

DYNAMIQUE DES SOLS

Chapitre 3

Mesure des caractéristiques dynamiques des sols

Exercices

Prof. Mohamed KHEMISSA

*Département de Génie Civil, Faculté de Technologie,
Université Mohamed Boudiaf – M'Sila*

Ex. 1 On considère un massif de sable roulé propre et sec possédant les caractéristiques géotechniques suivantes :

- Poids volumique sec $\gamma_d = 17 \text{ kN/m}^3$
- Indice des vides en place $e_o = 0.7$
- Angle de frottement interne effectif $\varphi' = 35^\circ$

Calculer par la méthode de Hardin et Black (1968) le module de cisaillement maximal G_{max} du sable à la profondeur $z = 6 \text{ m}$. Tracer ensuite l'évolution du module de cisaillement avec la distorsion $G(\gamma)$, puis déduire la valeur de G correspondant à une distorsion $\gamma = 0.1\%$. Commenter le résultat trouvé.

Rép. 1

A. Module de cisaillement maximal

- Contrainte moyenne effective :

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_{vo} + 2\sigma'_{ho}}{3} = \frac{1+2K_o}{3} \sigma'_{vo} = \frac{3-2\sin(\varphi')}{3} \sigma'_{vo} \quad | \quad K_o = 1 - \sin(\varphi')$$

avec : $\sigma'_{vo} = \gamma_d z = 17 \times 6 = 102 \text{ kPa}$

D'où :

$$\sigma'_m = \frac{3-2\sin(35)}{3} \times 102 = 62.997 \text{ kPa}$$

- Formule de Hardin et Black (1968) :

$$G_{max} = \frac{6908(2.17-e)^2}{1+e} \sqrt{\sigma'_m} \quad (\text{Sable roulé}) \quad | \quad e = e_o$$

D'où :

$$G_{max} = \frac{6908 \times (2.17-0.7)^2}{1+0.7} \sqrt{62.997} = 69694.4 \text{ kPa} = 69.694 \text{ MPa}$$

B. Evolution du module de cisaillement avec la distorsion

- Contrainte de cisaillement maximale :

$$\tau_{max} = \sqrt{\left[\left(\frac{1+K_o}{2}\right) \sigma'_{vo} \sin(\varphi') + c' \cos(\varphi')\right]^2 - \left[\left(\frac{1-K_o}{2}\right) \sigma'_{vo}\right]^2}$$

avec : $\sigma'_{vo} = \gamma_d z = 17 \times 6 = 102 \text{ kPa}$

$c' = 0$ (Sable)

$K_o = 1 - \sin(35) = 0.426$

D'où :

$$\tau_{max} = \sqrt{\left[\left(\frac{1+0.426}{2}\right) \times 102 \times \sin(35) + 0\right]^2 - \left[\left(\frac{1-0.426}{2}\right) \times 102\right]^2} = 29.717 \text{ kPa}$$

- Module de cisaillement :

$$G(\gamma) = \frac{1}{1+\gamma_r} G_{max} = \frac{G_{max}}{1+\frac{\gamma}{\gamma_r} [1+ae^{-b(\gamma/\gamma_r)}]} \quad | \quad \gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_{max}}$$

avec : $\gamma_r = \frac{29.717}{69694.4} \times 100 = 0.043\%$

$a = -0.5$ (Tableau)

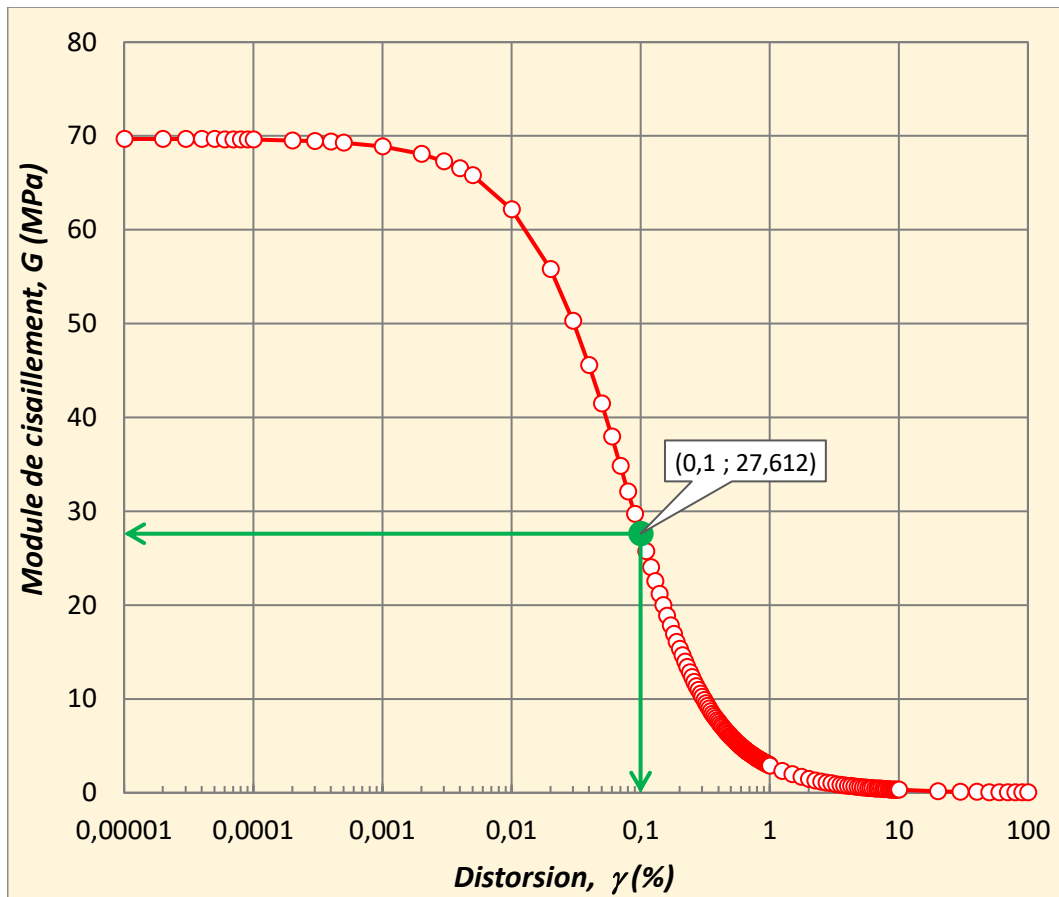
$b = 0.16$ (Tableau)

