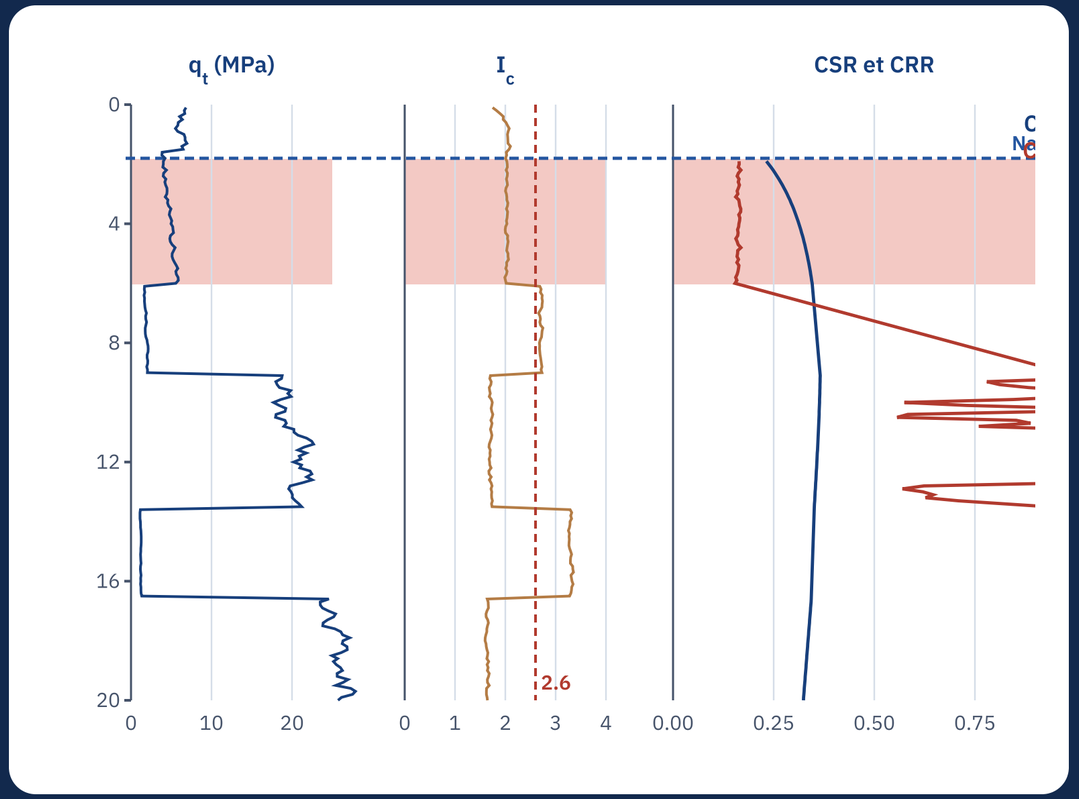
Présentation de cours de géotechnique · Liquéfaction

# Déclenchement de la liquéfaction au CPT

Cours : déclenchement de la liquéfaction par CPT ; une lecture du cône est résolue à la main de bout en bout par deux méthodes (Boulanger–Idriss, Robertson–Wride), les lectures restantes l'étant à l'aide de tableaux.

Données du cône · Ic | Deux méthodes | CSR · CRR · FS | Zones | Résoluble à la main



# Que verrons-nous dans ce cours ?

Détermination, à partir de l'enregistrement du cône ($q_c$, $f_s$, $u_2$), de la **résistance de pointe corrigée $q_t$**, du **rapport de frottement $R_f$** et de l'**indice de comportement du sol $I_c$**

L'**estimation à partir des données du cône** du type de sol, du poids volumique et de la teneur en fines (aucun tableau de couches n'est saisi)

**Deux ensembles complets** : Boulanger–Idriss (2014) et Robertson–Wride (1998, NCEER) ; pour chacun, la normalisation, la courbe CRR, MSF et $K_\sigma$ sont cohérents entre eux

CSR, **FS = CRR/CSR**, lectures écartées, **zones** et épaisseur liquéfiable

Dans un sondage, **une seule lecture (4.00 m) à la main par deux méthodes** ; les autres lectures dans le tableau avec les mêmes étapes

DÉROULÉ DU COURS

Chaque thème est traité en **trois étapes** :

1 · **Théorie** : formule et justification

2 · **Énoncé** : données et à déterminer

3 · **Solution** : étape par étape, avec les valeurs numériques

Exemple : CPT-1 (nappe à 1.80 m ; profondeur de 20 m, intervalle de 5 cm) ; $a_{max}$ = 0.35 g, M = 7.5, rapport d'aire nette a = 0.80, $FS_{req}$ = 1.20.

