



..... 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

partir de <https://geologismiki.gr/products/>. 1 Guide CPT - 2022 Caractérisation du site basée sur le risque Caractérisation du site basée sur le risque et l'incertitude sont des caractéristiques du sol et ne sont jamais entièrement éliminées. Le niveau approprié de sophistication des résultats de l'analyse au-dessus de la fonction du site doit être déterminé selon les critères suivants : 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 piezocone (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. Les échantillons de type Gouda ont une pointe de cône interne qui est rétractée à la position verrouillée laissant un échantillonneur creux avec un petit diamètre (généralement 25mm/1pouce) en acier inoxydable ou en laiton. L'échantillonneur creux est ensuite poussé pour prélever un échantillon. L'échantillonneur rempli et les tiges de ponçage sont ensuite récupérés à la surface du sol. Le 4 CPT Guide - 2022 Rôle de l'échantillonneur de type MOSTAP contient un fil pour fixer la position de l'embout de cône interne avant de pousser pour obtenir un échantillon. Des modifications ont également été apportées pour inclure un système filaire afin que les échantillons de sol puissent être récupérés à plusieurs profondeurs plutôt que de récupérer et de redéployer l'échantillonneur et les tiges à chaque intervalle. Les systèmes filaires ont tendance à fonctionner mieux dans les sols mous. Dans un piezocone, la pression interstitielle est également mesurée, généralement derrière le cône à l'emplacement u, comme le montre la figure 2. Si les pressions interstitielles sont mesurées 2 sur la face du cône, c'est l'emplacement u. Certains cônes peuvent mesurer simultanément les pressions u et 1 1 u pore. 2 Figure 2. Terminologie pour les pénétromètres à cônes 6 CPT Guide - 2022 Essai de pénétration du cône (CPT) Histoire 1932 Les premiers essais de pénétromètre à cônes ont été effectués à l'aide d'un tuyau de gaz de diamètre extérieur de 35 mm avec une tige de traction interne en acier de 15 mm. Une pointe de cône avec

[illegible]

[illegible]

permettre une mesure de la non- verticalite du sondage. Ceci est utile pour eviter les dommages aux equipments 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 pousse initial 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 donnees a 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_{50}), 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 $\pm 0,1$ % 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

[illegible]

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 arrêts/pauses frequents pour effectuer les mesures sismiques et il peut etre utile d'enregistrer les donnees de dissipation au cours de ces arrêts/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, 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 fondees 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 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 silteux, 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 normalisée (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 a de grandes souches sur la figure Q -F est définie par : $CD = 70 = (Q + 11) (1 + 0,06F)$ Robertson (2016) a également suggéré un indice de type de comportement du sol modifié, $I : B I = 100(Q + 10) / (70 + Q F)$ 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 reproductibilité 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 type de comportement du sol à l'aide du diagramme du CPT non normalisé et du rapport $(q/p)/N$ suggère pour chaque type de comportement du sol est donné dans le tableau 5. Ces valeurs fournissent une estimation raisonnable des valeurs de N du SPT à partir des données du CPT.

Pour simplifier les corrélations ci-dessus sont données en fonction de la nature de l'argile semée. 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: $(q/p)^{1/4} I_c^{1/4} = 8.5 + 1.1268 (0.2817 I_c)^{1/4} N^{1/4}$

Robertson (2012) a suggéré une mise à jour de la relation ci-dessus qui fournit des estimations améliorées de N pour les argiles insensibles: $(q/p)^{1/4} I_c^{1/4} = 10 (1.1268 (0.2817 I_c)^{1/4} N^{1/4})$

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 reproductibilité 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.

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 non drainée du sol dépend 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 $B \sim 1,0$, 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 s , c'est-a-dire les valeurs suivantes :

42 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) $s \approx q$, $S = u = t \cdot v \cdot (1 / f) \sim 7 / F$ (sur la base de $N = 14$) $t \cdot r \cdot k \cdot s \cdot N \cdot u$ (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 draine (Rem) s ($s \neq k$) est: $u(\text{Rem}) \text{ vo } s \neq f \neq = (F \cdot Q) / 100 \cdot u(\text{Rem}) \text{ vo } s \cdot t$