D'où :

$$G(\gamma) = \frac{69694.4}{1 + \frac{\gamma}{0.043} [1 - 0.5 \times e^{-0.16 \times (\gamma/0.043)}]} \quad (kPa)$$

- Valeur de G correspondant à $\gamma = 0.1\%$:

$$G(\gamma = 0.1\%) = \frac{69694.4}{1 + \frac{0.1}{0.043} [1 - 0.5 \times e^{-0.16 \times (0.1/0.043)}]} = 27612 \text{ kPa} = 27.612 \text{ MPa}$$

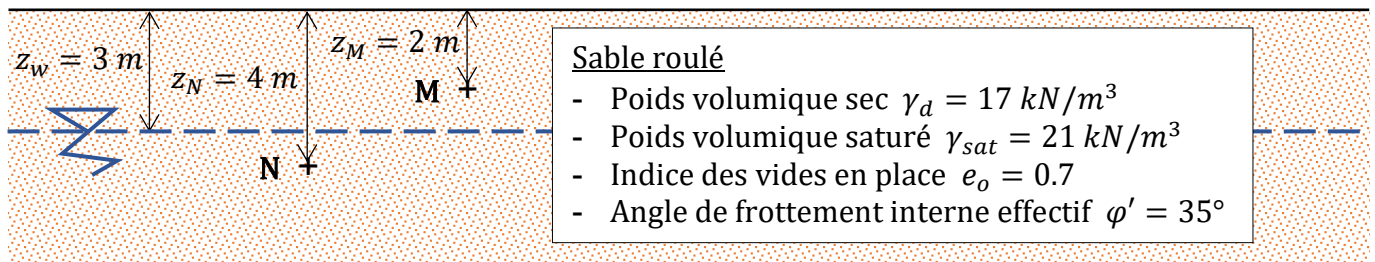


- **Commentaire :**

$$G(\gamma = 0.1\%) = 27.612 \text{ MPa} < G_{max}(\gamma = 0\%) = 69.694 \text{ MPa}$$

⇒ Le module de cisaillement diminue avec la distorsion.

Ex. 2 Considérons le profil de sol représenté ci-après.



Calculer le module de cisaillement maximal G_{max} aux points M et N par la méthode de Hardin et Drnevich (1972), puis déduire les valeurs de la vitesse de cisaillement V_s correspondantes. Commenter les résultats trouvés.

Rép. 2

A. Module de cisaillement maximal

- Contrainte moyenne effective :

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_{vo} + 2\sigma'_{ho}}{3} = \frac{1+2K_o}{3} \sigma'_{vo} = \frac{3-2\sin(\varphi')}{3} \sigma'_{vo} \quad | \quad K_o = 1 - \sin(\varphi')$$

avec :

$$(\sigma'_{vo})_M = \gamma_d z_M = 17 \times 2 = 34 \text{ kPa}$$

$$(\sigma'_{vo})_N = \gamma_d z_w + (\gamma_{sat} - \gamma_w)(z_N - z_w) = 17 \times 3 + (21 - 10) \times (4 - 3) = 62 \text{ kPa}$$

