneur en eau) afin de confirmer la susceptibilite a la liquefaction cyclique a l'aide des criteres de la figure 46. L'echantillonnage selectif des sols base sur I c (ou I) doit etre effectue a proximite de certains sondages CPT. Des echantillons perturbes B peuvent etre obtenus a l'aide d'echantillonneurs push directs (p. ex., la

figure 1) ou de methodes de forage/echantillonnage conventionnelles proches du sondage CPT. 117 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Figure 48. Si la methode de calcul de la CSR doit etre appliquee en meme temps que la methode de calcul de la CSR, la methode de calcul de la CSR peut etre utilisee pour calculer Q (ou g) pour estimer CRR. tn,cs c1n,cs Cela signifie que vous ne devez pas melanger les methodes (c'est-a-dire calculer CSR en utilisant une methode et estimer CRR en utilisant une autre methode). Ceci s'applique egalement aux divers «facteurs de correction» utilises dans chaque methode. CRR peut egalement etre estime en utilisant la vitesse de cisaillement normalisee V (Kayen et 7.5 s1 al, 2013). La combinaison de CPT et de V pour evaluer le potentiel de liquefaction du sol est tres utile et peut etre effectuee de maniere rentable a l'aide de la CPT sismique (SCPT). V est une petite souche de mesure de la rigidite du sol et est sensible a la resistance a la charge cyclique (CRR), comme l'indique la figure 49, 119 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test, mais peut etre utile a la CPT. Dans ce cas de 7.5 120 CPT - 2022 Cone Penetration Test (CPT), la quantite et la cause de la liaison doivent etre etudiees pour determiner si la charge sismique est suffisante pour detruire les liaisons. Par exemple, pour les petits tremblements de terre, l'approche V peut etre correcte, mais pour les grands tremblements de terre (qui peuvent detruire les avantages de la liaison) l'approche CPT peut etre correcte. Stratigraphie zones de transition Robertson et Campanella (1983) a montre que la resistance a l'extremite du cone est influencee par le sol devant et derriere l'extremite du cone. Dans les sols forts/stifs, la zone d'influence est grande (jusqu'a 15 diametres de cones) alors que dans les sols mous, la zone d'influence est plutot petite (aussi petite que 1 diametre de cone). Ahmadi et Robertson (2005) ont montre que la taille de la zone d'influence diminuait avec une contrainte croissante (par exemple, les sables denses se comportent plus comme du sable libre a des concentrations elevees de stress). Les profils de I peuvent fournir un moyen simple d'identifier et d'enlever ces zones de transition. Le logiciel, tel que CLiq (http://www.geologismiki.gr/Products/CLiq.html), comprend une fonction d'identification et d'elimination des zones de transition (voir exemple a la figure 53). 121 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Plusieurs methodes ont ete suggerees pour corriger les effets de transition (p. ex. Boulanger et DeJong, 2018) sur la base de methodes d'inversion.

Toutefois, ces methodes sont souvent fondees sur l'hypothese que l'interface entre les deux types de sol est nette. Toutefois, dans certains cas, la transition peut etre progressive. L'application de ces methodes d'inversion pour evaluer la liquefaction cyclique n'a generalement pas ete reussie et ne correspond pas aux observations de performance sur le terrain. L'elimination des zones de transition peut etre consideree comme un cas extreme pour entreposer le comportement probable. Pour les sols fortement charges (p. ex. pres des fondations) et les sols fortement inclines, K peut etre significativement inferieur a 1,0. Pour les charges sismiques, ou le CSR < 0,6, l'adoucissement cyclique n'est possible que dans le cas normal de 122 CPT Guide - 2022 Test de penetration des cones (CPT) surconsolide (OCR < 4) sols argileux. Pour les sols contractifs ressemblant a du sable avec un biais de contrainte de cisaillement statique (p. ex., terrain fortement incline), K peut etre inferieur a 1,0. Boulanger et Idris (2007) ont recommande trois approches pour determiner le CRR pour les materiaux argileux, qui sont essentiellement : 1. estimation a l'aide de methodes empiriques basees sur l'historique des contraintes (c.v.s.) 2. mesure a l'aide de tests in situ (p. ex., CPT et FVT) peut etre effectuee a l'aide d'une methode d'estimation de l'exposition a l'expo l'exposition a l'expo l'exposition a l'expo l'exposition a l'expo l'exposition a l'expo l'exposition a l'expo l'exposition a l'expo l'exposition a l'expo l'exposition a l'expo l'avantage que les resultats soient repetables et fournissent un profil detaille en continu de l'OCR et donc du CRR. 7.5 Robertson (2009) a recommande l'approche CPT suivante qui peut etre appliquee a tous les sols (c.-a-d. pas de coupe I) : c Lorsque I 2,50, supposons que les sols