# $q_t$, $R_f$ et unités

THÉORIE

Le **cône** fournissant un enregistrement quasi continu (intervalle de lecture de 1–5 cm), il n'y a pas de tableau de couches à saisir.

Le type de sol, le poids volumique et la teneur en fines sont estimés **à partir des données du cône**.

Les **conséquences de la liquéfaction** — tassement, étalement latéral, perte de capacité portante — sont hors du champ de cette version.

La résistance de pointe corrigée se calcule par la relation $q_t = q_c + (1 - a)\cdot u_2$, où a est le rapport de surface nette du cône (0.65–0.85 ; valeur courante 0.80).

Dans les argiles molles et les limons où la valeur de $u_2$ est très supérieure à la valeur hydrostatique, la correction est importante, alors qu'elle reste faible dans les sables ; si $u_2$ n'est pas enregistrée, on prend $q_t = q_c$.

$$q_t = q_c + (1 - a)\, u_2 \qquad R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100\,\%$$

# γ à partir du CPT ; deux profondeurs de nappe

THÉORIE

Le poids volumique est estimé à partir des données CPT à chaque lecture ; **$R_f$** est exprimé en % et la valeur est maintenue entre 1.5 $\gamma_w$ et 2.5 $\gamma_w$.

Le poids volumique est intégré à partir de la surface ; à titre d'alternative, deux valeurs constantes sont utilisées : γ au-dessus du niveau de la nappe et $\gamma_{sat}$ en dessous.

La pression interstitielle est supposée hydrostatique à partir du niveau de la nappe ; pour **$C_N$** et **$I_c$**, le niveau de la nappe au moment de l'essai est utilisé, tandis que pour CSR et $K_\sigma$, c'est le niveau de nappe de calcul.

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0.27 \log R_f + 0.36 \log \frac{q_t}{P_a} + 1.236 \qquad \sigma_v = \int \gamma \, dz \qquad u = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_v = \sigma_v - u$$

# $I_c$ et exposant n

THÉORIE

L'indice de comportement du sol est calculé par la relation $I_c$ =[(3.47 – log Q)² + (log F + 1.22)²]^0.5.

L'exposant n vaut 0.5 dans les sables et 1.0 dans les argiles ; il est déterminé par l'itération de Robertson & Wride (1998).

La coupe lithologique des dessins repose sur cette classification ; une séquence plus mince que $h_{min}$ est fusionnée avec sa voisine plus longue.

$$I_c = \left[(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2\right]^{0.5} \qquad Q = \frac{q_t - \sigma_v}{P_a}\left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \qquad F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \times 100\,\%$$

| Plage de $I_c$ | < 1.31 | 1.31 – 2.05 | 2.05 – 2.60 | 2.60 – 2.95 | 2.95 – 3.60 | > 3.60 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sol (Robertson 1990) | graveleux – sable dense | sable : propre – limoneux | mélange de sable | mélange limoneux | argile | organique |

# Quelle lecture est évaluée ?

THÉORIE

Une lecture est prise en compte lorsqu'elle se situe sous le niveau de calcul de la nappe, à une profondeur n'excédant pas $z_{max}$, dans un sol qui se comporte comme un sable.

Les sols dont la valeur $I_c$ est supérieure à $I_{c,lim}$ (par défaut 2.6) sont considérés comme de type argileux ; ces sols sont renvoyés à la vérification du ramollissement cyclique.

La frontière entre comportement sableux et comportement argileux n'est pas nette ; il est recommandé de répéter l'analyse avec $I_{c,lim}$ = 2.4, 2.6 et 2.8.

Pour une mesure dont la résistance de pointe nette $q_t - \sigma_v$ n'est pas positive, l'indice de comportement du sol ne peut pas être défini et la mesure n'est pas évaluée ; les mesures éliminées figurent dans tous les tableaux avec leurs motifs.

# $q_t \rightarrow q_{c1N} \rightarrow q_{c1Ncs}$

THÉORIE

Dans la normalisation de Boulanger & Idriss (2014), l'exposant dépendant du résultat, $C_N$ est déterminé par itération et, dans la relation de m, la valeur de $q_{c1Ncs}$ est maintenue entre 21 et 254.

Dans la relation FC = 80($I_c$ + $C_{FC}$) − 137, $C_{FC}$ est le paramètre d'ajustement de la corrélation entre $I_c$ et la teneur en fines ; 0 correspond à la corrélation générale, et ±0.29 est un écart-type de cette corrélation.