D'où :

$$(\sigma'_m)_M = \frac{3-2\sin(35)}{3} \times 34 = 20.999 \text{ kPa}$$

$$(\sigma'_m)_N = \frac{3-2\sin(35)}{3} \times 62 = 38.292 \text{ kPa}$$

- Formule de Hardin et Drnevich (1972) :

$$G_{max} = K \cdot p_a \cdot F(e) \cdot \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n \quad | \quad F(e) = \frac{1}{0.3+0.7e^2}$$

avec : $K = 600$

$$n = 0.5$$

$$e = e_o = 0.7$$

$$p_a = 100 \text{ kPa}$$

$$F(e = e_o = 0.7) = \frac{1}{0.3 + 0.7 \times 0.7^2} = 1.555$$

D'où :

$$(G_{max})_M = 600 \times 100 \times 1.555 \times \left(\frac{20.999}{100} \right)^{0.5} = 42754.4 \text{ kPa} = 42.754 \text{ MPa}$$

$$(G_{max})_N = 600 \times 100 \times 1.555 \times \left(\frac{38.292}{100} \right)^{0.5} = 57734.5 \text{ kPa} = 57.735 \text{ MPa}$$

- **Commentaire :**

$$(G_{max})_N = 57.735 \text{ MPa} > (G_{max})_M = 42.754 \text{ MPa}$$

⇒ Le module de cisaillement croît avec la profondeur.

B. Vitesse de cisaillement

Elle est donnée par la relation suivante :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad | \quad \rho = \frac{\gamma}{\gamma_w}$$

avec : $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

Soit donc :

$$(V_s)_M = \sqrt{\frac{(G_{max})_M}{\rho_d}} = \sqrt{\frac{(G_{max})_M}{\frac{\gamma_d}{\gamma_w}}} = \sqrt{\frac{42.754 \times 10^3}{\frac{17}{10}}} = 158.586 \text{ m/s}$$

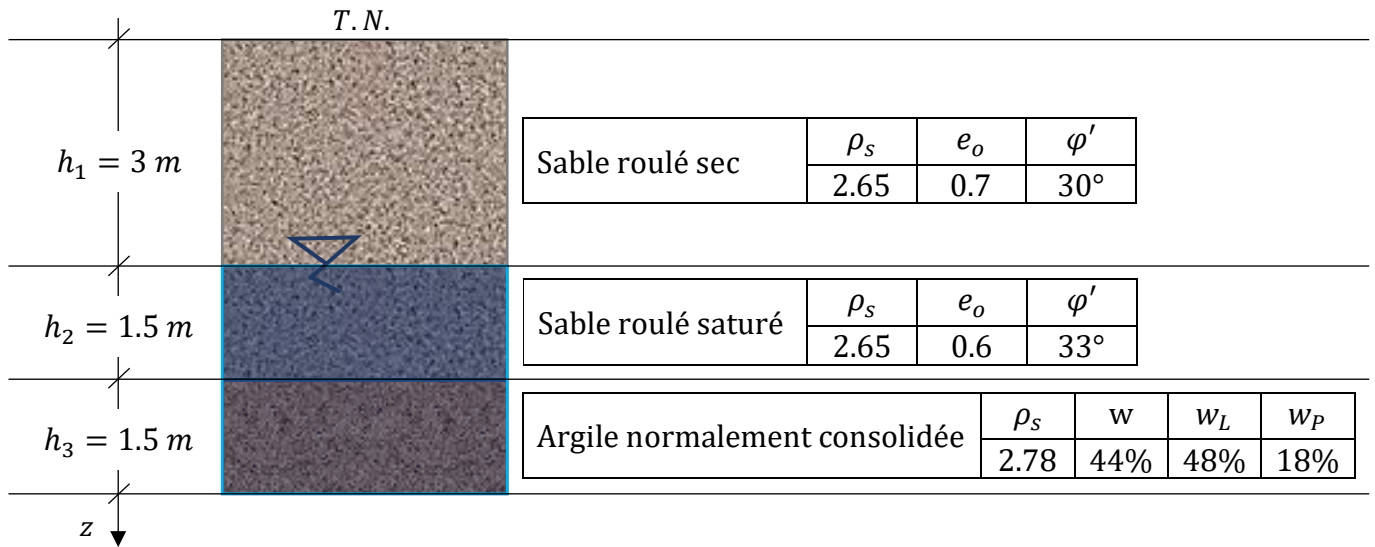
$$(V_s)_N = \sqrt{\frac{(G_{max})_N}{\rho'}} = \sqrt{\frac{(G_{max})_N}{\frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w}}} = \sqrt{\frac{57.735 \times 10^3}{\frac{21 - 10}{10}}} = 229.099 \text{ m/s}$$

Commentaire :

$$(V_s)_N = 229.099 \text{ m/s} > (V_s)_M = 165.810 \text{ m/s}$$

⇒ La vitesse de cisaillement croît, elle aussi, avec la profondeur.

Ex. 3 Considérons le profil ci-après d'un massif constitué de trois couches de sol.



Calculer par la méthode de Hardin et Black (1968) le module de cisaillement maximal G_{max} aux interfaces des couches constituant le massif, puis dessiner la courbe d'évolution de celui-ci en fonction de la profondeur. La nappe se trouve à $z_w = h_1 = 3 \text{ m}$ sous le T.N.