peuvent etre en forme de sable et que la penetration CPT est essentiellement drainee : Utiliser Robertson et Wride (1998) recommandation basee sur Q = K Q, tn, cn ou K est une fonction de I (mise a jour par Robertson, 2022, voir Figure 48) c c Lorsque I > 2,70, supposons que les sols sont en forme d'argile et que la penetration CPT est essentiellement non drainee, ou : RER = 0,053 Q K 7,5 tn , 123 CPT Guide - 2022 Cone Test de penetration Lorsque 2,50 < I < 2,70, observations aussi en forme de sol en forme de so forme de sol en voie de sol en voie de transition. Il peut etre utile d'effectuer une analyse a la fois a l'aide d'une methode RCERE/RW98 pour les sols ressemblant a du sable et a la methode Robertson (2009) pour tous les sols, afin d'evaluer la sensibilite des resultats au type de sol. 124 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Figure 50. Le rapport de resistance cyclique (CRR) a l'aide de CPT M = 7,5 (Apres Robertson, 2009) 3. Evaluation des deformations post-seisme Plusieurs indices simplifies ont ete developpes pour estimer le niveau de dommages de surface dus a la liquefaction. La premiere etait l'indice de potentiel de liquefaction (IPL) propose par Iwasaki (1978) qui a fourni une ponderation lineaire au facteur calcule de securite contre la liquefaction (1-FS) dans le liq superieur et a lie l'IPL a la gravite des dommages de surface. Pour les projets a faible ou moyen risque et pour les estimations preliminaires pour les projets a haut risque, on peut estimer les concentrations de CPT apres le tremblement de terre en utilisant la methode du CPT apres le tremblement de terre en utilisant la methode du CTP apres le tremblement de terre en utilisant la methode du CTP apres le tremblement de terre en utilisant la methode du Robertson et de Wride (1998) pour obtenir un profil vertical detaille des concentrations de CPT apres le tremblement de terre en utilisant la methode du CTP en utilisant la methode du CTP apres le tremblement de terre. Pour les projets a haut risque, un echantillonnage de haute qualite et des essais en laboratoire appropries peuvent etre necessaires dans les zones critiques identifiees par l'approche simplifiee. Le jugement technique est necessaire pour evaluer les consequences des constructions verticales 1D calculees a partir de souches induites par le volume, compte tenu de la variabilite du sol, de la profondeur des couches liquefiees, de l'epaisseur des sols non liquefiables au-dessus des sols liquefies et des details du projet (voir Zhang et al., 2002). Le deplacement des

batiments situes au-dessus des sols qui subissent une liquefaction dependra des details de la fondation et de la profondeur, de l'epaisseur et de la distribution laterale des sols liquefies. En outre, une couche profonde a faible FS peut reduire la demande sismique a des profondeurs peu profondes, ce qui permet d'obtenir une liquefaction simplificatrice, ce qui conduit a une liquefaction de l'echantillon (apres Hutabarat et Bray, 2022) la deformation par liquefaction de l'echantillon, qui tend a etre plus elevee a des sites presentant des couches de sable liquefactionables epaisses a proximite de la surface du sol, combinee a une mince croute non liquidable faible, ce qui est conforme aux observations faites par Ishihara (1985) qui ont lie les dommages de surface causes par la liquefaction a l'epaisseur de la couche de sable liquefactionable et a l'epaisseur de la croute non liquidable de la surface du dessus. Il n'est donc pas possible de comparer l'approche Zhang et al (2002) calculee en DL avec celle de Boulanger et d'Idriss de performance (2008). L'approche fondee sur le CPT est generalement prudente car elle est appliquee a toutes les donnees du CPT et capte des valeurs de cones faibles (minimum) dans les couches de sol et dans les zones de transition aux limites du sol. Ces valeurs de cones faibles dans les zones de transition entrainent souvent des deformations de cisaillement accumulees qui tendent a augmenter les deformations laterales estimees. Le jugement technique doit etre utilise pour eliminer le conservatisme excessif dans les depots fortement intercotes ou il y a des zones de transition frequentes aux limites du sol. Le logiciel peut enlever des valeurs dans les zones de transition aux limites du sol (p. ex. CLig de http://www.geologismiki.gr/). Le jugement technique est necessaire pour evaluer les consequences des deplacements lateraux calcules en tenant compte, de la variabilite du sol, de la geometrie du site, de la profondeur des couches de sol liquefies et des details du projet. La methode de Hutabarat et Bray (2022) comprend une approche simplifiee pour estimer la quantite de pressions interstitielles induites par les tremblements de terre qui peut etre utile pour comprendre la distribution probable de fortes pressions interstitielles et la facon dont les couches d'argile peuvent limiter les effets de ces pressions interstitielles sur la performance globale du site. Lorsque les deformations laterales calculees a l'aide des methodes empiriques ci-dessus sont tres importantes (c.-a-d., des souches de cisaillement de plus de 30 %) les sols devraient egalement etre evalues

