

Chapitre Trois

Mesure des caractéristiques dynamiques des sols

- ❑ *Introduction*
- ❑ *Synthèse sur les essais cycliques*
- ❑ *Essais de laboratoire*
- ❑ *Essais in-situ*
- ❑ *Corrélations*
- ❑ *Exercices*



INTRODUCTION

□ Introduction

- **Définition**

Les caractéristiques dynamiques des sols se résument en deux paramètres :

- Le module de cisaillement maximal G_{max}
- Le coefficient d'amortissement maximal β_{max}

Ces deux paramètres, caractéristiques de la plupart des modèles de calculs dynamique des ouvrages, peuvent être identifiés en place ou en laboratoire ou tout simplement à partir de corrélations avec certains paramètres bien connus en géotechnique.

- **Méthodes d'identification**

On distingue trois méthodes d'identification différentes, mais complémentaires :

- Identification en laboratoire : **Essais de laboratoire**
- Identification en place : **Essais in-situ**
- Identification empirique par corrélation : **Corrélations**

Chacune de ces méthodes possède des avantages et des inconvénients. On se forcera tout de même de retenir les valeurs représentatives du sol étudié.

□ Introduction

- **Essais de laboratoire**

- Essai de cisaillement direct cyclique
- Essai triaxial cyclique
- Essai triaxial de torsion cyclique sur cylindre creux
- Essais à la colonne résonante
- Essais aux ultrasons



- **Essais in-situ**

- Essai sismique réfraction
- Essai sismique réflexion
- Essais Cross Hole, Up Hole et Down Hole



- **Corrélations**

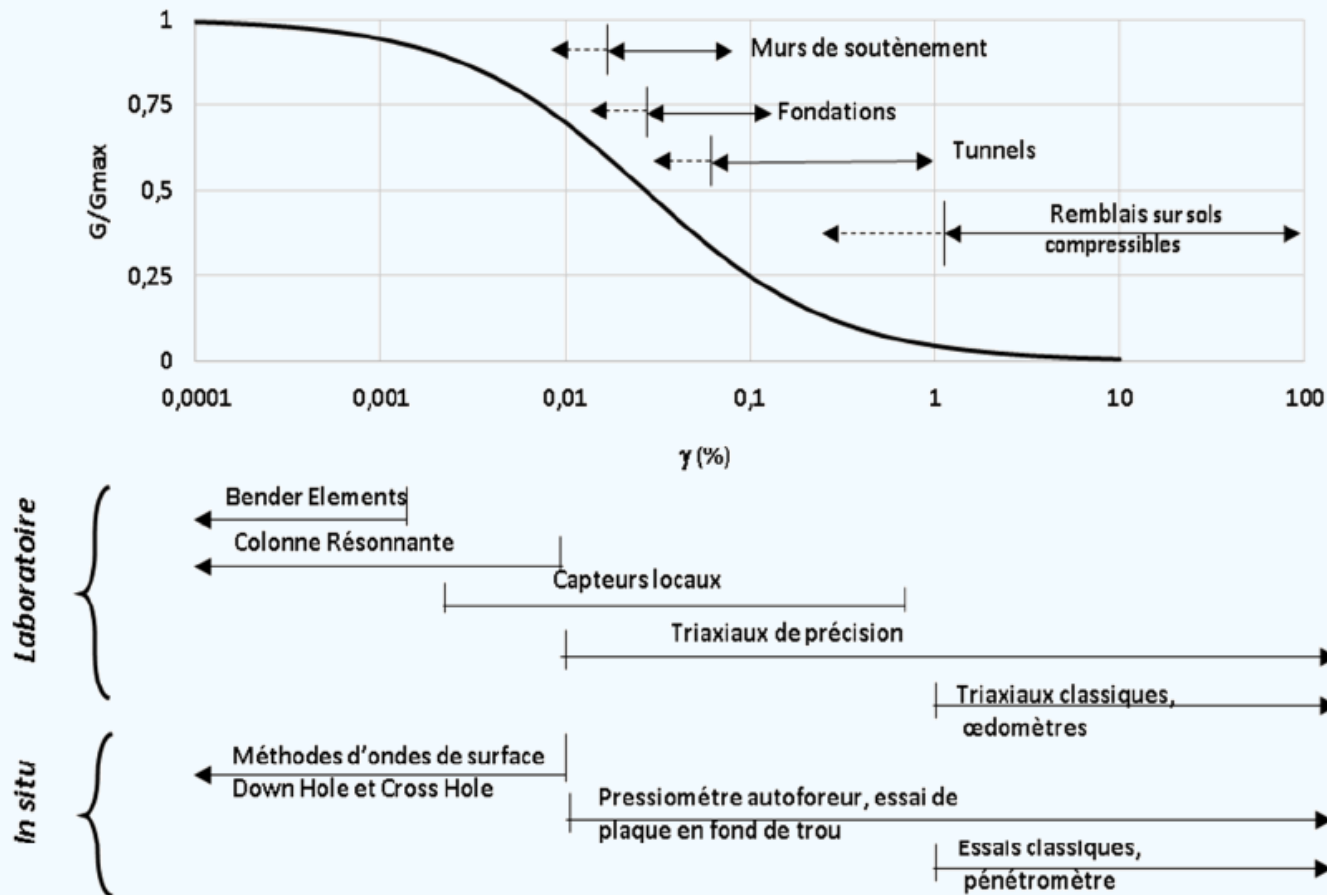
- Relations de Hardin et Black (1968)
- Relations de Hardin et Drnevich (1972)
- Relations de Seed et Idriss (1970)



SYNTHÈSE SUR LES ESSAIS CYCLIQUES

❑ Synthèse sur les essais cycliques

- **Essais adaptés à la mesure du module de cisaillement cyclique**



Reiffsteck (2018)

❑ Synthèse sur les essais cycliques

- **Intervalles de variation des distorsions**

Essais	Distorsion γ (%)
<i>Essais in – situ</i>	$10^{-7} - 10^{-5}$
<i>Essais de résonance</i>	$10^{-6} - 10^{-4}$
<i>Essais de cisaillement direct et triaxial</i>	$10^{-4} - 10^{-1}$



Compression – Torsion



Torsion pure



Extension – Torsion

Séismes	$0.9 \times 10^{-5} - 0.3 \times 10^{-2}$
----------------	---

ESSAIS DE LABORATOIRE

❑ Essais de laboratoire

- **Essai de cisaillement direct cyclique**

- ❖ **Principe :** L'essai consiste à soumettre l'éprouvette de sol confinée à des cycles de cisaillement alternés jusqu'à la rupture de celui-ci. L'essai s'effectue à l'aide d'une boîte de cisaillement asservie en déplacement.



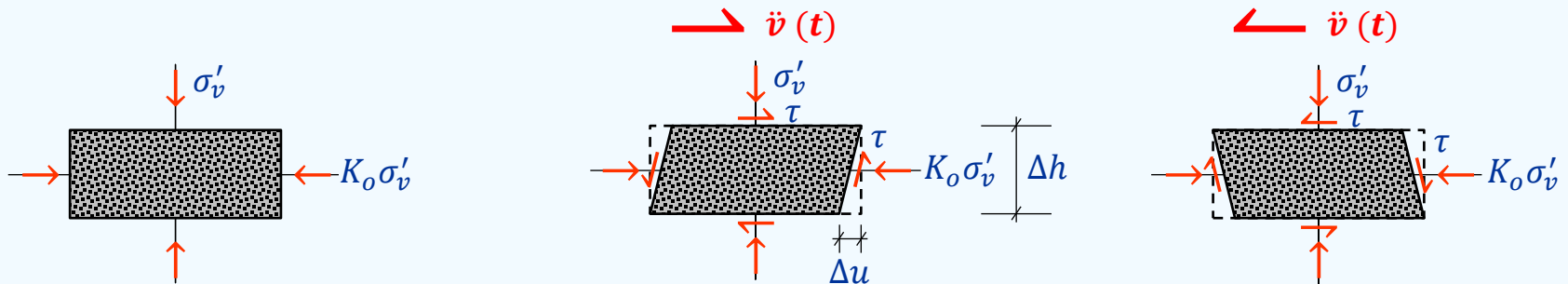
Boîte de cisaillement

*Laboratoire pédagogique,
Département de Génie-Civil, Université de M'Sila*

❑ Essais de laboratoire

• **Essai de cisaillement direct cyclique**

❖ Séquences de cisaillement cyclique



Mise en confinement

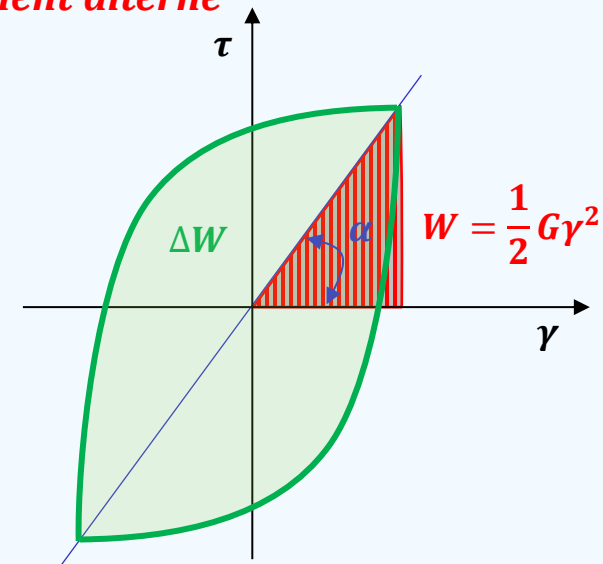
Cisaillement alterné

❖ Paramètres

➤ **Distorsion :** $\gamma = \frac{\Delta u}{\Delta h}$

➤ **Module de cisaillement :** $G = \tan(\alpha)$

➤ **Coefficient d'amortissement :** $\beta = \frac{\Delta W}{4\pi W}$



❑ Essais de laboratoire

- **Essai de cisaillement direct cyclique**

- ❖ Exemple : Cisaillement cyclique de l'interface sable-plaque métallique *

➤ *Materials tested*

A/ Fill: Dune sand (dry, clean and uniformly well graded)