La dispersion de la corrélation étant importante, une valeur de $C_{FC}$ propre au site, déterminée à partir des teneurs en fines mesurées en laboratoire sur des échantillons prélevés dans des sondages voisins des points CPT, est plus appropriée et doit être déterminée séparément pour chaque unité géologique.

$$q_{c1N} = C_N \frac{q_t}{P_a} \qquad C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7 \qquad m = 1.338 - 0.249\, q_{c1Ncs}^{0.264}$$

$$FC = 80\,(I_c + C_{FC}) - 137 \qquad \Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6}\right) \exp\left[1.63 - \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2}\right)^2\right] \qquad q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

# CRR, MSF et $K_\sigma$

THÉORIE

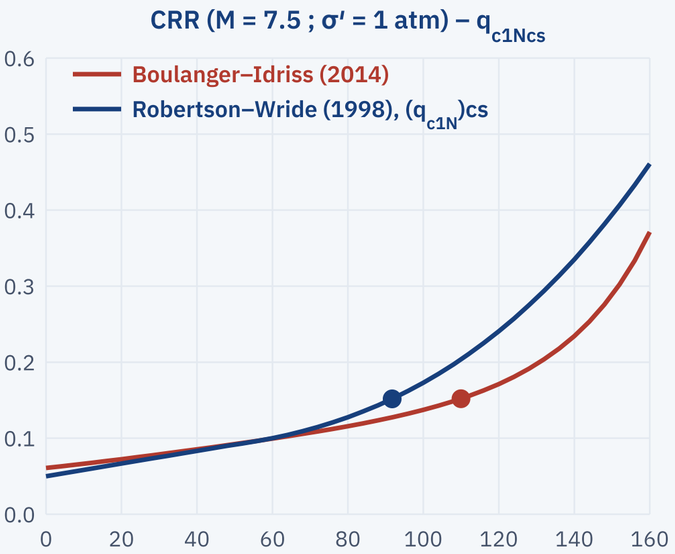
La courbe de résistance de Boulanger & Idriss (2014) est la courbe déterministe donnée dans le rapport ; elle repose sur le 16e percentile des données de cas (constante 2.80).

La courbe CRR(M=7.5; σ′=1) s'obtient à partir de la valeur $q_{c1Ncs}$ ; lorsque $q_{c1Ncs}$ dépasse 211, on prend la valeur 211 car la limite de $C_\sigma$ est atteinte.

$\sigma'_v$ dans la relation de $K_\sigma$ est la contrainte effective correspondant au niveau de calcul de la nappe.

$$CRR_{7.5,1} = \exp\left[\frac{q}{113} + \left(\frac{q}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q}{140}\right)^3 + \left(\frac{q}{137}\right)^4 - 2.80\right] \qquad q = q_{c1Ncs}$$

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1)(8.64e^{-M/4} - 1.325) \qquad MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q}{180}\right)^3 \qquad K_\sigma = 1 - C$$



# $K_c$, CRR et MSF

THÉORIE

La résistance de pointe corrigée est calculée par la relation $(q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N}$ ; $K_c$ dépend de Ic et prend la valeur 1 pour Ic ≤ 1.64.

Pour un sable propre avec 1.64 < Ic < 2.36 et un rapport de frottement inférieur à 0.5 %, $K_c = 1$ est adopté et aucune correction pour la teneur en fines n'est appliquée.

La courbe du sable propre s'arrête à $(q_{c1N})_{cs} = 160$ ; le module prolonge la même relation cubique jusqu'à 250 ($CRR_{7.5} = 1.5$) et signale la lecture.

$$q_{c1N} = C_Q \frac{q_t}{P_a} \quad C_Q = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \le 1.7 \qquad (q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N} \qquad K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88$$

$$CRR_{7.5} = 0.833 \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} + 0.05 \;(< 50) \quad 93 \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000}\right)^3 + 0.08 \;(50 \ldots 160) \qquad MSF = \frac{102.24}{M^{2.56}} \quad K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{f-1}$$

# CSR et relation $r_d$ des deux méthodes

THÉORIE

Le rapport de contrainte cyclique s'exprime par CSR = 0.65 ($\sigma_v/\sigma'_v$) $a_{max}$ $r_d$, où $\sigma_v$ et $\sigma'_v$ sont les contraintes calculées par rapport au niveau de nappe de calcul.

Pour le coefficient de réduction des contraintes $r_d$, la méthode B&I; utilise la relation d'Idriss et la méthode R&W; la relation de Liao–Whitman ; les corrections de magnitude et de contrainte des terres sus-jacentes sont appliquées à la résistance, et non à la sollicitation.

$$CSR = 0.65\,\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\,a_{max}\,r_d \qquad r_d^{BI} = \exp[\alpha + \beta M] \qquad r_d^{RW} = 1.0 - 0.00765z\ (z \le 9.15\ \mathrm{m})$$

| z (m) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 15 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $r_d$ Boulanger–Idriss (M = 7.5) | 0.991 | 0.972 | 0.949 | 0.924 | 0.896 | 0.822 | 0.750 |
| $r_d$ Robertson–Wride | 0.985 | 0.969 | 0.954 | 0.939 | 0.907 | 0.773 | 0.640 |

# FS = CRR / CSR

THÉORIE

Chaque mesure représente la moitié de la distance qui la sépare de la mesure située au-dessus et de celle située au-dessous ; cette distance représentative ne dépasse pas 0.25 m dans l'une ou l'autre direction, ou les 3/4 de l'intervalle de mesure habituel s'il est plus grand.