43 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Il est donc possible de représenter ($s \neq f \neq =$) les contours lineaires sur le graphique $U(\text{Rem}) \text{ vo } s$ normalise 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 definie comme le rapport du stress de consolidation effectif maximal et du stress de surcharge actuel: $= \text{OCR} = p'_{\text{vs}} / p_{\text{slide}} = \text{sole sursolide mecaniquement (SR)}$ 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 dilatant 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 (Q) en utilisant la methode suivante : $YSR = 0,33 (Q)^{m=1} t_n$ Ou Q a ete defini par Robertson (2009) et $m=1$ est modifiee pour devenir : $t_n m=1 [0,28 / (1+(I/2.6)^{15})]$ 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 $Fr \sim 2\%$ 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_r , ou indice de densite, I_d , est definie comme suit : $r D_r = I_d = D_r = D_r e = e_{max} / e_{min}$ ou : e et e_{max} et e_{min} 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_{max} et e_{min} sont bien connus. 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_r a ete utilisee par les ingenieurs comme parametre pour decire l'etat in situ des depots de sable. La relation peut alors etre simplifiee pour la plupart des jeunes sables propres non cements (ou $I_d < 1,6$) a: $c D_r^2 = Q / 350$ r t L'approche peut etre etendue aux sables silts ($I_d < 2,6$), ou le processus de penetration CPT est draine, en utilisant l'equivalent de sable propre normalise, $Q_{n,cs}$ (voir t_{n,cs} Figure 48 pour les details). $D_r^2 = Q_{n,cs} / 350$ m,cs

[illegible]

incorporer de nombreuses caractéristiques importantes de la réponse du sol. Cependant, les corrélations empiriques basées sur les résultats d'essais de la chambre d'étalonnage et les résultats sur le terrain sont encore les plus utilisées. Robertson et Campanella (1983) ont suggéré une corrélation pour estimer l'angle de frottement maximal ($\phi = 22^\circ$) pour les sables non cimentés, non agglomérés, modérément compressibles, principalement à quartz sur la base des résultats d'essais de la chambre d'étalonnage. Pour les sables dont la compressibilité est plus élevée (c'est-à-dire les sables carbonatés ou à forte teneur en mica), la méthode aura tendance à prévoir des angles de frottement trop bas.

$$\phi = 22^\circ - \left(\frac{q_{t0} - q_{t0c}}{q_{t0c}} \right) \left(\frac{q_{t0c}}{q_{t0c} + 1} \right) \quad (3.1)$$

La relation ci-dessus tend également à prédire des valeurs de c_v et c_s plus proches des valeurs mesurées dans les sables calcaires ou la résistance à la pointe du CPT peut être faible pour des valeurs élevées de q_{t0} , en raison d'une valeur élevée pour c_v . Pour les sols à grains fins, c'est le meilleur moyen de définir l'angle de frottement effectif du pic de contrainte qui est obtenu en laboratoire sur des échantillons non perturbés de haute qualité. Une valeur supposée de $\phi = 26^\circ$ pour les argiles et de 30° pour les limbes est souvent suffisante pour de nombreux projets à faible risque. Pour les conditions plus chargées (c'est-à-dire les plus grandes souches), le module diminuerait (voir la section "Applications").

Figure 32. Évaluation du module de Young drainé ($\alpha \sim 0,1\%$) du CPT pour les jeunes sables de silice non cimentés, $E = 2$ applications ($q_{t0} - q_{t0c}$)

$$E = 0,015 [10 (0,55 q_{t0c} + 1,68)] \quad (3.2)$$

Cone Penetration Test Modulus from Shear Wave Velocity Un avantage majeur du CPT sismique (SCPT) est la mesure supplémentaire de la vitesse d'onde de cisaillement, V_s . La vitesse d'onde de cisaillement est mesurée à l'aide d'une technique de downhole pendant les pauses dans le CPT résultant en un profil continu de V_s . La théorie élastique indique que le module de cisaillement de petite souche, G , peut être déterminé soit de: $G = 2 \rho V_s^2$ ou la méthode d'analyse de la méthode