Parameters	Values
Specific unit weight: γ_s (kN/m^3)	26.5
Minimum dry unit density: $(\rho_d)_{min}$	1.5
Maximum dry unit density: $(\rho_d)_{max}$	1.73
Coefficient of uniformity: $C_u = D_{60}/D_{10}$	2.33
Coefficient of curvature: $C_c = D_{30}^2/(D_{10} \times D_{60})$	1.13
Over to: $D = mm$ (%)	98.57
Over to: $D = 0.08 mm$ (%)	4.17

* Khemissa M., Tallah N., Barkat D. (2018). *Sand-steel interface behaviour under cyclic loading*. Proceedings of the 1st Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG), Hammamet, Tunisia, A. Kallel et al. (eds), Springer, pp. 223-226.
https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-01665-4_52

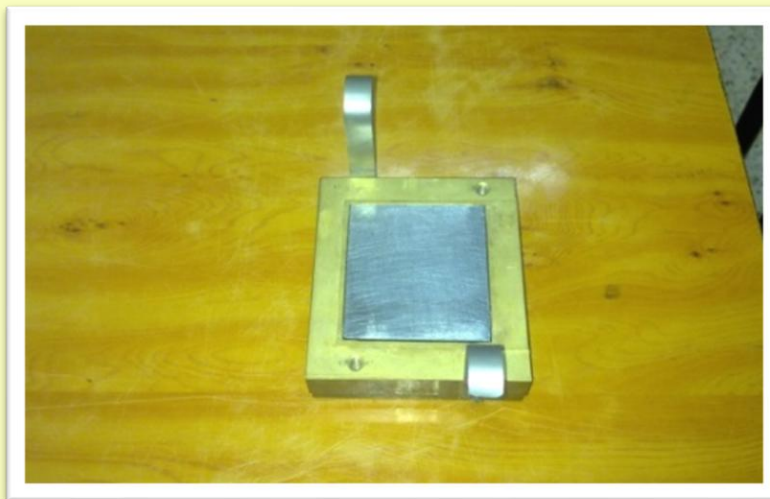
❑ Essais de laboratoire

- **Essai de cisaillement direct cyclique**

- ❖ Exemple : Cisaillement cyclique de l'interface sable-plaque métallique *

➤ *Materials tested*

B/ Plates: *Galvanized steel (Yield stress: $\sigma_e = 240$ MPa)*



Smooth steel plate



Rough steel plate

Smooth and rough steel plates placed in the lower fixed half box to simulate Soil-Structure Interaction

* Khemissa M., Tallah N., Barkat D. (2018). *Sand-steel interface behaviour under cyclic loading*. Proceedings of the 1st Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG), Hammamet, Tunisia, A. Kallel et al. (eds), Springer, pp. 223-226.
https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-01665-4_52

❑ Essais de laboratoire

- **Essai de cisaillement direct cyclique**

- ❖ Exemple : Cisaillement cyclique de l'interface sable-plaque métallique *

➤ *Experimental program realized*

- *Direct shear tests: performed under cyclic loading*
- *Sand compactness: loose ($I_D=0.15$) and dense ($I_D=0.90$) sand*
- *Applied normal stress: 100 kPa*
- *Shear amplitude: ± 2 cm*
- *Number of cycles: 20*

➤ *Test results obtained*

- *Loose and dense sand with smooth plate interface*
- *Loose and dense sand with rough plate interface*

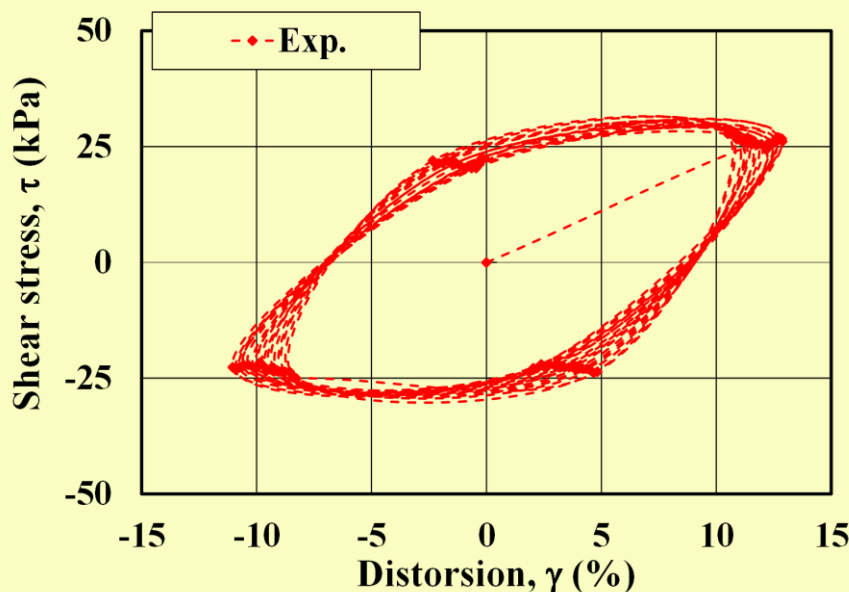
* Khemissa M., Tallah N., Barkat D. (2018). *Sand-steel interface behaviour under cyclic loading*. Proceedings of the 1st Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG), Hammamet, Tunisia, A. Kallel et al. (eds), Springer, pp. 223-226.
https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-01665-4_52

❑ Essais de laboratoire

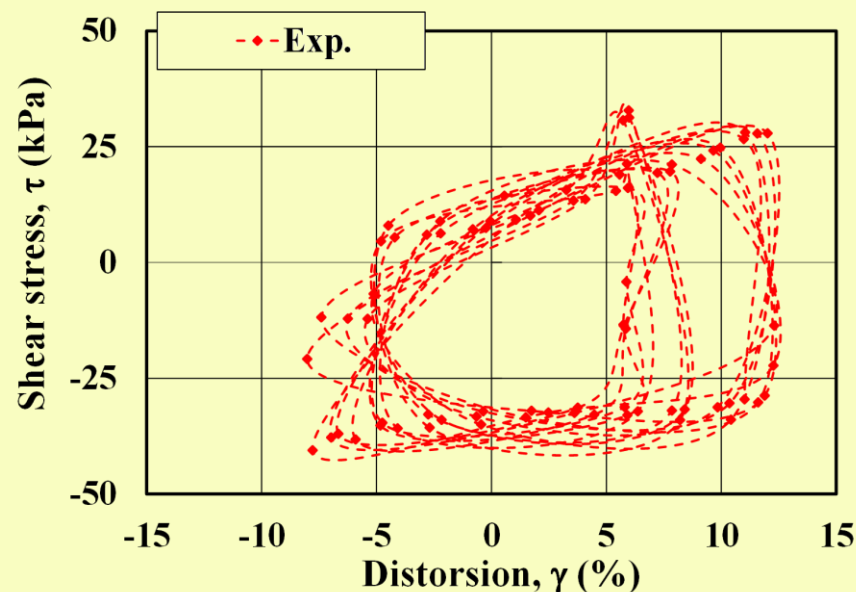
• **Essai de cisaillement direct cyclique**

❖ Exemple : Cisaillement cyclique de l'interface sable-plaque métallique *

➤ *Cyclic shear curves: Sand - Smooth plate*



Loose sand



Dense sand

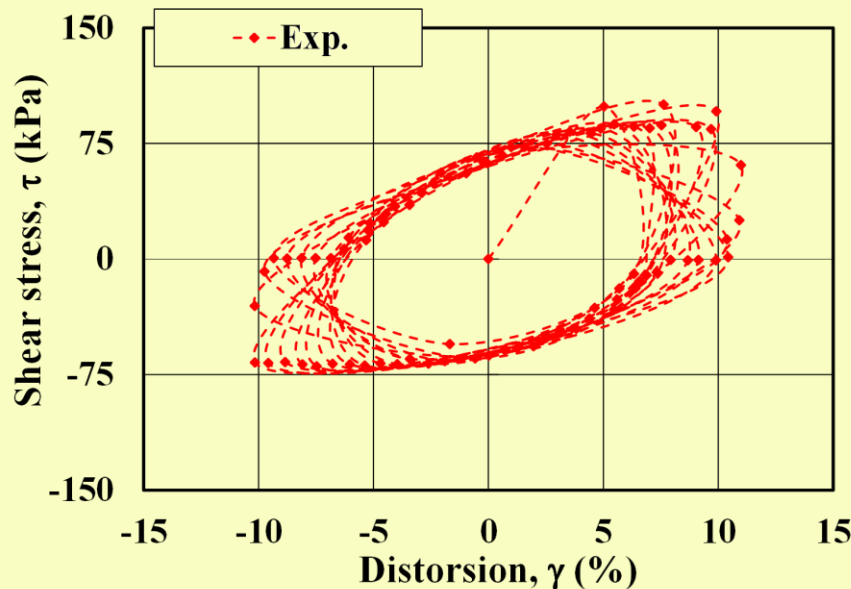
* Khemissa M., Tallah N., Barkat D. (2018). Sand-steel interface behaviour under cyclic loading. Proceedings of the 1st Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG), Hammamet, Tunisia, A. Kallel et al. (eds), Springer, pp. 223-226.
https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-01665-4_52