Rép. 3

A. Module de cisaillement maximal

- Couche de sable sec : ($0 \text{ m} \leq z \leq 3 \text{ m}$)

- $z = 0 \text{ m}$ (T.N.)

$$\sigma'_{vo} = 0 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_m = 0 \text{ kPa}$$

$$G_{max} = 0 \text{ MPa}$$

- $z = 3 \text{ m}$

$$e = e_o = 0.7$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{\rho_s \gamma_w}{1+e} = \frac{2.65 \times 10}{1+0.7} = 15.588 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma'_{vo} = \gamma_d h_1 = 15.588 \times 3 = 46.764 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_m = \frac{3-2\sin(\varphi')}{3} \sigma'_{vo} = \frac{3-2\sin(30)}{3} \times 46.764 = 31.176 \text{ kPa}$$

$$G_{max} = \frac{6908(2.17-e)^2}{1+e} \sqrt{\sigma'_m} = \frac{6908 \times (2.17-0.7)^2}{1+0.7} \sqrt{31.176} = 49028.5 \text{ kPa} = 49.0 \text{ MPa}$$

- Couche de sable saturé : ($3 \text{ m} \leq z \leq 4.5 \text{ m}$)

- $z = 3 \text{ m}$

$$\sigma'_{vo} = 46.764 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_m = \frac{3-2\sin(\varphi')}{3} \sigma'_{vo} = \frac{3-2\sin(33)}{3} \times 46.764 = 29.784 \text{ kPa}$$

$$e = e_o = 0.6$$

$$G_{max} = \frac{6908(2.17-e)^2}{1+e} \sqrt{\sigma'_m} = \frac{6908 \times (2.17-0.6)^2}{1+0.6} \sqrt{29.784} = 58079.5 \text{ kPa} = 58.1 \text{ MPa}$$

- $z = 4.5 \text{ m}$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} - \gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} = \frac{(\rho_s - 1)\gamma_w}{1+e} = \frac{(2.65-1) \times 10}{1+0.6} = 10.313 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma'_{vo} = 46.764 + \gamma' h_2 = 46.764 + 10.313 \times 1.5 = 62.234 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_m = \frac{3-2\sin(\varphi')}{3} \sigma'_{vo} = \frac{3-2\sin(33)}{3} \times 62.234 = 39.637 \text{ kPa}$$

$$e = e_o = 0.6$$

$$G_{max} = \frac{6908(2.17-e)^2}{1+e} \sqrt{\sigma'_m} = \frac{6908 \times (2.17-0.6)^2}{1+0.6} \sqrt{39.637} = 67001.1 \text{ kPa} = 67.0 \text{ MPa}$$

- Couche d'argile : ($4.5 \text{ m} \leq z \leq 6 \text{ m}$)

$$e = w_{sat} \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = w_{sat} \frac{\rho_s}{\rho_w} = 0.44 \times \frac{2.78}{1} = 1.223$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} - \gamma_w = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} = \frac{(\rho_s - 1)\gamma_w}{1+e} = \frac{(2.78-1) \times 10}{1+1.223} = 8.007 \text{ kN/m}^3$$

$$I_p = w_L - w_P = 48 - 18 = 30\%$$

$$\Rightarrow I_p < 40\% \Rightarrow K_o^{nc} = 0.4 + 0.007 I_p = 0.4 + 0.007 \times 30 = 0.61$$

$$\Rightarrow k = \frac{0.18+0.30}{2} = 0.24 \quad (\text{Tableau})$$

$$\text{Argile normalement consolidée : } \Rightarrow R_{oc} = 1 \Rightarrow K_o = K_o^{nc} = 0.61$$

- $z = 4.5 \text{ m}$

$$\sigma'_{vo} = 62.234 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_m = \frac{1+2K_o}{3} \sigma'_{vo} = \frac{1+2 \times 0.61}{3} \times 62.234 = 46.053 \text{ kPa}$$

$$G_{max} = \frac{3230(2.97-e)^2}{1+e} (R_{oc})^k \sqrt{\sigma'_m} = \frac{3230 \times (2.97-1.223)^2}{1+1.223} \times (1)^{0.24} \times \sqrt{46.053}$$

$$= 30093.9 \text{ kPa} = 30.1 \text{ MPa}$$

- $z = 6 \text{ m}$

$$\sigma'_{vo} = 62.234 + \gamma' h_3 = 62.234 + 8.007 \times 1.5 = 74.244 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_m = \frac{1+2K_o}{3} \sigma'_{vo} = \frac{1+2 \times 0.61}{3} \times 74.244 = 54.941 \text{ kPa}$$

$$G_{max} = \frac{3230(2.97-e)^2}{1+e} (R_{oc})^k \sqrt{\sigma'_m} = \frac{3230 \times (2.97-1.223)^2}{1+1.223} \times (1)^{0.24} \times \sqrt{54.941}$$

$$= 32869.8 \text{ kPa} = 32.9 \text{ MPa}$$

B. Evolution du module de cisaillement maximal avec la profondeur

- Couche de sable sec : ($0 \text{ m} \leq z \leq 3 \text{ m}$)

$$\sigma'_{vo} = \gamma_d z = 15.588z$$

$$\sigma'_m = \frac{3-2\sin(\varphi')}{3} \sigma'_{vo} = \frac{3-2\sin(30)}{3} \times 15.588z = 10.392z \text{ kPa}$$

$$G_{max} = \frac{6908(2.17-e)^2}{1+e} \sqrt{\sigma'_m} = \frac{6908 \times (2.17-0.7)^2}{1+0.7} \sqrt{10.392z} = 28306.6\sqrt{z} \text{ kPa} = 28.307\sqrt{z} \text{ MPa}$$