de cisaillement de petite taille est la suivante: L'analyse de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de l'évolution de
la La plupart des corrélations existantes s'appliquent aux sols à base de silice qui sont jeunes et non cimentés (c'est-à-dire sans liaison). L'application des corrélations empiriques existantes dans les sols qui sont plus anciens et/ou liés peut donner lieu à des interprétations incorrectes. Il est donc important de pouvoir identifier les sols présentant des caractéristiques inhabituelles (c'est-à-dire les sols présentant une microstructure significative). La résistance au cône (q) est une mesure de la résistance du sol à une grande souche de t, et la vitesse de l'onde de cisaillement (V_s) est une mesure de la rigidité du sol de petite souche (G). Robertson (2016) a montré que la combinaison des données V_s mesurées avec les données CPT peut être utilisée pour identifier les sols ayant une microstructure significative, comme le montre la figure 34. La valeur moyenne de G pour les sols d'âge holocène non cimentés, qui représentent la plupart des antécédents de cas de liquéfaction, est d'environ 200. K^* peut également être utilisé pour estimer la quantité de liaison, représentée par une intercepte de G de cohésion, c . L'application des figures 34 et K^* est une méthode plus fiable pour estimer la possibilité de G de microstructure que pour comparer les V_s estimés (à l'aide de la figure 33) avec les V_s mesures.

puisque la base de données utilisée pour développer la figure 33 contenait des dépôts plus anciens de Pleistocène-âge qui avaient probablement une certaine microstructure. Le graphique présenté à la figure 34 peut également être utilisé pour estimer G , et donc V , pour une gamme de sols avec une microstructure différente (ou âge). Ces estimations sont approximatives au mieux, mais peuvent fournir un guide des variations de la perméabilité possible.

SBT	SBT	Gamme de k	SBT	I	n	c	Zone
(m/s)	1	Sensible à grain fin	3×10^{-10} à 3×10^{-8}	NA	2	Sols organiques - argile	1×10^{-10} à 1×10^{-8}
	$I > 3,60$	c	3	Clay	1×10^{-10} à 1×10^{-9}	$2,95 < I < 3,60$	c
	4	Mélange de silt	3×10^{-9} à 1×10^{-7}	$2,60 < I < 2,95$	c	5	Mélange de sable
	1×10^{-7} à 1×10^{-5}	$2,05 < I < 2,60$	c	6	Sable	1×10^{-5} à 1×10^{-3}	$1,31 < I < 2,05$
	c	7	Sable dense à sable	1×10^{-3} à 1	$I < 1,31$	c	8
	*	Tres dense à sol rigide	1×10^{-8} à 1×10^{-3}	NA	9	*	Tres rigide

à partir de la relation de SBT 1×10^{-9} à 1×10^{-7} NA * Surconsolidé et/ou cimenté

Tableau 6 Permeabilité estimée (k) à partir de la relation de SBT 1x2 (1985) ont suggéré 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 légèrement développées de 1 à 1,5 macrofabric, dépôts essentiellement homogènes De macrofabric assez bien à bien développés, 2 à 4 p.ex. argiles sédimentaires avec lentilles discontinues et couches de matériaux plus perméables argiles varvees et autres dépôts contenant 3 à 10 couches perméables intégrées et plus ou moins continues

Tableau 7 Gamme de valeurs de champ possibles de k/k pour les argiles molles h v (modifiée de Jamiolkowski et al., 1985)

61 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Figure 35. 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:

$$T = \frac{r^2}{c_v} \quad \text{ou} \quad I = \frac{G}{s} \quad r = \text{rayon du penetromètre}$$

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

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 : $c = (m/M)^2 r^2 (l)^{0,5} h T r M = 1,15$ pour la position u et le cone de 10cm^2 (c.-a-d. $r = 1,78\text{ cm}$). 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 : $M = 1/m =$

[illegible]

[illegible]

methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la
methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la
methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la
methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la
methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la
methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la
methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la
methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la methode la
methode la methode la En general: 71 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test 2

[illegible]

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de 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 plus de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de Dans les argiles rigides, surconsolidées ($\text{OCR} > 4$), environ
50% de la colonisation peut être due à un tassement immédiat de l'âge de la déformation et à un
tassement secondaire est généralement faible.

Méthodes pour les sols granulaires à grains grossiers, la plupart des méthodes sont basées sur des essais in situ, soit directs, soit par l'estimation d'un module élastique équivalent (E'). Pour la plupart des essais, le lien entre le résultat de l'essai et le module est empirique, puisqu'il dépend de nombreuses variables, p.ex. minéralogie, histoire du stress, état de contrainte, âge, cimentation, etc.