❑ Essais de laboratoire

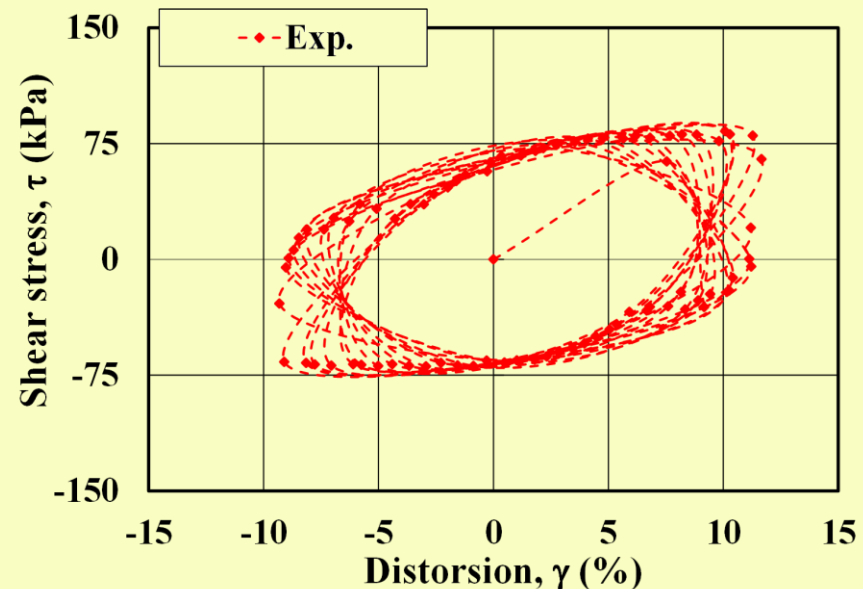
• **Essai de cisaillement direct cyclique**

❖ Exemple : Cisaillement cyclique de l'interface sable-plaque métallique *

➤ *Cyclic shear curves: Sand - Rough plate*



Loose sand



Dense sand

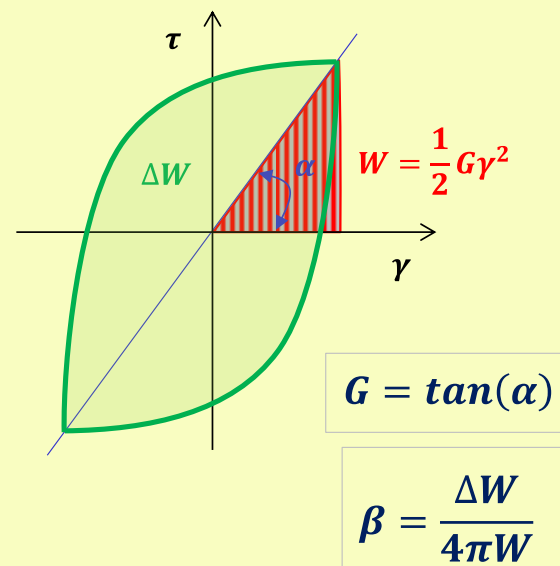
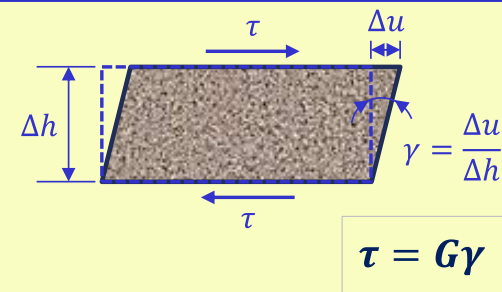
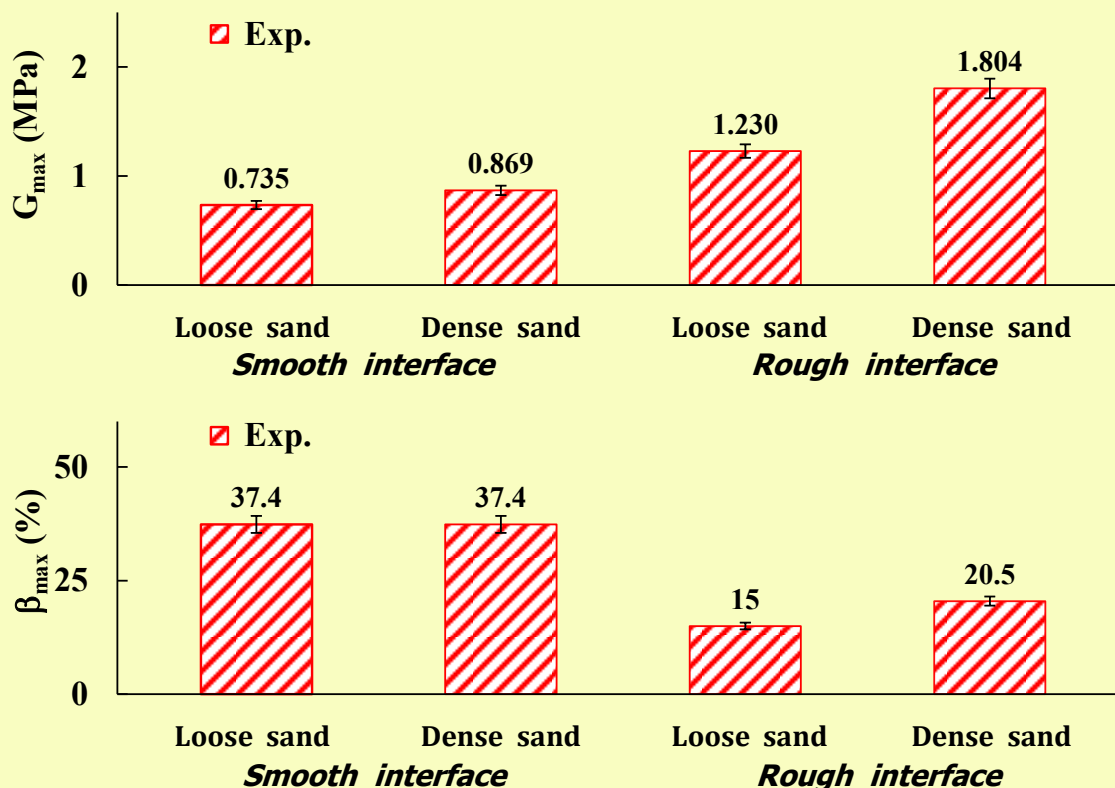
* Khemissa M., Tallah N., Barkat D. (2018). Sand-steel interface behaviour under cyclic loading. Proceedings of the 1st Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG), Hammamet, Tunisia, A. Kallel et al. (eds), Springer, pp. 223-226.
https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-01665-4_52

❑ Essais de laboratoire

• **Essai de cisaillement direct cyclique**

❖ Exemple : Cisaillement cyclique de l'interface sable-plaque métallique *

➤ *Cyclic shear behavior parameters*



* Khemissa M., Tallah N., Barkat D. (2018). *Sand-steel interface behaviour under cyclic loading*. Proceedings of the 1st Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG), Hammamet, Tunisia, A. Kallel et al. (eds), Springer, pp. 223-226.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-01665-4_52

❑ Essais de laboratoire

- **Essai de cisaillement direct cyclique**

- ❖ Exemple : Cisaillement cyclique de l'interface sable-plaque métallique *

➤ *Synthesis*

- *The cyclic shear curves have almost similar shapes for each state of sand compactness, and for each form of steel roughness.*
- *They describe a behavior characterized by an increase of the interface shear strength (highlighted of the friction mobilization by adherence between the sand and the steel plate).*
- *The maximum shear modulus G_{max} is higher for dense sand than for loose sand, and more with smooth interface than with rough interface.*
- *The maximum damping ratio β_{max} is higher for smooth interface than for rough interface, and more for dense sand than for loose sand.*

* Khemissa M., Tallah N., Barkat D. (2018). *Sand-steel interface behaviour under cyclic loading*. Proceedings of the 1st Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG), Hammamet, Tunisia, A. Kallel et al. (eds), Springer, pp. 223-226.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-01665-4_52