Une lacune dans l'enregistrement n'est pas extrapolée aux résultats ; il demeure une série non évaluée, désignée « absence de lecture », qui figure dans un avertissement.

Des lectures consécutives ayant le même résultat forment une série ; une série de résultat unique plus mince que $h_{min}$ (valeur par défaut 0.10 m) prend le résultat de sa voisine la plus longue, et les séries voisines de même résultat forment des zones.

Chaque méthode forme un ensemble cohérent ; le coefficient de réduction des contraintes, la normalisation, la correction pour sable propre, les coefficients de magnitude et de contrainte des terres sus-jacentes ainsi que la courbe de résistance sont dérivés conjointement d'une base de données de cas.

Les sources des deux méthodes prescrivent de ne pas mélanger les composantes d'une méthode avec celles de l'autre ; dans le module, le choix de la méthode modifie l'ensemble de ces composantes simultanément.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \qquad \text{FS} < 1 : \text{ se liquéfie} \qquad 1 \leq FS < FS_{req}\,(1.20) : \text{ à la limite}$$

# Énoncé

EXEMPLE

**Données**

| | |
|---|---|
| Lecture | $q_c = 4.956$ **MPa,** $f_s = 46.2$ **kPa,** $u_2 = 21.6$ **kPa ; rapport de section nette** $a = 0.80$ |
| Chantier | **nappe phréatique à** $z_w = 1.80$ **m (même niveau de nappe de calcul) ; poids volumique tiré du CPT (80 lectures de 0 à 4 m)** |
| Séisme | $a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$ ; $C_{FC} = 0$ ; **Robertson–Wride** $f = 0.7$ ; $FS_{req} = 1.20$ |

**À DÉTERMINER**

**$q_t$, $\sigma'_v$, $I_c$** ; avec Boulanger–Idriss et Robertson–Wride, **$q_{c1Ncs}$, CRR, CSR, FS**.

# Solution (1/8)

SOLUTION

**1** Résistance de pointe corrigée et rapport de frottement

$$q_t = q_c + (1-a)u_2 = 4956 + (1-0.80)(21.6) = \mathbf{4{,}960.32}\ \text{kPa}$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100 = \frac{46.2}{4{,}960.32} \times 100 = \mathbf{0.9314}\ \%$$

**2** Poids volumique (Robertson–Cabal)

$$\gamma = (0.27 \log R_f + 0.36 \log \tfrac{q_t}{P_a} + 1.236)\gamma_w = (1.8360)(9.81) = \mathbf{18.01}\ \text{kN/m}^{\mathbf{3}}$$

**3** Contraintes

$$\sigma_v = \sum \tfrac{1}{2}(\gamma_{k-1} + \gamma_k)\Delta z = \mathbf{73.64}\ \text{kPa} \qquad u = 9.81(4.00 - 1.80) = 21.58\ \text{kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 73.64 - 21.58 = \mathbf{52.05}\ \text{kPa}$$

Contrainte verticale effective **σ′v = 52.05 kPa**.

# Solution (2/8)

SOLUTION

**4** Résistance de pointe nette et F

$$q_t - \sigma_v = 4{,}960.32 - 73.64 = \mathbf{4{,}886.68}\ \mathrm{kPa}$$

$$F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \times 100 = \frac{46.2}{4{,}886.68} \times 100 = \mathbf{0.9454}\ \%$$

**5** Itération de l'exposant n (Robertson–Wride) : d'abord n = 1.0 (essai argile)

$$Q = \frac{q_t - \sigma_v}{P_a}\left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^1 = 93.88$$

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log 93.88)^2 + (\log 0.9454 + 1.22)^2} = \mathbf{1.9162} \leq 2.6 \ \Rightarrow\ \text{pas de l'argile}$$

# Solution (3/8)

SOLUTION

**6** on essaie n = 0.5 (sable)

$$Q = 48.2278 \left( \frac{101.325}{52.05} \right)^{0.5} = 67.29$$

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log 67.29)^2 + (\log 0.9454 + 1.22)^2} = \mathbf{2.0312} \leq 2.6 \;\Rightarrow\; n = 0.5$$