pour determiner leur susceptibilite a la perte/reduction de force (voir la section suivante sur la liquefaction de l'ecoulement dans le sol en pente) et la stabilite globale par rapport a un glissement de l'ecoulement evalue. Dans la figure 52, on presente une mise a jour du diagramme, ainsi que des lignes directrices generales relatives a l'evaluation de la liquefaction cyclique ou de la liquefaction de flux. 130 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) Figure 52 Zones de liquefaction/souplesse potentielle fondees sur le CPT (voir la figure 25b pour plus de details) Sols de type sable (SD & SC, I > 32) - Evaluer le comportement potentiel en utilisant des correlations de liquefaction de cas et d'histoire B de CPT. SD Liquefaction cyclique possible en fonction du niveau et de la duree de la charge cyclique. SC Liquefaction cyclique et (liquefaction de flux) Perte de resistance possible en fonction de la charge et de la geometrie du sol. CC/CC, I < 22) - Evaluer le comportement potentiel en fonction de la sensibilite du sol et de la plasticite, du chargement et de la geometrie du sol. Si les resultats sont significativement differents, ils doivent etre evalues pour determiner les raisons probables des differences. Generalement, lorsqu'un site est compose principalement de sols ressemblant a du sable dans les zones superieures et avec un niveau eleve d'eau souterraine (z < 4m) et pour un tremblement de terre de conception avec M < 8 (voir w w resume de la base de donnees dans la figure 47), les methodes fournissent souvent des resultats similaires, etant donne qu'elles etaient toutes basees sur des sites similaires. Exemple d'approche fondee sur le CPT pour evaluer la liquefaction cyclique au site d'atterrissage de Moss montrant (a) des parametres intermediaires (b) le CRR, la FS et les deformations post-sismales a l'aide du logiciel «CLiq» (http://www.geologismiki.gr/) CLiq offre la possibilite de comparer les resultats sur une gamme d'entrees 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 seisme maximal etait plus grand (p. ex., plus eleve a) les colonies verticales resultantes ne sont pas trop sensibles, puisque la liquefaction a ete declenchee pour la plupart. Pour une pente qui connait une instabilite due a la liquefaction de l'ecoulement, les

•	•	•	٠.	•	•	•	•	•	•	•	 •	•	•	 •	•	•	٠.	•	•	•	٠.	•	•	•	 •	•	٠.	•	٠.	•	•	٠.	•	٠.	•	•	 •	•	٠.	•	•	٠.													