❑ Essais de laboratoire

- **Essai triaxial cyclique** (Séquences de chargement - déchargement)



❑ Essais de laboratoire

- **Essai triaxial cyclique** (Séquences de chargement - déchargement)



JF Serratrice
CETE Méditerranée

❑ Essais de laboratoire

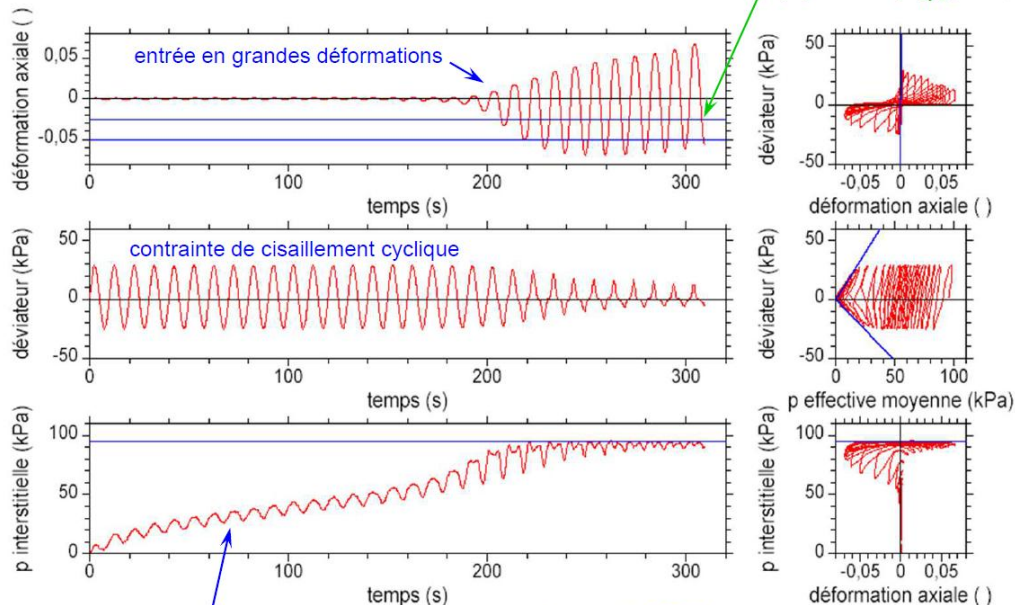
• **Essai triaxial cyclique (Séquences de chargement - déchargement)**

Résistances cycliques des sables

✓ Sols sableux dans leur état naturel

- Essai triaxial cyclique non drainé CU
- Exemple d'un sable lâche

critères de rupture
(liquéfaction) $\epsilon_{ay SA} = -2,5 \%$



Journées Techniques
Gestion des risques hydrologiques
et des ouvrages fluviaux
18 et 19 novembre 2014 - Aix en Provence

Calcul de la stabilité
des ouvrages sous séisme

- Calculs de stabilité par blocs
- Essais cycliques en laboratoire

JF Serratrice

❑ Essais de laboratoire

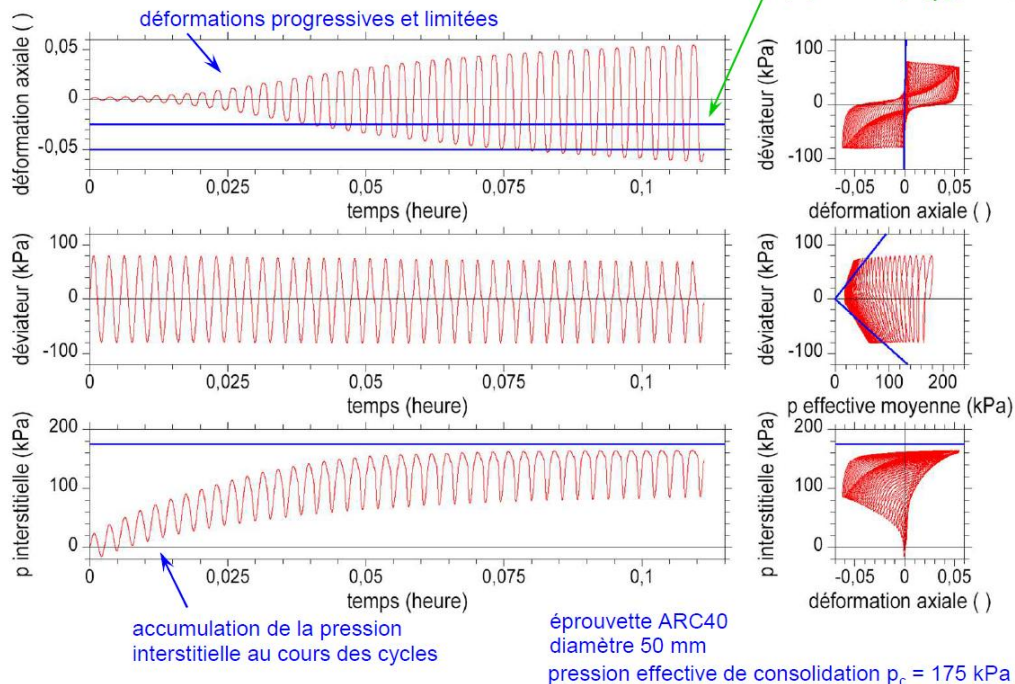
• **Essai triaxial cyclique (Séquences de chargement - déchargement)**

Résistances cycliques des argiles

✓ Sols argileux dans leur état naturel

- Essai triaxial cyclique non drainé CU
- Exemple d'une argile molle

critères de rupture
(liquéfaction) $\epsilon_{ay SA} = -2,5 \%$



❑ Essais de laboratoire

- ***Essai triaxial de torsion cyclique sur cylindre creux***

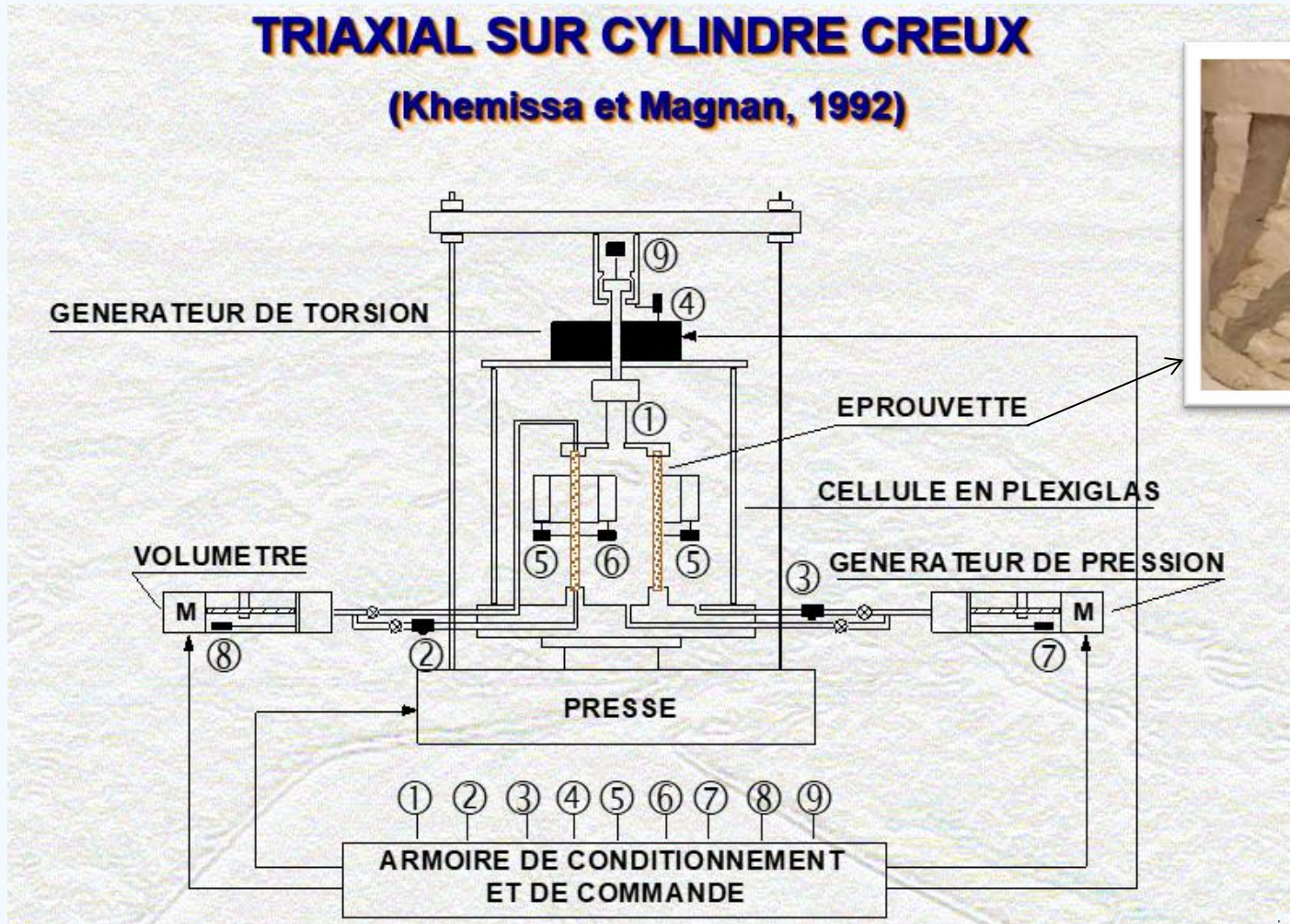


Cylindre creux asservi via LeCroy 3500, LCPC, France (M. Khemissa, 1992)