- Couche de sable saturé : ($3 \text{ m} \leq z \leq 4.5 \text{ m}$)

$$\sigma'_{vo} = 46.764 + \gamma'(z-3) = 46.764 + 10.313(z-3) \text{ kPa}$$

$$\sigma'_m = \frac{3-2\sin(\varphi')}{3} \sigma'_{vo} = \frac{3-2\sin(33)}{3} \times [46.764 + 10.313(z-3)] = 29.784 + 6.568(z-3) \text{ kPa}$$

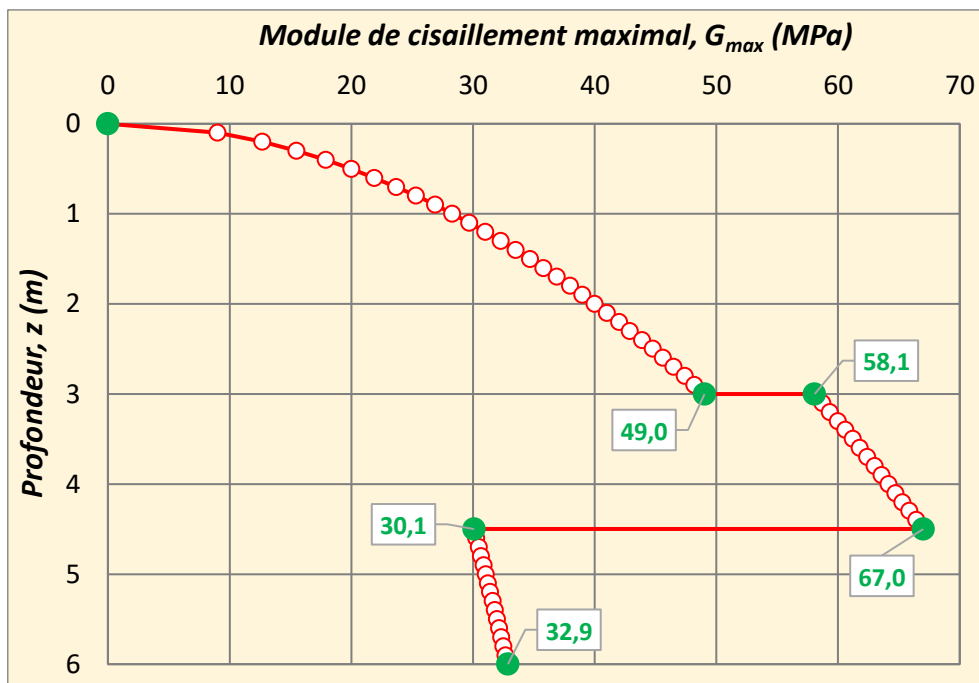
$$\begin{aligned} G_{max} &= \frac{6908(2.17-e)^2}{1+e} \sqrt{\sigma'_m} = \frac{6908 \times (2.17-0.6)^2}{1+0.6} \sqrt{29.784 + 6.568(z-3)} \\ &= 10642.206 \sqrt{29.784 + 6.568(z-3)} \text{ kPa} \\ &= 10.642 \sqrt{29.784 + 6.568(z-3)} \text{ MPa} \end{aligned}$$

- Couche d'argile : ($4.5 \text{ m} \leq z \leq 6 \text{ m}$)

$$\sigma'_{vo} = 62.234 + \gamma'(z-4.5) = 62.234 + 8.007(z-4.5) \text{ kPa}$$

$$\sigma'_m = \frac{1+2K_o}{3} \sigma'_{vo} = \frac{1+2 \times 0.61}{3} \times [62.234 + 8.007(z-4.5)] = 46.053 + 5.925(z-4.5) \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} G_{max} &= \frac{3230(2.97-e)^2}{1+e} (R_{oc})^k \sqrt{\sigma'_m} = \frac{3230 \times (2.97-1.223)^2}{1+1.223} \times (1)^{0.24} \times \sqrt{46.053 + 5.925(z-4.5)} \\ &= 4434.5 \sqrt{46.053 + 5.925(z-4.5)} \text{ kPa} \\ &= 4.435 \sqrt{46.053 + 5.925(z-4.5)} \text{ MPa} \end{aligned}$$



Ex. 4 Les résultats d'un essai triaxial cyclique effectué sur un échantillon d'argile avec une fréquence $f = 700 \text{ Hz}$ ont donné après $N = 50 \text{ cycles}$ une contrainte de cisaillement cyclique maximale $\tau_{max} = 150 \text{ kPa}$. Cette argile a été prélevée à une profondeur $z=3 \text{ m}$ dans un massif argileux homogène saturé. Elle possède les caractéristiques géotechniques suivantes :