declencheurs peuvent etre tres petits (Robertson et al, 2019). Pour les structures ou les consequences de la defaillance sont elevees (p. ex., perte de vie et/ou dommages importants a l'environnement et a la reputation), il est prudent de supposer que la perte de force sera declenchee car il est souvent impossible de concevoir avec confiance que la perte de force ne sera pas declenchee a un moment donne dans la vie de la structure. Dans les regions sismiques, meme les petits tremblements de terre peuvent declencher la perte de force si les sols sont sensibles et sont soumis a des contraintes de cisaillement statiques elevees. En general, l'accent mis dans la conception sur la resistance a la perte de force peut etre mis sur l'evaluation de la perte de force a un moment donne dans la vie de la structure. Dans le cas de l'etude de la resistance a l'eau, la relation s'applique aux sols peu ou pas de microstructure, p. ex., les sols sont geologiquement jeunes (c.-a-d. moins de 10 000 ans) et/ou les sols non lies (c.-a-d. pas de cimentation). La tendance des sols a changer de volume pendant le cisaillement couvre un large spectre de données allant de tres contractives a tres dilatives, par exemple, les sols tres laches tendent a se contracter de facon continue vers l'etat critique (CS), tandis que les sols moderement laches peuvent initialement se contracter quelque peu avant d'atteindre l'etat critique. Dans le cas des sols non draines, les donnees concernant les sols non draines et les sols transitoires (I < 3,0) c Dans le cas des sols sableux, avec un indice de type de comportement du sol I < 2,60, ou le processus de penetration du CPT est principalement draine, Robertson (2010) a suggere que la resistance au cone normalise (Q) soit liee au parametre d'etat (-) en utilisant un facteur de correction de l'equivalent de sable propre (Q) defini par : tn,cs 137 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Q = Q K tn,cs tn c Ou, Q est la resistance au cone normalisee de l'equivalent de sable propre (-) et K est un facteur de correction de tn,cs c pour tenir compte de l'evolution du comportement avec augmentation de la teneur en fines et de la compressibilite. Robertson (2010) a suggere un lien

entre Q et - pour les sols sableux

------ La relation entre Q et la grande souche de resistance liquefiee non drainee tn, cs ratio (s /=), suggeree par Robertson (2010) pour les sols qui ressemblent principalement a du sable u(liq) vo, a egalement ete mise a jour et simplifiee pour permettre l'extension de la relation a des valeurs plus elevees de Q, ou les sols sont dilatifs a de grandes souches et ou la resistance au cisaillement de tn, cs est controlee par la resistance drainee. La relation actualisee 138 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) a ete etendue a des sols transitoires ou I < 3,0 en utilisant la K modifiee. Inclus dans la figure 55, ou la resistance au cisaillement de tn, c'est aussi la valeur de l'historique des cas de classe A et B de Robertson (2010), mais mise a jour sur la base des valeurs de Q modifiees et avec des cas enleves lorsque la concentration de K modifiee est inferieure a la concentration de K, c'est-a-dire qu'il y a lieu d'estimer la concentration de la concentration de la substance dans le sol. Entre 70 < Q < 80, les sols tn,cs peuvent etre initialement contractifs mais devenir progressivement plus dilatifs avec des souches croissantes et le rapport de resistance au cisaillement non draine peut etre eleve mais reste legerement inferieur au rapport de resistance draine, defini par tan. La correlation simplifiee et mise a jour suggeree pour estimer le rapport de resistance liquorisee non drainee de grande souche, s /, pour les sols sableux et transitoires, u(lig) vo lorsque l < 3.0 est: c s / .0 = 0.0007 exp (0.084 Q) +0.3/Q u(liq) vo tn,cs tn,cs Quand Q < 20, supposons s / , mais utilisez s = 1kPa, comme un tn,cs u(liq) vo u(liq) lorsque, < 50kPa. La valeur minimale de 1kPa est representee par l'etat de l'etat d'ecoulement moyen par la force d'ecoulement moyen du sol argileux, si le rapport de resistance a l'ecoulement moyen est superieur a celui de la valeur de l'etat d'ecoulement moyen. La relation entre la force maximale du sol et celle du sol est plus faible que celle du sol. La relation entre la force maximale du sol et celle du sol est plus faible que celle du sol. La relation entre la force maximale du sol et celle du sol est plus faible que celle du sol. La relation entre la force maximale

du sol et celle du sol est plus faible que celle du sol. La relation entre la force maximale du sol et