❑ Essais de laboratoire

- **Essai triaxial de torsion cyclique sur cylindre creux**



❑ Essais de laboratoire

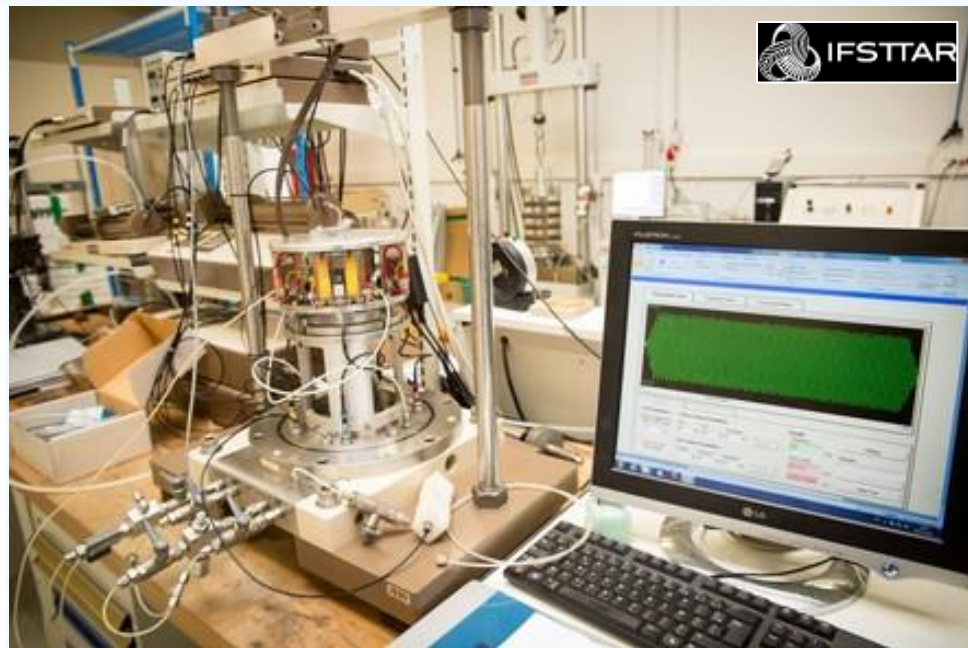
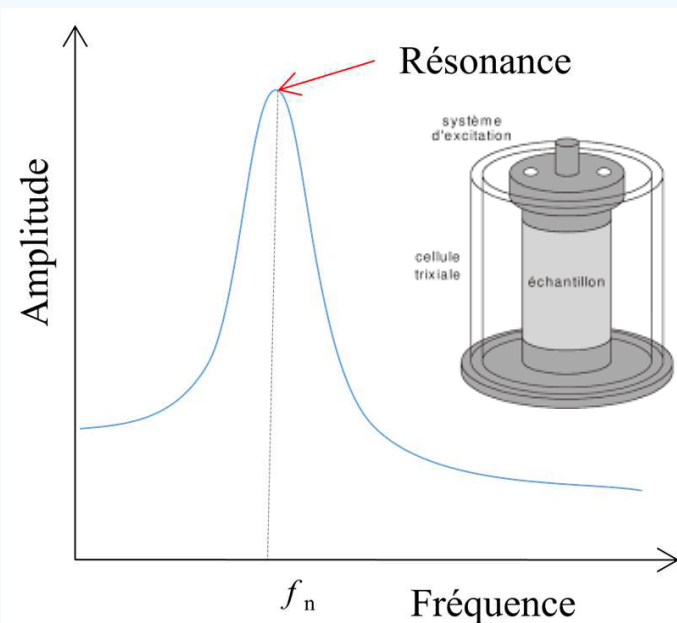
- ***Essai triaxial de torsion cyclique sur cylindre creux***



❑ Essais de laboratoire

• **Essai à la colonne résonante**

- ❖ **Principe :** L'essai consiste à soumettre une éprouvette de sol reconsolidée dans une cellule triaxiale à une vibration longitudinale ou en torsion forcée de fréquence croissante et en mesurer la déformation correspondante. La déformation maximale détermine la fréquence de résonance du sol et, par conséquent, le module de déformation maximal correspondant.



❑ Essais de laboratoire

• **Essai à la colonne résonante**

❖ **Interprétation :** L'éprouvette peut être à extrémités libres ou à une extrémité libre et fixe sur l'autre. L'expression des modules de déformation dépend de l'onde de vibration appliquée :

✓ **Vibration longitudinale :**

▪ **Extrémités libres :**

$$E = 4\rho f_n^2 L^2$$

ρ – Densité du sol

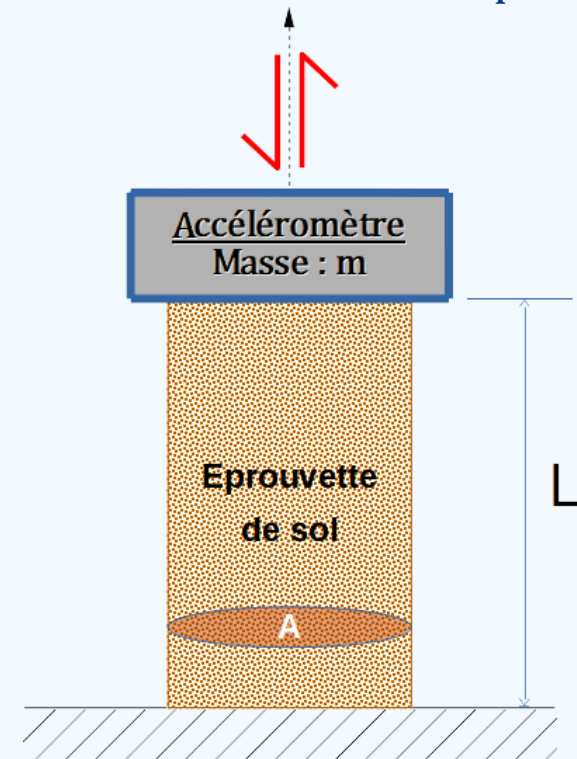
f_n – Fréquence de résonance du sol

L – Longueur de l'éprouvette de sol

▪ **Une extrémité fixe et l'autre libre :**

$$E = \rho V_L^2 = \rho \left(\frac{2\pi f_n L}{\alpha} \right)^2$$

avec $\alpha = \frac{\omega_n L}{V_L}$ et $\alpha \tan(\alpha) = AL\rho/m \Rightarrow \alpha \equiv$



❑ Essais de laboratoire

• **Essai à la colonne résonante**

❖ **Interprétation :** L'éprouvette peut être à extrémités libres ou à une extrémité libre et fixe sur l'autre. L'expression des modules de déformation dépend de l'onde de vibration appliquée :

✓ **Vibration de torsion :**

▪ **Extrémités libres :**

$$G = 4\rho f_n^2 L^2$$

ρ – Densité du sol

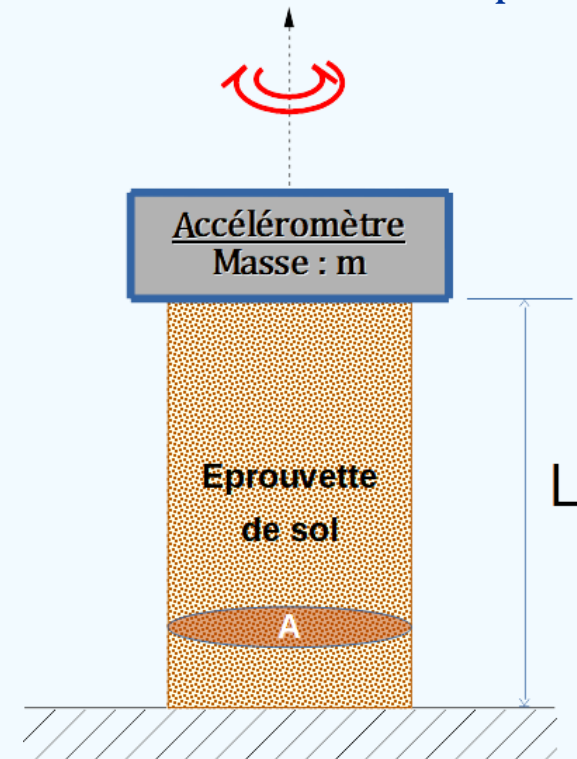
f_n – Fréquence de résonance du sol

L – Longueur de l'éprouvette de sol

▪ **Une extrémité fixe et l'autre libre :**

$$G = \rho V_T^2 = \rho \left(\frac{2\pi f_n L}{\alpha} \right)^2$$

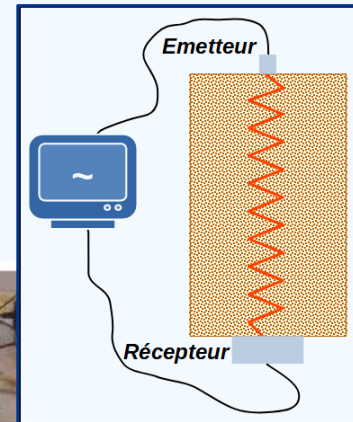
avec $\alpha = \frac{\omega_n L}{V_L}$ et $\alpha \tan(\alpha) = AL\rho/m \Rightarrow \alpha \equiv$



❑ Essais de laboratoire

- **Essai aux ultrasons (Méthode de contrôle non destructif)**

❖ **Principe :** L'essai consiste à placer une éprouvette de sol entre deux sondes, l'une émettrice et l'autre réceptrice, et en mesurer le temps de parcours de l'onde longitudinale qui lui est appliquée, d'où le calcul de la vitesse de propagation de l'onde correspondante et du module d'élasticité du sol.