- Poids volumique saturé $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$
- Indice des vides initial $e_o = 0.6$
- Indice de plasticité $I_p = 50\%$
- Pression de préconsolidation $\sigma'_p = 60 \text{ kPa}$

Calculer par la méthode de Hardin et Black (1968) le module de cisaillement maximal G_{max} et le coefficient d'amortissement maximal β_{max} . Tracer ensuite l'évolution du module de cisaillement $G(\gamma)$ et celle du coefficient d'amortissement $\beta(\gamma)$ avec la distorsion γ , puis déduire leurs valeurs correspondant à une distorsion $\gamma = 0.1\%$. Commenter les résultats trouvés.

Rép. 4

A. Module de cisaillement maximal

- Contrainte moyenne effective :

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_{vo} + 2\sigma'_{ho}}{3} = \frac{1+2K_o}{3} \sigma'_{vo} \quad | \quad K_o = K_o^{sc} = K_o^{nc} \sqrt{R_{oc}} \quad | \quad R_{oc} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}}$$

avec : $\sigma'_{vo} = \gamma' z = (\gamma_{sat} - \gamma_w)z = (20 - 10) \times 3 = 30 \text{ kPa}$

$$R_{oc} = \frac{60}{30} = 2 > 1 \Rightarrow \text{Argile surconsolidée}$$

$$K_o^{nc} = 0.68 + 0.001(I_p - 40) \quad (40\% < I_p < 80\%)$$

$$\Rightarrow K_o^{nc} = 0.68 + 0.001 \times (50 - 40) = 0.69$$

$$\Rightarrow K_o = K_o^{sc} = K_o^{nc} \sqrt{R_{oc}} = 0.69 \sqrt{2} = 0.976$$

D'où :

$$\sigma'_m = \frac{1+2 \times 0.976}{3} \times 30 = 29.520 \text{ kPa}$$

- Formule de Hardin et Black (1968) :

$$G_{max} = \frac{3230(2.97 - e_o)^2}{1 + e_o} \cdot (R_{oc})^k \cdot \sqrt{\sigma'_m} \quad (\text{Argile})$$

avec : $I_p = 50\% \Rightarrow k = \frac{0.30 + 0.41}{2} = 0.355 \quad (\text{Tableau})$

D'où :

$$G_{max} = \frac{3230(2.97 - 0.6)^2}{1 + 0.6} \times 2^{0.355} \times \sqrt{29.520} = 78795.8 \text{ kPa} = 78.796 \text{ MPa}$$

B. Coefficient d'amortissement maximal

Il est donné par la relation suivante :

$$\beta_{max} = 31 + 1.5\sqrt{f} - 1.5 \log(N) - (3 + 0.03f) \sqrt{\frac{\sigma'_m}{p_a}} \quad (\text{Argile saturée})$$

avec : $p_a = 100 \text{ kPa}$

Soit donc :

$$\beta_{max} = 31 + 1.5\sqrt{700} - 1.5 \log(50) - (3 + 0.03 \times 700) \sqrt{\frac{29.520}{100}} = 0.551 \text{ (55.1\%)}$$

C. Evolution du module de cisaillement avec la distorsion

- Expression : Elle est donnée par la relation suivante :

$$G(\gamma) = \frac{1}{1+\gamma_h} G_{max} = \frac{G_{max}}{1+\frac{\gamma}{\gamma_r} [1+ae^{-b(\gamma/\gamma_r)}]} \quad | \quad \gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_{max}}$$

$$\text{avec : } \gamma_r = \frac{150}{78795.8} \times 100 = 0.19\%$$

$$a = 1 + 0.25 \log(N) = 1 + 0.25 \times \log(50) = 1.425 \text{ (Tableau)}$$

$$b = 1.3 \text{ (Tableau)}$$

D'où :

$$G(\gamma) = \frac{78795.8}{1+\frac{\gamma}{0.19} [1+1.425 \times e^{-1.3 \times (\gamma/0.19)}]} \text{ (kPa)}$$

- Valeur de G correspondant à $\gamma = 0.1\%$:

$$G(\gamma = 0.1\%) = \frac{78795.8}{1+\frac{0.1}{0.19} [1+1.425 \times e^{-1.3 \times (0.1/0.19)}]} = 41370 \text{ kPa} = 41.370 \text{ MPa}$$

- Commentaire :

$$G(\gamma = 0.1\%) = 41.370 \text{ MPa} < G_{max}(\gamma = 0\%) = 78.796 \text{ MPa}$$

⇒ Le module de cisaillement diminue avec la distorsion.