celle du sol est plus faible que celle du sol. La relation entre la force maximale du sol et celle du sol est plus faible que celle du sol. La relation entre la force maximale du sol et celle du sol est plus faible que celle du sol. La relation entre la force maximale du sol et celle du sol est plus faible que celle du sol. La relation entre la force maximale du sol et celle du sol est plus faible que celle du sol. La relation entre la force maximale du sol et celle du sol est plus faible que celle du sol. Pour des raisons de conception, la relation indiquee a la figure 55 peut etre appliquee afin de fournir une estimation raisonnable de s /= , jusqu'a = 300 kPa. Pour des niveaux de contrainte plus eleves, les valeurs estimees de s /= , peut-etre bas et avance en laboratoire u (lig) vo, sont necessaires pour guider toute augmentation de s /= , en raison de la courbure de l'u (lig) vo CSL. Robertson (2017) a fourni un guide approximatif pour estimer la contrainte effective de surcharge lorsque le comportement non draine deviendrait plus ductile et s /= environ une valeur plus proche de 0,25 sur la base du rapport de frottement CPT, u(liq) vo, comme le montre la figure 56. Cette comparaison illustre la difference potentiellement importante entre la resistance non drainee possible (rendement) et la resistance liquidee dans les sols non draines. Les methodes d'equilibre avec les resistances au cisaillement non drainees peuvent etre trompeuses lorsqu'elles sont appliquees a des sols qui peuvent subir une perte/reduction significative de la resistance (Robertson et al., 2019) qui introduisent une incertitude supplementaire lors de l'application des valeurs de resistance au cisaillement non drainee pour la conception. Par consequent, il faut faire preuve de prudence avant d'utiliser des valeurs de resistance non drainee pour evaluer la stabilite lorsqu'il existe un risque de perte/reduction significative et rapide de la resistance. Les courbes indiquees sur la figure 57 indiqueraient correctement que le rapport de resistance au cisaillement total et le rapport de resistance au cisaillement total (c'est-a-dire le rapport de resistance au cisaillement total et le rapport de resistance au cisaillement total sont proches de 0,10 (c'est-a-dire que le rapport de

resistance au cisaillement total et le rapport de resistance au cisaillement total sont inferieurs a 3 % selon la base de donnees historique CPT pour les sols argileux 2 (Lunne et al, 1997). En principe, pour un sol avec un parametre d'etat contractif (ou : -0,05) 10 le rapport de resistance liquefie non draine augmente a mesure que l'on augmente (c'est-a-dire que le 10 le CSL est plus faible la perte de resistance pour un parametre d'etat contractif donne). Les publications precedentes (Plewes et al., 1992; Reid, 2015; Jefferies et Been, 2016) ont montre que dans la region de type argile ou I > 3,0, la valeur estimee de 10 c c est de 0,15 (Reid, 2015). A l'aide de la correlation modifiee 10 suggeree par Jefferies et Been (2016) pour la figure 0.15, les valeurs de rapport de resistance liquefie 10 non draine sont similaires a celles indiquees dans la figure 57 lorsque I > 3,0. c Par consequent, la relation suggeree dans la figure 57 est conforme a la methode actualisee, mais plus complexe, des relations suggerees par Jefferies et Been (2016) pour la methode de calcul de la concentration de concentration de la concentration de concentration de la concentration de concentration de la concentration de concentration de la concentration de concentration de la concentration la concentration de la concentration la concentration de la concentration la concentration de la concentration de concentration la concentration la concentration la concentration de la concentration la concentration

la concentration de la concentration la concentration de concentration de concentration de la concentration la concentration la concentration de En general, des contraintes excessives efficaces croissantes ont tendance a rendre le sol plus argileux et ou les donnees CPT ont tendance a migrer dans la region argileuse sur la carte SBT. Si les sols sont contractifs a une grande souche et principalement argileux (I > 3,0), c estimeront la resistance a l'ecoulement de la grande souche liquefiee/remorquee non drainee directement a partir de f puisque le processus de penetration du CPT n'est pas draine. Dans les sols argileux, des donnees supplementaires peuvent etre obtenues a partir d'essais appropries sur des fourgons de terrain ainsi que d'un echantillonnage de haute qualite et d'essais en laboratoire, lorsque cela est possible. Dans le cas des projets a risque eleve, la possibilite d'une redistribution nulle peut etre evaluee a l'aide de modeles numeriques de stress plus complexes. Dans le cas des projets a risque eleve ou les consequences de l'instabilite sont tres elevees (p. ex., pertes de vie, dommages environnementaux importants, perte de reputation, etc.), si la FS < 1.1 prend des mesures d'attenuation pour assurer la stabilite et reduire les consequences possibles. Dans certains cas, il peut etre approprie d'effectuer une modelisation numerique avancee pour evaluer si les performances sont acceptables a l'aide de modeles constitutifs appropries et de valeurs de resistance a la cisaillement de grandes deformations. Toutefois, la conception globale devrait etre effectuee dans un cadre fonde sur les risques. Dans le cas du sol en pente raide, les contraintes de cisaillement statique sont generalement elevees et lorsque les sols sont contractifs a grande souche, K est inferieur a 1,0. Par consequent, le K est generalement inferieur a 1,0 dans le sol en pente raide avec des sols contractifs. 147 CPT Guide - 2022 Logiciels Au cours des dernieres annees, le logiciel commercial est devenu disponible pour faciliter l'interpretation et la conception geotechnique du CPT a l'aide des resultats du CPT. Robertson a participe au developpement de deux programmes : CPeT-IT (pron. C-petit) et CLig (pron. slick). Les deux programmes sont peu couteux et tres convivial et peuvent etre telecharges а partir de