❖ **Module d'élasticité :**

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \rho V_p^2$$

V_p – Vitesse de propagation

ρ – Densité du sol

❖ **Module de cisaillement :**

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

ν – Coefficient de Poisson du sol



Ultrasonic 58-E4900 – LDGM, Université de M'Sila

ESSAIS IN-SITU

❑ Essais in-situ

- **Essai sismique réfraction**
- **Essai sismique réflexion**
- **Essai Cross Hole**
- **Essai Up Hole**
- **Essai Down Hole**

$$G_{max} = \rho V_s^2$$

Voir cours de
Géophysique Appliquée
(M1/S1)

CORRÉLATIONS

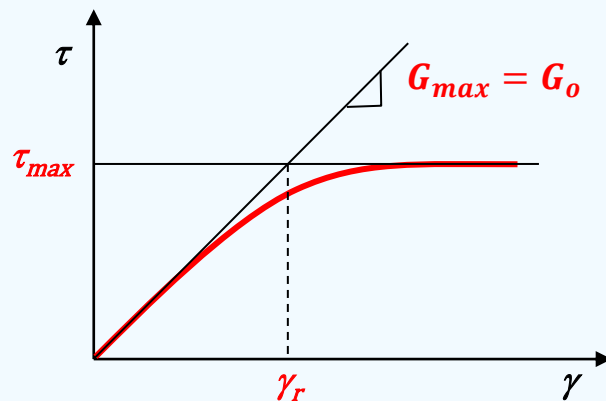
❑ Corrélations

- **Modèle hyperbolique de Hardin-Drnevich (1972)**

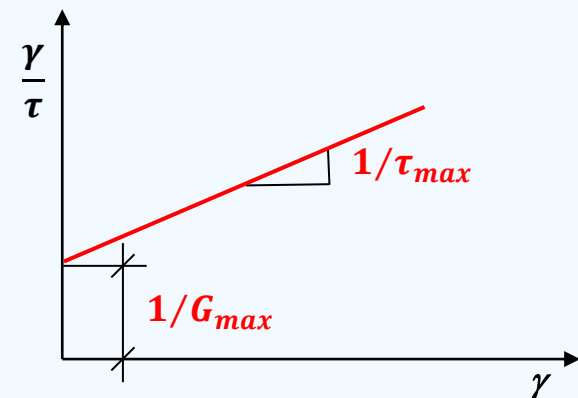
Ce modèle est défini par la relation suivante (*Détails : Voir cours de RDS*) :

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_{max}} + \frac{\gamma}{\tau_{max}}}$$

où G_{max} désigne le module de cisaillement tangent initial et τ_{max} la contrainte de cisaillement maximale.



Courbe de cisaillement



Courbe transformée

❑ Corrélations

• **Paramètres de cisaillement cyclique**

Les paramètres de cisaillement cyclique sont donnés par les relations suivantes :

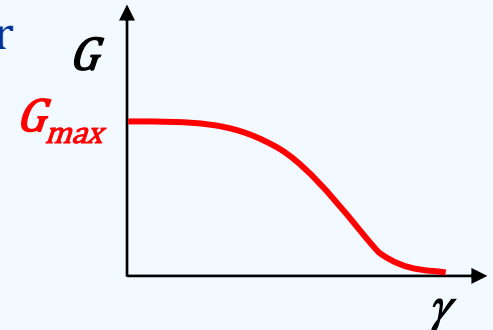
$$G = \frac{1}{1+\gamma_h} G_{max} \quad | \quad G_{max} = G_o$$

et

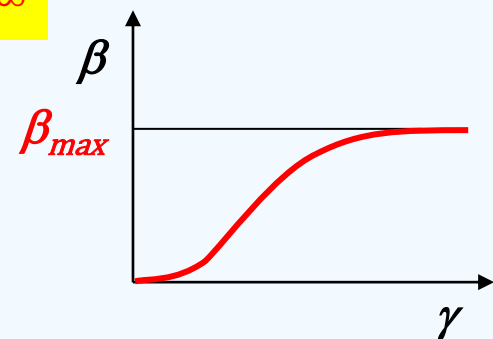
$$\beta = \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right) \beta_{max} = \frac{\gamma_h}{1+\gamma_h} \beta_{max} \quad | \quad \beta_{max} = \beta_{\infty}$$

avec :

- $\gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_r} [1 + a e^{-b(\gamma/\gamma_r)}]$
- $\gamma_r = \tau_{max}/G_{max}$ - Déformation de référence
- a et b - Paramètres expérimentaux



Module de cisaillement



Coefficient d'amortissement

❑ Corrélations

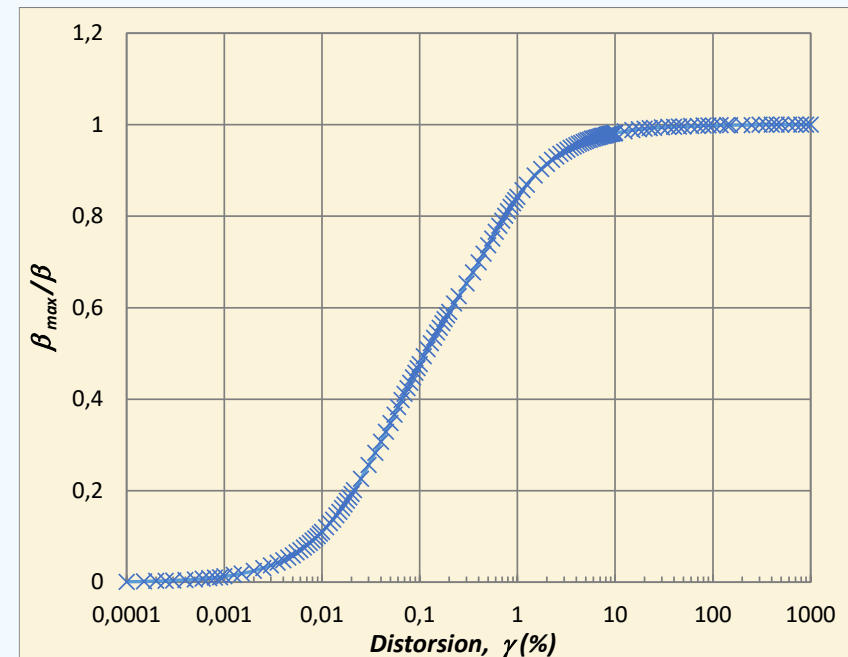
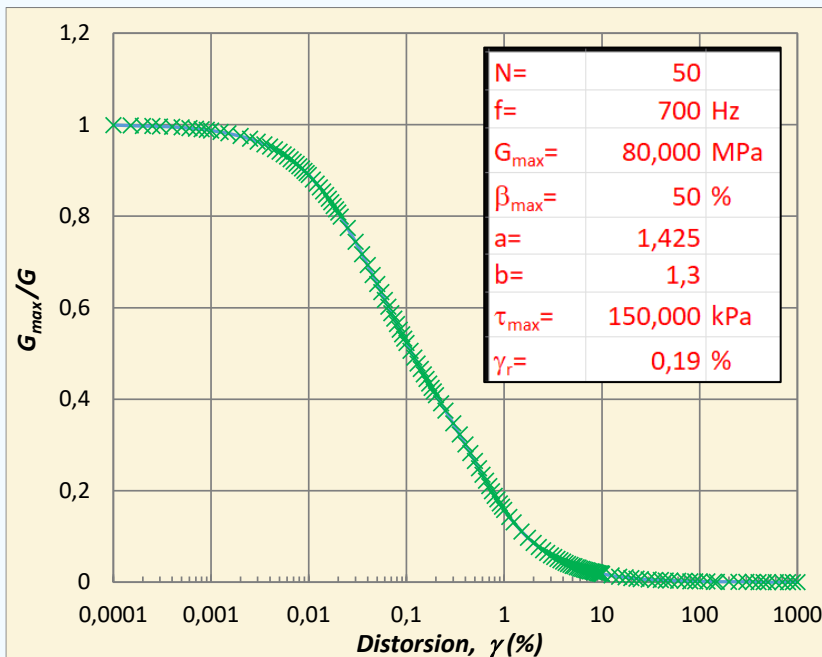
• Paramètres de cisaillement cyclique