CPT Meyerhof (1974) a suggéré que la colonisation totale, s, pourrait être calculée à l'aide de la formule suivante : Méthode d'influence de la souche sur le sable (Schmertmann, 1970)

Dans cette méthode, le sable est divisé en plusieurs couches, n, d'épaisseur, z, jusqu'à une profondeur inférieure à la base de la base égale à 2B pour une base carrée et 4B pour une base à bandes (longueur de la base, L > 10B). Une valeur de q est attribuée à chaque couche c. Note dans les sols sablonneux $q = \bar{q}$.

La méthode de Schmertmann

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la
concentration de la concentration de la concentration de 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 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 plus la plus la plus la plus la plus la plus la plus la
plus la plus la plus la plus la plus la plus la plus la plus la plus la plus la plus la plus la plus la
plus la concentration de la Il 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'amélioration du sol. Les composantes de la colonisation sont: s = règlement immédiat (distorsion) i

s = règlement de consolidation c s = règlement secondaire dépendant du temps (creux) s

Règlement immédiat Selon la théorie élastique, 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'épaisseur de la couche compressible , c'est-à-dire le mode

de construction non draine , c'est-à-dire la résistance au cisaillement , c'est-à-dire la concentration

du sol , c'est-à-dire la concentration du sol , c'est-a-d. L'approche ci-dessus est plus simple que

l'approche de Schmertmann (1970) qui est limitée à l'utilisation du sol. Lorsqu'on utilise les résultats

du CPT, l'approche ci-dessus peut être appliquée à tous les sols, étant donné que M peut être

estimée pour une large gamme de sols. Pour les structures sensibles à l'établissement, essayer de

minimiser les peuplements différentiels (par exemple, l'aéroport d'Osaka - ajustements mécaniques

dus à des peuplements très importants à long terme). Établissements secondaires Les peuplements

dépendants du temps dépendent de la minéralogie du sol et du degré de charge. Les sols

organiques peuvent avoir un peuplement secondaire élevé. En général, éviter les sols comportant

des peuplements secondaires élevés. Mesri, (1994) a suggéré une approche simplifiée qui relie le

coefficient de consolidation secondaire (C_c) et l'indice de compression, C_r , pour les argiles

inorganiques et les limons, comme suit : $(C_c / C_r) = 0,04 (C_r) C_c (C_r) = 0,1 (C_r) (C_r) = 0,1 (C_r) v$

/M) 1 (C) (C)

(C) (C)

(C) (C)

(C) (C)

(C) (C)

(C) (C) (C) (C) (C) (C) (C) (C) (C) (C) La structure d'un radier peut être optimisée en tenant compte

de l'interaction entre le radier et le sol de support. Les ingénieurs structuraux effectuent

habituellement une analyse élastique à l'aide de ressorts élastiques (Winkler). Par conséquent, ils

aimeraient la constante de ressort, k. s k = coefficient de réaction de sous-grade (kN/m³) s p k = s s

ou: p = contrainte nette appliquée s = tassement résultant d'une contrainte appliquée, p Le

processus est régi par la rigidité relative de la structure et du sol. Le coefficient de réaction de

[illegible]

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 (=) (=) (=) (Burland, 1973), a ete tres utile pour donner un apercu de la performance des pieux. friction laterale de l'unite, $f =$

=====

=====

=====

=====

=====

=====

===== En regle generale, pour les sols cohesifs: 0.25 - 0.32, et $N =$

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 draine, s_u

92 CPT Guide - 2022 CPT Test de penetration des cones (CPT)

frottement lateral unitaire, $f = \frac{1}{2} p_u$ 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 Gianceselli, 1982) La methode de Bustamante et Gianceselli 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 Petration 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 Gianceselli,

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 $0,7q'$ 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 Gianceselli, 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 donnees dans le tableau 14. Facteur de methode de securite (FS) Bustamante et 2.0 (Q) s Gianceselli (1982) 3.0 (Q) b de Ruitter 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