http://www.geologismiki.gr/Products.html. Le CPeT-IT est un logiciel facile a utiliser pour l'interpretation des donnees du CPT et du CPTu. Il comprend egalement les methodes de liquefaction fondees sur le CPT suggerees par Moss et al (2006) et Boulanger et Idris (2008/2014). Une caracteristique 2D unique fournit un moyen de creer des cartes de contours colores de l'indice global de liquefaction potentielle (IPL) et des peuplements post-seisme dans la vue du plan, ce qui permet a l'utilisateur de visualiser la variation spatiale du potentiel de liquefaction et des peuplements sur un site. Les variations des peuplements apres tremblement de terre calcules sur un site permettent d'estimer les peuplements differentiels pour un site donne et le tremblement de terre de conception. Une fonction d'analyse parametrique permet a l'utilisateur de varier a la fois l'amplitude du tremblement de terre et l'acceleration de la surface pour evaluer la sensibilite du guide general 148 CPT - 2022 L'indice de liquefaction du logiciel et les peuplements apres tremblement de terre en fonction du chargement et des resultats du tremblement de terre sont presentes sous une forme graphique 3D. Dans les proces-verbaux de la 12e Conference internationale sur la mecanique des sols et l'ingenierie de la fondation, Rio de Janeiro, Balkema Pub., Rotterdam, vol. 1, p. 165 a 170. Boggess, R. et Robertson, P.K., 2010. CPT pour les sediments mous et les etudes sur les eaux profondes, C.P. 151, 2e Symposium international sur les essais de penetration des cones, C.P. 10, Huntington Beach, CA, Etats-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 edition, BiTech Publishers, Vancouver, C.B. Campanella, R.G., et Robertson, P.K., 1982. Etat de l'art dans les essais in situ des sols, C.P. 557. A.M., D., et Leroueil, S., 2003. Caracterisation et proprietes techniques des sols naturels, Vol.1, Swets et Zeitlinger, Lisse, pp. 255-360. Idriss, I.M. et Boulanger, R.W., 2004. Procedures semi-empiriques pour l'evaluation du potentiel de liquefaction lors des tremblements de terre. Actes 11e Conference internationale sur la dynamique des sols et l'ingenierie des tremblements de terre. Berkeley, 32-56. IRTP, 1999. Procedure internationale d'essai de reference pour l'essai de penetration des cones (CPT). Rapport du Comite technique de l'ISSMFE sur l'essai de penetration des sols, TC 16, Institut geotechnique suedois, etude du sol,

coll. T.P., l'etat de l'e l'etat de l'e l'etat de l'etat. Revue française de Geotech, vol. 44, 13-27. Robertson, P.K., 1990. Classification des sols a l'aide de l'essai de penetration des cones. Revue geotechnique canadienne, 27(1): 151-158. Robertson, P.K., 1998. Etude des sites fondes sur les risques. Nouvelles geotechniques: 45-47, septembre 1998. Robertson, P.K., 2009a. Interpretation des essais de penetration des cones - une approche unifiee. Revue geotechnique canadienne, 46:1337-1355. Robertson, P.K., 2010a. Type de comportement des sols du CPT: une mise a jour. 2e Symposium international sur les essais de penetration des cones, CPT=10, Huntington Beach, CA, Etats-Unis. www.cpt10.com Robertson, P.K., 2010b. Estimation des parametres de l'etat des sols et de l'angle de frottement dans les sols sablonneux. Travaux d'ingenierie geotechnique, P.P., Woeller, D.J., Lunne, T., Powell, J.J.M. et Gillespie, D., 1992. Estimation du coefficient de consolidation a partir des essais de piezocone. Revue geotechnique canadienne, Ottawa, 29(4): 539-550. 154 CPT Guide 2022 Principales references Robertson, P.K., et Campanella, R.G., 1983a. Interpretation des essais de penetration des cones Partie I (sand). Revue geotechnique canadienne, 20(4): 718-733. Robertson, P.K., et Campanella, R.G., 1983b. J.L., I.M., J.M., J.M.,