D. Evolution du coefficient d'amortissement avec la distorsion

- Expression : Elle est donnée par la relation suivante :

$$\beta(\gamma) = \frac{\gamma_h}{1+\gamma_h} \beta_{max} \quad | \quad \gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_r} [1 + ae^{-b\gamma/\gamma_r}]$$

$$\text{avec : } \gamma_r = 0.19\%$$

$$a = 1 + 0.2\sqrt{f} = 1 + 0.2\sqrt{700} = 6.292 \text{ (Tableau)}$$

$$b = 0.2f e^{-\sigma'_m/p_a} + 2.25 \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right) + 0.3 \log(N) \text{ (Tableau)}$$

$$= 0.2 \times 700 \times e^{-29.520/100} + 2.25 \times \left(\frac{29.520}{100} \right) + 0.3 \times \log(50) = 105.387$$

D'où :

$$\beta(\gamma) = \frac{\frac{\gamma}{0.19} [1+6.292 \times e^{-105.387 \times \gamma/0.19}]}{1+\frac{\gamma}{0.19} [1+6.292 \times e^{-105.387 \times (\gamma/0.19)}]} \times 55.1 \text{ (\%)}$$

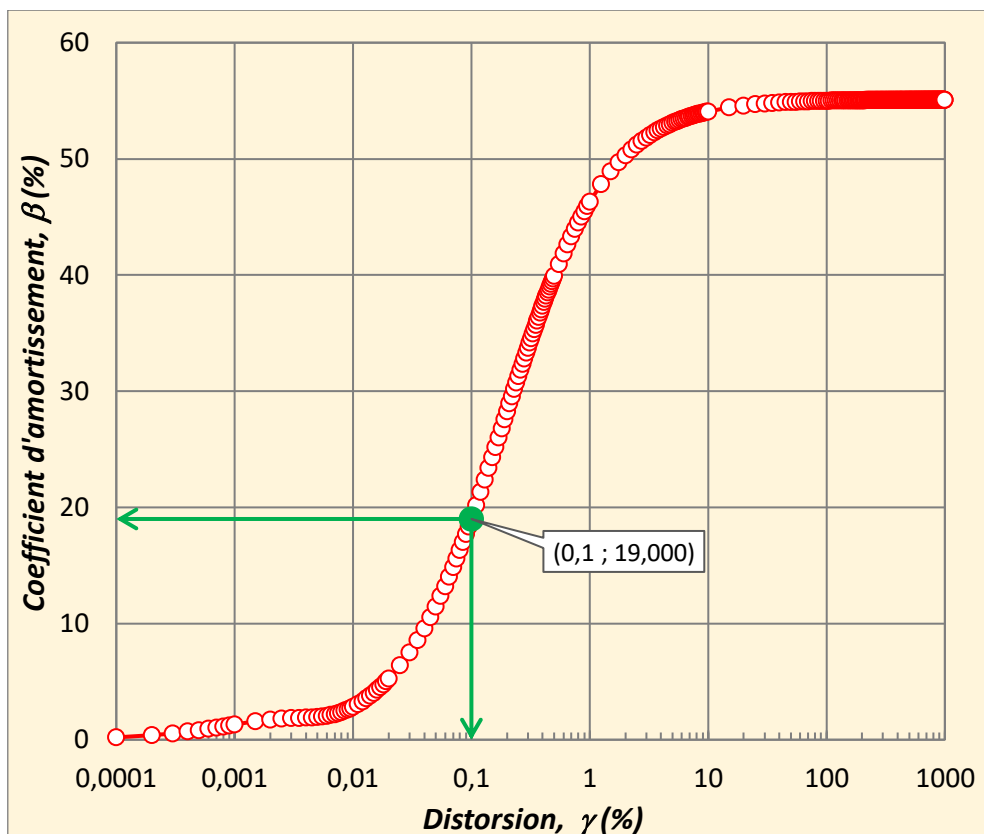
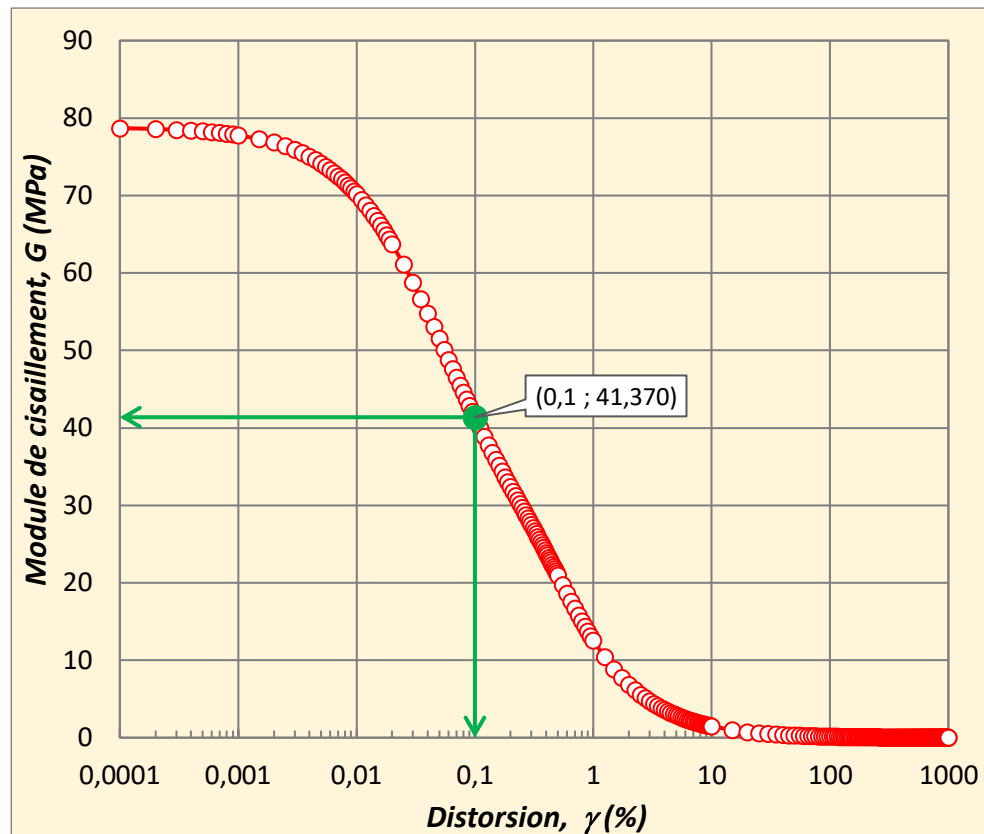
- Valeur de β correspondant à $\gamma = 0.1\%$:

$$\beta(\gamma = 0.1\%) = \frac{\frac{0.1}{0.19} [1+6.292 \times e^{-105.387 \times 0.1/0.19}]}{1+\frac{0.1}{0.19} [1+6.292 \times e^{-105.387 \times (0.1/0.19)}]} \times 55.1 = \frac{0.526}{1+0.526} \times 55.1 = 0.190 \text{ (19.0\%)}$$

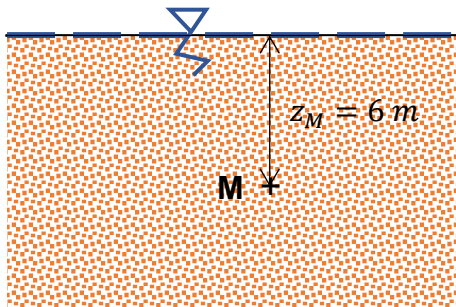
- Commentaire :

$$\beta_{max} = \beta(\gamma \nearrow \infty) = 55.1\% > \beta(\gamma = 0.1\%) = 19.0\%$$

⇒ Le coefficient d'amortissement augmente avec la distorsion.



Ex. 5 (Interro. du 17/05/2022). Considérons le profil de sol sableux roulé suivant :



Sable roulé

- Poids volumique saturé $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$
- Angle de frottement interne effectif $\varphi' = 30^\circ$
- Indice des vides en place $e_o = 0.8$
- Densité relative $D_r = 40\%$
- Accélération de la pesanteur $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Calculer au point M le module de cisaillement maximal G_{max} par les méthodes de Hardin et Black (1968), Hardin et Drnevich (1972) et Seed et Idriss (1970), puis commenter les résultats trouvés.

Rép. 5

5.1 Contrainte moyenne effective

$$\sigma'_m = \frac{3-2\sin(\varphi')}{3} \sigma'_{vo} \quad | \quad \sigma'_{vo} = (\gamma_{sat} - \gamma_w)z_M = (20 - 1 \times 9.81) \times 6 = 61.14 \text{ kPa}$$

$$\Rightarrow \sigma'_m = \frac{3-2\sin(30)}{3} \times 61.14 = 40.76 \text{ kPa}$$

5.2 Module de cisaillement maximal

• **Méthode de Hardin et Black (1968)**

$$G_{max} = \frac{6908(2.17-e)^2}{1+e} \sqrt{\sigma'_m} \quad (\text{Sable roulé}) \quad | \quad e = e_o = 0.8$$

$$\Rightarrow G_{max} = \frac{6908 \times (2.17-0.8)^2}{1+0.8} \times \sqrt{40.76} = 45987.3 \text{ kPa} = 45.987 \text{ MPa}$$

• **Méthode de Hardin et Drnevich (1972)**

$$G_{max} = K \cdot p_a \cdot F(e) \cdot \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n$$

avec :

- $K = 600$
- $n = 0.5$
- $F(e) = \frac{1}{0.3+0.7e^2} = \frac{1}{0.3+0.7 \times 0.8^2} = 1.337$
- $p_a = 100 \text{ kPa}$

$$\Rightarrow G_{max} = 600 \times 100 \times 1.337 \times \sqrt{\frac{40.76}{100}} = 51215.3 \text{ kPa} = 51.215 \text{ MPa}$$

• **Méthode de Seed et Idriss (1970)**

$$G_{max} = 218.82 \cdot K_{2max} \sqrt{\sigma'_m} \quad | \quad K_{2max} = K_{2max}(D_r = 40\%) = 40 \quad (\text{Tableau})$$

$$\Rightarrow G_{max} = 218.82 \times 40 \times \sqrt{40.76} = 55881.0 \text{ kPa} = 55.881 \text{ MPa}$$

- **Commentaire :** Résultats concordants d'une méthode à l'autre.