**$I_c$ = 2.031** ≤ 2.6 : comportement non argileux, la lecture est évaluée.

# Solution (4/8)

SOLUTION

**7** Teneur en fines ($C_{FC}$ = 0)

$$FC = 80\,(I_c + C_{FC}) - 137 = 80(2.0312) - 137 = \mathbf{25.50\ \%}$$

**8** m et $C_N$ sont interdépendants : itération avec $q_{c1Ncs}$ (x = $q_t/P_a$ = 48.955, $\sigma'_v$ = 52.05)

| Itération | $q_{c1Ncs}$ (entrée) | m | $C_N$ | $q_{c1N} = C_N q_t/P_a$ | $\Delta q_{c1N}$ | $q_{c1Ncs}$ (sortie) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 48.955 | 0.6425 | 1.5341 | 75.100 | 44.128 | 119.227 |
| 2 | 119.227 | 0.4582 | 1.3569 | 66.427 | 42.590 | 109.017 |
| 3 | 109.017 | 0.4788 | 1.3756 | 67.342 | 42.752 | 110.094 |
| 4 | 110.094 | 0.4766 | 1.3736 | 67.242 | 42.734 | 109.977 |
| … | … | … | … | … | … | … |
| 13 | 109.988 | 0.4768 | 1.3738 | 67.252 | 42.736 | 109.988 |

Convergence en 13 itérations : **m = 0.4768, $C_N$ = 1.3738, $q_{c1N}$ = 67.252, $\Delta q_{c1N}$ = 42.736 → $q_{c1Ncs}$ = 109.988**.

# Solution (5/8)

SOLUTION

**9** Résistance de référence (M = 7.5 ; 1 atm), MSF et $K_\sigma$ ($q_{c1Ncs}$ = 109.99)

$$CRR_{7.5,1} = \exp[q/113 + (q/1000)^2 - (q/140)^3 + (q/137)^4 - 2.80] \quad (q = 109.99)$$

$$CRR_{7.5,1} = \exp[-1.8840] = \mathbf{0.1520}$$

$$MSF_{max} = 1.09 + (109.99/180)^3 = 1.3181$$

$$MSF = 1 + (1.3181 - 1)(8.64e^{-7.5/4} - 1.325) = \mathbf{1.0000}$$

$$C_\sigma = 1/(37.3 - 8.27(109.99)^{0.264}) = 0.1150$$

$$K_\sigma = 1 - 0.1150 \ln(52.05/101.325) = \mathbf{1.0766}$$

$CRR_{7.5;1}$ = **0.1520**; MSF = **1.0000**; $K_\sigma$ = **1.0766** → CRR = **0.1636**.

# Solution (6/8)

SOLUTION

**10** Sollicitation ($r_d$ d'Idriss) et coefficient de sécurité

$$r_d = \exp[\alpha + \beta M] = \exp[-0.1971 + 0.0225(7.5)] = 0.9718$$

$$CSR = 0.65\,\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\,a_{max}\,r_d = 0.65\left(\frac{73.64}{52.05}\right)(0.35)(0.9718) = \mathbf{0.3127}$$

$$CRR = CRR_{7.5,1}\cdot MSF\cdot K_\sigma = 0.1520(1.0000)(1.0766) = 0.1636$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0.1636}{0.3127} = \mathbf{0.523}$$

Boulanger–Idriss : **FS = 0.523 < 1**, la liquéfaction est déclenchée.

# Solution (7/8)

SOLUTION

**11** $C_Q$ et $q_{c1N}$ (n = 0.5 identique)

$$C_Q = (P_a/\sigma'_v)^{0.5} = (101.325/52.05)^{0.5} = 1.3952$$

$$q_{c1N} = C_Q \frac{q_t}{P_a} = 1.3952(48.955) = 68.300$$

**12** $K_c$ ($I_c$ = 2.031 : 1.64 < $I_c$ < 2.36 mais F = 0.945 % ≥ 0.5 : la correction de fines S'APPLIQUE)

$$K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88 = \mathbf{1.3430}$$

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c \, q_{c1N} = 1.3430(68.300) = \mathbf{91.727}$$

Dans Robertson–Wride, l'effet des fines est le **multiplicateur $K_c$** (1.343) ; dans Boulanger–Idriss, $\Delta q_{c1N}$ est **ajouté** (+42.7) ; $(q_{c1N})cs$ = 91.73, $q_{c1Ncs}$ = 109.99.