[illegible]

pour l'eau (c') pour l'eau (c') pour l'eau (c') pour l'eau (d) pour l'eau (d)
pour laquelle l'eau) pour l'eau (d) pour l'eau (d) pour l'eau) pour l'eau (d) pour
l'eau (d) pour l'eau (d) pour l'eau (c') pour l'eau) pour l'eau) pour l'eau (d) pour l'une methode
d'une methode d'une methode d'une methode d'une methode d'une methode d'une
methode d'une methode d'une methode d'une methode d'une methode d'une methode d'une
methode d'une methode d'une methode d'une methode d'une methode d'une methode d'une
methode d'une methode d'une methode d'une methode d'une methode d'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 donnees
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 draine. 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 (pipelines, 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 a 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 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 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 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. 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. $2.5 < I < 2.8$), comme l'illustrent les figures 23 et 25 b). Pour les sols B c qui se trouvent dans cette région de transition ou à proximité de celle-ci, des échantillons devraient être obtenus pour vérifier le comportement. 2. Evaluer le déclenchement de la Liquéfaction cyclique

Matériaux semblables à des sables Seed et al., (1985), a mis au point une méthode pour estimer le rapport de résistance cyclique (RRC) pour le sable propre avec des conditions de sol de niveau basé sur le test standard de pénétration (SPT). Le CPT est devenu plus populaire pour estimer le CRR, en raison de la nature continue, fiable et répétable des données (Youd et al., 2001; Robertson, 2009) et maintenant une base de données plus vaste sur l'historique des cas de liquéfaction cyclique. La corrélation de déclenchement du CPT recommandée pour les sols sableux peut être estimée à l'aide des équations simplifiées suivantes suggérées par Robertson et Wride, (1998) :

$$CRR = 93 \left(\frac{Q}{Q_{cs}} \right)^{0,08} \left(\frac{Q}{1000} \right)^{1,5} \quad \text{si } Q > 50 \text{ tn,cs}$$

$$CRR = 0,833 \left(\frac{Q}{Q_{cs}} \right)^{1,5} \quad \text{si } Q < 50 \text{ tn,cs}$$

113 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test

Les observations de terrain ont été basées principalement sur les conditions suivantes : () les dépôts de sable à base d'Holocène, non cimentés à base de silice avec $K < 0,7$ () () le rapport de contrainte cyclique (CSR) est ajusté en fonction de l'amplitude $M = 7.5$ () La valeur de la valeur de la

[illegible]

valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la
 valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la valeur de la 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: $c_n = 0,381 (I) + 0,05 (= \sigma_v / p) - 0,15 c_{vo}$ 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 T_n , c_s 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 echantillonnees 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 effectuee a proximite de certains sondages CPT. Des
 echantillons perturbés B peuvent etre obtenus a l'aide d'echantillonneurs push directs (p. ex., la

figure 1) ou de méthodes de forage/échantillonnage conventionnelles proches du sondage CPT.

117 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Figure 48. Si la méthode de calcul de la CSR doit être appliquée en même temps que la méthode de calcul de la CSR, la méthode de calcul de la CSR peut être utilisée pour calculer Q (ou q) pour estimer CRR. Cela signifie que vous ne devez pas mélanger les méthodes (c'est-à-dire calculer CSR en utilisant une méthode et estimer CRR en utilisant une autre méthode). Ceci s'applique également aux divers «facteurs de correction» utilisés dans chaque méthode. CRR peut également être estimé en utilisant la vitesse de cisaillement normalisée V (Kayen et al, 2013). La combinaison de CPT et de V pour évaluer le potentiel de liquéfaction du sol est très utile et peut être effectuée de manière rentable à l'aide de la CPT sismique (SCPT). V est une petite souche de mesure de la rigidité du sol et est sensible à la résistance à la charge cyclique (CRR), comme l'indique la figure 49, 119 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test, mais peut être utile à la CPT. Dans ce cas de 7.5 120 CPT - 2022 Cone Penetration Test (CPT), la quantité et la cause de la liaison doivent être étudiées pour déterminer si la charge sismique est suffisante pour détruire les liaisons. Par exemple, pour les petits tremblements de terre, l'approche V peut être correcte, mais pour les grands tremblements de terre (qui peuvent détruire les avantages de la liaison) l'approche CPT peut être correcte. Stratigraphie zones de transition Robertson et Campanella (1983) a montré que la résistance à l'extrémité du cône est influencée par le sol devant et derrière l'extrémité du cône. Dans les sols forts/stifs, la zone d'influence est grande (jusqu'à 15 diamètres de cônes) alors que dans les sols mous, la zone d'influence est plutôt petite (aussi petite que 1 diamètre de cône). Ahmadi et Robertson (2005) ont montré 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 à des concentrations élevées 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'élimination des zones de transition (voir exemple à la figure 53).