Sol	Paramètre	a	b	$\beta_{\max}$ (%)
Sable sec	G	-0.5	0.16	-
	β	$0.6N^{-1/6} - 1$	$1 - N^{-1/12}$	$33 - 1.5 \log(N)$
Sable saturé	G	$-0.2 \log(N)$	0.16	-
	β	$0.54N^{-1/6} - 0.9$	$0.65(1 - N^{-1/2})$	$28 - 1.5 \log(N)$
Argile saturée	G	$1 + 0.25 \log(N)$	1.3	-
	β	$1 + 0.2\sqrt{f}$	$0.2fe^{-\sigma'_m/p_a} + 2.25\left(\frac{\sigma'_m}{p_a}\right) + 0.3 \log(N)$	$31 + 1.5\sqrt{f} - 1.5 \log(N) - (3 + 0.03f)\sqrt{\frac{\sigma'_m}{p_a}}$

f - Fréquence (Hertz)
 N - Nombre de cycles
 σ'_m - Contrainte moyenne effective
 p_a - Pression de référence (prise égale à la pression atmosphérique)

❑ Corrélations

- **Paramètres de cisaillement cyclique : Exemple théorique de calcul**

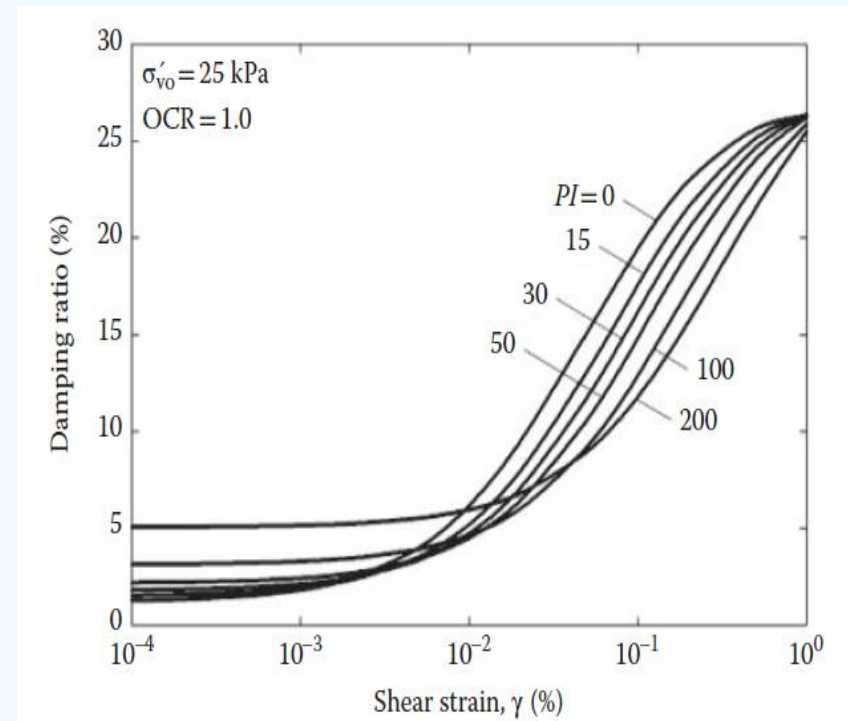
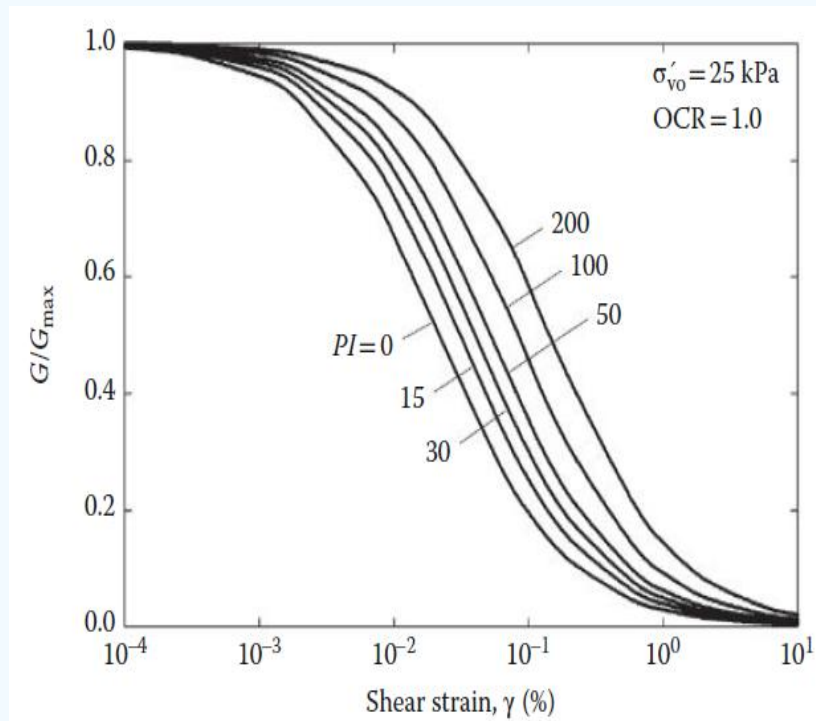


Evolution du module de cisaillement et du coefficient d'amortissement en fonction de la distorsion

(Argile saturée : $N=50$ / $f=700$ Hz / $\tau_{max}=150$ kPa / $G_{max}=80$ MPa / $\beta_{max}=50\%$)

❑ Corrélations

• Paramètres de cisaillement cyclique : Cas réel



Evolution du module de cisaillement et du coefficient d'amortissement en fonction de la distorsion

(Darendeli M.B., PhD Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, TX, 2001)

❑ Corrélations

- **Contrainte de cisaillement maximale τ_{max}**

Elle est donnée par l'expression suivante :

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

où K_o est le coefficient de pression des terres au repos déterminé comme suit :

- ✓ pour les sables :

$$K_o = 1 - \sin(\varphi') \quad | \quad \varphi' - \text{Angle de frottement interne effectif du sable}$$

- ✓ pour les argiles normalement consolidées : ($R_{oc} = 1$)

$$K_o = K_o^{nc} = \begin{cases} 0.40 + 0.007 I_p & \text{pour } 0 \leq I_p \leq 40\% \\ 0.68 + 0.001(I_p - 40) & \text{pour } 40\% \leq I_p \leq 80\% \end{cases}$$

où I_p désigne l'indice de plasticité de l'argile (Booker et Ireland, 1965)

- ✓ pour les argiles surconsolidées : ($R_{oc} > 1$)

$$K_o = K_o^{sc} = K_o^{nc} \sqrt{R_{oc}} \quad | \quad R_{oc} = \sigma'_p / \sigma'_{vo} - \text{Rapport de surconsolidation}$$

Nota : Cas des argiles saturées : $\tau_{max} = c_u \quad | \quad c_u - \text{Cohésion non drainée}$



❑ Corrélations

- **Evaluation du module de cisaillement maximal G_{max}**

SABLES

❖ Modèle de Hardin et Black (1968) :

$$G_{max} = \begin{cases} \frac{6908(2.17-e)^2}{1+e} \sqrt{\sigma'_m} & \text{(Sable roulé)} \\ \frac{3230(2.97-e)^2}{1+e} \sqrt{\sigma'_m} & \text{(Sable anguleux)} \end{cases}$$

avec :

- $\sigma'_m = \frac{3-2 \sin(\varphi')}{3} \sigma'_{v0}$ - Contrainte moyenne effective
- σ'_{v0} - Pression effective des terres en place
- φ' - Angle de frottement interne effectif

❑ Corrélations

- **Evaluation du module de cisaillement maximal G_{max}**

SABLES

❖ Modèle de Hardin et Drnevich (1972) :

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

avec :

- $K \approx 600$ et $n \approx 0.5$
- $F(e) = \frac{1}{0.3+0.7e^2}$ pour $0.4 \leq e \leq 1.2$ (Hardin, 1978)
- $\sigma'_m = \frac{3-2 \sin(\varphi')}{3} \sigma'_{v0}$ - Contrainte moyenne effective
- σ'_{v0} - Pression effective des terres en place
- φ' - Angle de frottement interne effectif
- p_a - Pression de référence (prise égale à la pression atmosphérique)

❑ Corrélations

- **Evaluation du module de cisaillement maximal G_{max}**

SABLES

❖ Modèle de Seed et Idriss (1970) :

$$G_{max} = 218.82 K_{2max} \sqrt{\sigma'_m} \quad (\text{pour } \gamma < 10^{-4}\%)$$

où $\sigma'_m = \frac{3-2 \sin(\varphi')}{3} \sigma'_{vo}$ est la contrainte moyenne effective, σ'_{vo} la pression effective des terres en place, φ' l'angle de frottement interne effectif et $K_{2max} = f(D_r)$ où D_r désigne la densité relative du sable.