# Solution (8/8)

SOLUTION

**13** Résistance, sollicitation ($r_d$ de Liao–Whitman ; $K_\sigma = 1$ car $\sigma'_v < P_a$) et FS

$$CRR_{7.5} = 93\left(\frac{91.727}{1000}\right)^3 + 0.08 = 0.1518 \qquad MSF = \frac{102.24}{7.5^{2.56}} = 0.9996$$

$$r_d = 1 - 0.00765(4) = 0.9694 \qquad CSR = 0.65\left(\frac{73.64}{52.05}\right)(0.35)(0.9694) = 0.3120$$

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR}\,MSF\,K_\sigma = \frac{0.1518}{0.3120}(0.9996)(1) = \mathbf{0.486}$$

Les deux procédures aboutissent à la même conclusion : **Boulanger–Idriss FS = 0.523**, **Robertson–Wride FS = 0.486** ; l'une et l'autre sont < 1. L'écart provient de la correction pour la teneur en fines et de $r_d$.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

# Énoncé

EXEMPLE

**Données**

| | |
|---|---|
| Sondage | **CPT-1 : 20 m, 400 lectures à 5 cm d'intervalle ; nappe** $1.80$ **m** |
| Méthodes | **Boulanger–Idriss et Robertson–Wride ; chaque lecture est traitée selon les étapes de l'Exemple 1** |

**À DÉTERMINER**

Pour la lecture à chaque mètre : **$q_t$, $R_f$, $I_c$, sol, $\sigma'_v$, $q_{c1Ncs}$, CSR, CRR, FS** (deux méthodes) et le verdict.

# Solution (1/2)

SOLUTION

| z (m) | $q_t$ (MPa) | $R_f$ % | $I_c$ | Sol | $\sigma'_v$ | $q_{c1Ncs}$ (BI) | CSR (BI) | FS (BI) | $(q_{c1N})cs$ (RW) | FS (RW) | Décision (BI / RW) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6.58 | 2.27 | 2.04 | sable | 19.4 | – | – | – | – | – | *au-dessus de la nappe* |
| 2 | 4.02 | 0.93 | 2.04 | sable | 36.0 | 108.4 | 0.238 | 0.691 | 90.1 | 0.626 | Liquéfaction / Liquéfaction |
| 3 | 4.46 | 0.87 | 2.02 | sable | 43.9 | 107.1 | 0.283 | 0.569 | 88.8 | 0.514 | Liquéfaction / Liquéfaction |
| **4** | **4.96** | **0.93** | **2.03** | **sable** | **52.1** | **110.0** | **0.313** | **0.523** | **91.7** | **0.486** | **Liquéfie / Liquéfie** |
| 5 | 5.12 | 0.95 | 2.05 | sable | 60.3 | 109.7 | 0.332 | 0.483 | 90.2 | 0.445 | Liquéfaction / Liquéfaction |
| 6 | 5.57 | 0.84 | 2.02 | sable | 68.6 | 107.2 | 0.346 | 0.445 | 88.4 | 0.415 | Liquéfaction / Liquéfaction |
| 7 | 1.92 | 2.43 | 2.66 | mélange limoneux | 76.4 | – | – | – | – | – | *argileux* |
| 8 | 2.03 | 2.40 | 2.68 | mélange limoneux | 84.3 | – | – | – | – | – | *argileux* |
| 9 | 2.03 | 2.55 | 2.73 | mélange limoneux | 92.3 | – | – | – | – | – | *argileux* |
| 10 | 17.69 | 1.00 | 1.74 | sable | 102.5 | 173.9 | 0.364 | 1.579 | 184.9 | 1.808 | Vérifié / Vérifié |
| 11 | 20.25 | 1.03 | 1.72 | sable | 112.8 | 192.7 | 0.361 | 3.455 | 199.1 | 2.187 | Vérifié / Vérifié |
| 12 | 20.21 | 0.88 | 1.69 | sable | 123.3 | 186.2 | 0.357 | 2.527 | 186.1 | 1.821 | Vérifié / Vérifié |
| 13 | 19.88 | 0.95 | 1.73 | sable | 133.8 | 177.5 | 0.353 | 1.758 | 180.8 | 1.689 | Vérifié / Vérifié |
| 14 | 1.17 | 3.85 | 3.28 | argile | 142.9 | – | – | – | – | – | *argileux* |
| 15 | 1.21 | 3.91 | 3.30 | argile | 150.6 | – | – | – | – | – | *argileux* |
| 16 | 1.22 | 3.91 | 3.33 | argile | 158.3 | – | – | – | – | – | *argileux* |
| 17 | 24.54 | 0.77 | 1.63 | sable | 167.3 | 206.1 | 0.341 | 6.842 | 188.5 | 1.951 | Vérifié / Vérifié |
| 18 | 26.33 | 0.71 | 1.60 | sable | 177.7 | 218.9 | 0.335 | 9.233 | 196.2 | 2.212 | Vérifié / Vérifié |
| 19 | 26.27 | 0.79 | 1.64 | sable | 188.3 | 213.7 | 0.330 | 9.199 | 189.9 | 2.069 | Vérifié / Vérifié |
| 20 | 25.71 | 0.76 | 1.65 | sable | 198.9 | 203.9 | 0.324 | 5.959 | 181.1 | 1.868 | Vérifié / Vérifié |