121 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test Plusieurs méthodes ont été suggérées pour corriger les effets de transition (p. ex. Boulanger et DeJong, 2018) sur la base de méthodes d'inversion.

[illegible]

peuvent être en forme de sable et que la pénétration CPT est essentiellement drainée : Utiliser Robertson et Wride (1998) recommandation basée sur $Q = K Q_{tn, cn}$ ou K est une fonction de I (mise à 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 pénétration CPT est essentiellement non drainée, ou : $RER = 0,053 Q K$ 7,5 tn , 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 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 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

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. CLiq 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
conditions suivantes sont requises: - - -
.
.

.....

.....

.....

..... L'experience a egalement montre que les evenements 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 donnees 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 :

$$Q = Q_{tn,cs} K_{tn,cs} \left(\frac{t_n}{t_{n,cs}} \right)^c$$

Ou, Q est la resistance au cone normalisee de l'equivalent de sable propre (-) et K est un facteur de correction de $t_{n,cs}$ 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

(-----

----- 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 valeurs plus élevées de Q , où les sols sont dilatants à de grandes souches et où la résistance au cisaillement de $t_{n,cs}$ est contrôlée par la résistance drainée. La relation actualisée 138 CPT Guide - 2022 Cone Penetration Test (CPT) a été étendue à des sols transitoires ou $I < 3,0$ en utilisant la K modifiée. Inclus dans la figure 55, où la résistance au cisaillement de t_n , c'est aussi la valeur de l'historique des cas de classe A et B de Robertson (2010), mais mise à jour sur la base des valeurs de Q modifiées et avec des cas enlevés lorsque la concentration de K modifiée est inférieure à la concentration de K , c'est-à-dire qu'il y a lieu d'estimer la concentration de la substance dans le sol. Entre $70 < Q < 80$, les sols $t_{n,cs}$ peuvent être initialement contractifs mais devenir progressivement plus dilatants avec des souches croissantes et le rapport de résistance au cisaillement non drainé peut être élevé mais reste légèrement inférieur au rapport de résistance drainé, défini par $\tan \phi$. La corrélation simplifiée et mise à jour suggérée pour estimer le rapport de résistance liquéfiée non drainée de grande souche, $s /$, pour les sols sableux et transitoires, $u(liq)$ vo lorsque $I < 3,0$ est: $c s / ,0 = 0,0007 \exp(0,084 Q) + 0,3/Q u(liq)$ vo $t_{n,cs} t_{n,cs}$ Quand $Q < 20$, supposons $s /$, mais utilisez $s = 1\text{kPa}$, comme un $t_{n,cs} u(liq)$ vo $u(liq)$ lorsque $, < 50\text{kPa}$. La valeur minimale de 1kPa est représentée par l'état de l'état d'écoulement moyen par la force d'écoulement moyen du sol argileux, si le rapport de résistance à l'écoulement moyen est supérieur à celui de la valeur de l'état d'écoulement 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.

[illegible]

[illegible]

la concentration de la concentration la concentration de concentration de concentration de

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la concentration de la

concentration de la concentration de la concentration de la concentration la concentration la

concentration de En general, des contraintes excessives efficaces croissantes ont tendance à rendre le sol plus argileux et où les données CPT ont tendance à migrer dans la région argileuse sur la carte SBT. Si les sols sont contractifs à 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 ou 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 conviviaux 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-seisme 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 12^e 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, 2^e 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, 4^e édition, BiTech Publishers, Vancouver, C.B. Campanella, R.G., et Robertson, P.K., 1982. État de l'art dans les essais in situ des sols, C.P. 557. A.M., D., et Leroueil, S., 2003. Caractérisation et propriétés techniques des sols naturels, Vol.1, Swets et Zeitlinger, Lisse, pp. 255-360. Idriss, I.M. et Boulanger, R.W., 2004. Procédures semi-empiriques pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction lors des tremblements de terre. Actes 11^e Conférence internationale sur la dynamique des sols et l'ingénierie des tremblements de terre. Berkeley, 32-56. IRTP, 1999. Procédure internationale d'essai de référence pour l'essai de pénétration des cônes (CPT). Rapport du Comité technique de l'ISSMFE sur l'essai de pénétration des sols, TC 16, Institut géotechnique suédois, étude du sol,

[illegible]

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