D_r (%)	30	40	45	60	75	90
K_{2max}	34	40	43	52	61	70

$$\left(D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \right)$$

Nota : - Pour les graviers : $80 \leq K_{2max} \leq 120$

- L'expérience montre que pour $\varphi' = 36^\circ \Rightarrow 40\% \leq D_r \leq 50\%$
 $\Rightarrow D_r \approx 45\%$

❑ Corrélations

- **Evaluation du module de cisaillement maximal G_{max}**

ARGILES

❖ Modèle de Hardin et Black (1968) :

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

avec $R_{oc} = \sigma'_p / \sigma'_{vo}$ (Rapport de surconsolidation) et $k = f(I_p)$

I_p (%)	0	20	40	60	80	≥ 100
k	0	0.18	0.30	0.41	0.48	0.50

où $\sigma'_m = \frac{1+2K_o}{3} \sigma'_{vo}$ est la contrainte moyenne effective, K_o le coefficient de pression des terres au repos ($= K_o^{nc}$ pour une argile normalement consolidée ou K_o^{sc} pour une argile surconsolidée), σ'_{vo} la pression effective des terres en place et I_p l'indice de plasticité du sol.

❑ Corrélations

- **Evaluation du module de cisaillement maximal G_{max}**

ARGILES

❖ Modèle de Hardin et Drnevich (1972) :

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

avec :

- $K \approx 600$ et $n \approx 0.5$
- $F(e) = \frac{1}{0.3+0.7e^2}$ pour $0.4 \leq e \leq 1.2$ (Hardin, 1978)
- $\sigma'_m = \frac{1+2K_0}{3} \sigma'_{v0}$ - Contrainte moyenne effective appliquée
- σ'_{v0} - Pression effective des terres en place
- K_0 - Coefficient de pression des terres au repos ($= K_0^{nc}$ pour une argile normalement consolidée ou K_0^{sc} pour une argile surconsolidée)
- p_a - Pression de référence (prise égale à la pression atmosphérique)

❑ Corrélations

- **Evaluation du module de cisaillement maximal G_{max}**

ARGILES

❖ Modèle de Seed et Idriss (1970) :

$$G_{max} = K \cdot c_u$$

avec :

- K - Constante variant de 1000 à 3000 ($K_{moy} \approx 2000$)
- c_u - Cohésion non drainée du sol

❑ Corrélations

- **Evaluation du coefficient d'amortissement maximal β_{max}**

Son expression est donnée selon le type de sol comme suit (Black, 1984) :

- ✓ Sable propre sec : $\beta_{max} = 33 - 1.5 \log(N) \text{ (%)}$

- ✓ Sable propre saturé : $\beta_{max} = 28 - 1.5 \log(N) \text{ (%)}$

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

avec :

- N - Nombre de cycles de cisaillement
- f - Fréquence imposée au système
- $\sigma'_m = \frac{1+2K_0}{3} \sigma'_{v0}$ - Contrainte moyenne effective appliquée
- σ'_{v0} - Pression effective des terres en place
- K_0 - Coefficient de pression des terres au repos
- p_a - Pression de référence (prise égale à la pression atmosphérique)

En pratique : $\beta_{max} \approx 0.5$ (Structures) et 0.2 (Sols)



Merci de votre attention

Fin du Chapitre Trois

EXERCICES

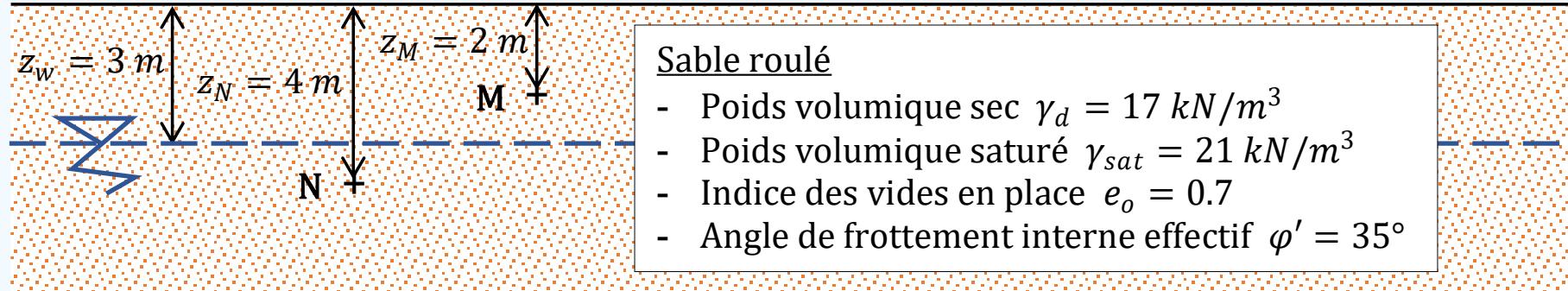
Ex. 1 On considère un massif de sable roulé propre et sec possédant les caractéristiques géotechniques suivantes :

- 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.

EXERCICES

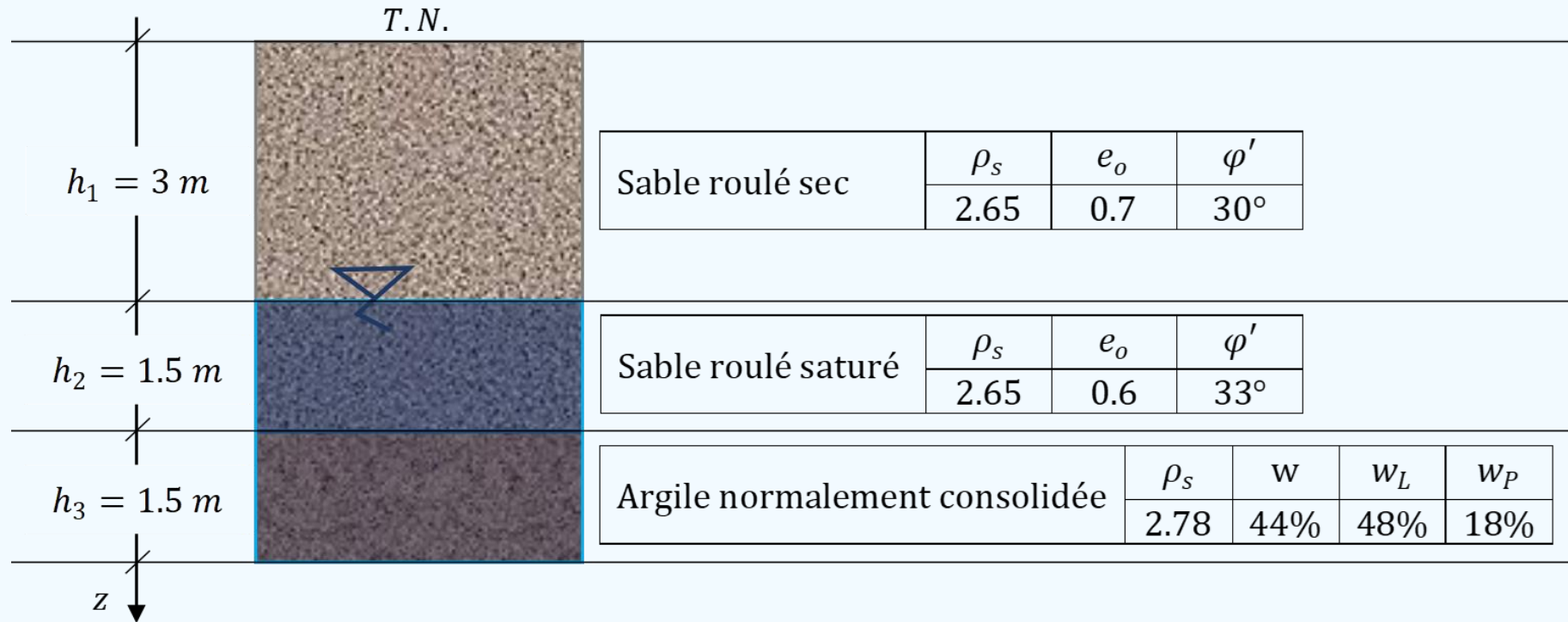
Ex. 2 Considérons le profil de sol représenté ci-après.



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.

EXERCICES

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.

EXERCICES

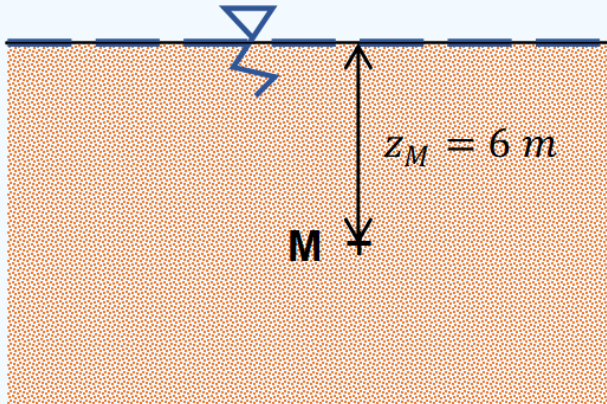
Ex. 4 Les résultats d'un essai triaxial cyclique effectué sur un échantillon d'argile avec une fréquence $f = 700 \text{ Hz}$ ont donné après $N = 50 \text{ cycles}$ une contrainte de cisaillement cyclique maximale $\tau_{max} = 150 \text{ kPa}$. Cette argile a été prélevée à une profondeur $z=3 \text{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

EXERCICES

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.