# Solution (2/2)

SOLUTION

**1** De la lecture à la zone : chaque lecture représente la distance jusqu'aux points médians voisins (au plus 0.25 m) ; les résultats identiques sont regroupés

| Méthode | Zone liquéfiable (m) | Épaisseur (m) | À la limite (m) | FS minimal | z (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| Boulanger–Idriss | 1.83 – 6.03 | **4.20** | 0.00 | 0.445 | 6.00 |
| Robertson–Wride | 1.83 – 6.03 | **4.20** | 0.00 | 0.415 | 6.00 |

Les deux méthodes considèrent comme liquéfiable, au sondage CPT-1, l'intervalle **1.83 – 6.03 m** (4.20 m) ; le FS minimal se situe à 6.0 m dans les deux cas. La ligne à 4.0 m correspond à l'Exemple 1, résolu à la main. La couche de type limon comprise entre 6 – 9 m ($I_C > 2.6$) est assimilée à une argile et éliminée dans les lignes 7 – 9 m.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

# Énoncé

EXEMPLE

**Données**

| | |
|---|---|
| Sondages | **CPT-1 (nappe phréatique 1.80 m), CPT-2 (2.40 m), CPT-3 (3.10 m) ; mêmes paramètres** |
| Comparaison | **chaque méthode avec son propre pack** |

**À DÉTERMINER**

**FS minimal** de chaque sondage, épaisseurs **liquéfiées** et **à la limite**.

# Solution

SOLUTION

| Sondage | NSE (m) | Méthode | FS minimal | z (m) | Zones liquéfiées (m) | Épaisseur (m) | À la limite (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CPT-1 | 1.80 | Boulanger–Idriss | **0.445** | 6.00 | 1.83 – 6.03 | 4.20 | 0.00 |
| | | Robertson–Wride | **0.415** | 6.00 | 1.83 – 6.03 | 4.20 | 0.00 |
| CPT-2 | 2.40 | Boulanger–Idriss | **0.605** | 7.10 | 2.62 – 7.53 | 4.90 | 0.85 |
| | | Robertson–Wride | **0.640** | 7.10 | 2.67 – 7.53 | 4.85 | 0.25 |
| CPT-3 | 3.10 | Boulanger–Idriss | **0.655** | 8.50 | 5.03 – 10.03 | 5.00 | 0.00 |
| | | Robertson–Wride | **0.683** | 8.50 | 5.03 – 10.03 | 5.00 | 0.00 |

Dans chaque sondage, les deux méthodes déclenchent la liquéfaction ; les épaisseurs liquéfiées sont presque identiques (4.2 – 5.0 m). Les différences portent sur les épaisseurs marginales (CPT-2 : 0.85 / 0.25 m) et sur le FS minimal. Le FS minimal est **sensible au bruit** ; l'épaisseur est la valeur la plus stable.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

# Énoncé

EXEMPLE

**Données**

| | |
|---|---|
| Cas de base | **CPT-1 :** $a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$, $I_{c,lim} = 2.6$, $C_{FC} = 0$, **nappe phréatique de calcul = nappe phréatique de l'essai** ($1.80$ **m**) |
| Variables | **un seul à la fois :** $I_{c,lim}$ **2.4 / 2.8 ;** $C_{FC}$ $\mp 0.29$ **;** $a_{max}$ **0.25g / 0.45g ; niveau de la nappe de calcul 1.0 m** |

**À DÉTERMINER**

Le **FS minimal** et l'**épaisseur liquéfiée** de CPT-1 (deux méthodes) ; vérification à la main de FC pour $C_{FC}$.

# Solution (1/2)

SOLUTION

| État | Modification | $FS_{min}$ (BI) | z (m) | Épaisseur (m) | $FS_{min}$ (RW) | z (m) | Épaisseur (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Base | – | 0.445 | 6.00 | **4.20** | 0.415 | 6.00 | **4.20** |
| $I_{c,lim}$ diminue | 2.4 | 0.445 | 6.00 | **4.20** | 0.415 | 6.00 | **4.20** |
| $I_{c,lim}$ augmente | 2.8 | 0.318 | 8.80 | **7.20** | 0.391 | 8.45 | **7.20** |
| $C_{FC}$ | −0.29 | 0.318 | 6.00 | **4.20** | – | – | – |
| $C_{FC}$ | +0.29 | 0.579 | 6.00 | **4.20** | – | – | – |
| $a_{max}$ diminue | 0.25g | 0.624 | 6.00 | **4.20** | 0.582 | 6.00 | **4.20** |
| $a_{max}$ augmente | 0.45g | 0.346 | 6.00 | **4.20** | 0.323 | 6.00 | **4.20** |
| La nappe phréatique de calcul s'élève | 1.0 m | 0.400 | 6.00 | **4.50** | 0.368 | 6.00 | **4.50** |

**$I_{c,lim}$ = 2.8** est la donnée la plus influente : le sable limoneux situé entre 6 et 9 m ($I_c$ 2.6 – 2.8) entre dans le calcul, l'épaisseur liquéfiable passe de 4.2 à **7.2 m** et $FS_{min} \approx 0.32$. $C_{FC}$ n'existe que dans B&I et fait varier FS entre 0.32 et 0.58 ; $a_{max}$ et le niveau de nappe de calcul ne modifient guère l'épaisseur.

# Solution (2/2)

SOLUTION

**1** Effet de $C_{FC}$ sur la teneur en fines à la lecture de l'exemple ($I_c$ = 2.031)

$$C_{FC} = -0.29 : \; FC = 80(2.0312 - 0.29) - 137 = \mathbf{2.30\ \%}$$

$$C_{FC} = 0 : \; FC = 80(2.0312) - 137 = \mathbf{25.50\ \%}$$

$$C_{FC} = +0.29 : \; FC = 80(2.0312 + 0.29) - 137 = \mathbf{48.70\ \%}$$

FC 2.3 → 25.5 → 48.7 % (l'incertitude sur $I_c$ fait fortement varier FC) : la correction pour fines $\Delta q_{c1N}$ est donc incertaine, et un **$C_{FC}$ propre au site** nécessite des teneurs en fines mesurées en laboratoire à proximité du sondage.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Synthèse

# Points à retenir

**Enregistrement du cône** → $q_t = q_c + (1 - a)u_2$, $R_f$, $\gamma$ (d'après le CPT), $\sigma'_v$, $\mathbf{I_c}$ (itération sur n) ; $I_c > 2.6$ : de type argileux, écarté

**Deux jeux de relations** : Boulanger–Idriss ($FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137$, $q_{c1Ncs}$, CRR, MSF, $K_\sigma$) et Robertson–Wride ($K_c$ intervient comme multiplicateur, CRR cubique) ; leurs composantes ne sont pas mélangées

**Exemple (4.00 m)** : $\sigma'_v$ 52.05 kPa, $I_c$ 2.031 ; B&I $q_{c1Ncs}$ 109.99, CRR 0.1636, CSR 0.3127 → **FS 0.523** ; R&W $(q_{c1N})cs$ 91.73, $CRR_{7.5}$ 0.1518, CSR 0.3120 → **FS 0.486**

**Zone** : s'étend jusqu'aux points médians voisins (≤ 0.25 m) ; en dessous de $h_{min} = 0.10$ m, les zones fusionnent ; CPT-1 liquéfiable sur 1.83 – 6.03 m (4.20 m)

**Sensibilité** : $I_{c,lim}$ et $C_{FC}$ sont influents ; le FS minimal est sensible au bruit, l'épaisseur est plus stable ; les résultats concernent le déclenchement uniquement, les conséquences (tassement, étalement latéral) nécessitent un calcul séparé

# Références bibliographiques

Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Report UCD/CGM-14/01, University of California, Davis.

Robertson, P.K., Wride, C.E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 35(3), 442–459.

Youd, T.L., Idriss, I.M. et al. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 127(10), 817–833.

Robertson, P.K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 151–158.

Robertson, P.K., Cabal, K.L. (2010). Estimating soil unit weight from CPT. Proc. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach.

Idriss, I.M. (1999). An update to the Seed–Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential. Proc. TRB Workshop, FHWA-RD-99-165.

Liao, S.S.C., Whitman, R.V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. J. Geotech. Eng., ASCE, 112(3).

Hynes, M.E., Olsen, R.S. (1999). Influence of confining stress on liquefaction resistance. Proc. International Workshop on the Physics and Mechanics of Soil Liquefaction, Balkema.

Idriss, I.M., Boulanger, R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. EERI Monograph MNO-12.

**REMARQUE**

Tous les exemples numériques ont été produits avec le moteur de calcul propre du module ; le module donne les mêmes valeurs. Le projet initial du module est constitué de ces trois sondages ($a_{max}$ = 0.35g, M = 7.5).

GeoTerva

Calculs géotechniques en ligne

# De la théorie à la pratique

Coller ses propres sondages au pénétromètre statique ($q_c$, $f_s$, $u_2$) ou les lire depuis un fichier ; saisir le niveau de la nappe et les paramètres sismiques. Le module fournit, pour chaque lecture, $I_c$, CSR, CRR, FS, les zones, l'épaisseur liquéfiable, les résultats des deux méthodes, la coupe à bandes de couleur, la solution étape par étape et le rapport.

**Ouvrir le module →** **Page de théorie →**

**Ouvrir sur smartphone**
Les modules d'essai ne nécessitent pas d'inscription.

Si vous souhaitez les utiliser dans vos cours : info@geoterva.com