

MESURES DES PROPRIETES CYCLIQUES DES SOLS LIMONEUX OU ARGILEUX AU LABORATOIRE

CYCLIC TRIAXIAL MEASUREMENTS ON SILTY AN CLAYEY SOILS IN THE LABORATORY

Jean François SERRATRICE¹

¹ Cerema DTer Méditerranée, Aix en Provence, France

RÉSUMÉ – Une méthode d'exploitation des essais triaxiaux cycliques est proposée pour identifier les propriétés dynamiques des sols fins limoneux ou argileux au laboratoire. L'essai consiste à appliquer plusieurs séquences successives de cycles en condition non drainée dans une gamme de déformations axiales comprises entre 10^{-4} et 10^{-2} . Une approximation en séries de Fourier des courbes expérimentales permet d'effectuer l'identification précise du module d'Young sécant et de l'amortissement. L'exploitation d'un essai donne une illustration de la méthode.

ABSTRACT – An operating method for cyclic triaxial testing is proposed to identify the dynamic properties of silty or clayey fine soils in the laboratory. The test consists in applying several successive sequences of undrained cycles in a range of axial deformations between 10^{-4} and 10^{-2} . Fourier's serial approximation of the experimental records allows the precise identification of secant Young modulus and damping. An operating test gives an illustration of the method.

1. Introduction

La connaissance du comportement cyclique des sols s'impose pour comprendre la réponse des sites quand ils sont frappés par un séisme. En très petites déformations, la raideur du sol est représentée par le module de cisaillement G_{\max} qui est en lien direct avec la vitesse des ondes de cisaillement V_s . Dans la gamme des déformations faibles à moyennes, le comportement des sols est non linéaire et hystérétique. La raideur du sol est représentée par le module de cisaillement sécant G . La dissipation d'énergie par le sol au cours des cycles est représentée par le coefficient d'amortissement D . Les propriétés G et D dépendent à la fois de la contrainte effective de confinement σ'_m et du niveau de déformation de cisaillement γ . En pratique, le recueil des propriétés dynamiques des terrains s'effectue par la mesure directe des vitesses V_s in-situ, ou une estimation indirecte de celles-ci, puis au laboratoire, où sont mesurées les variations de G et D avec σ'_m et γ . En reproduisant des sollicitations cycliques contrôlées, les essais de laboratoire permettent d'identifier les paramètres du comportement non linéaire et hystérétique des sols. Dans cette démarche, qui s'impose pour les projets importants, il est impératif de disposer d'échantillons carottés de bonne qualité et représentatifs des sols étudiés.

Une méthode d'exploitation des courbes d'essai triaxial cyclique est proposée ici. Elle s'appuie sur une approximation des courbes expérimentales dont l'expression permet d'accéder à l'identification précise du module d'Young sécant et de l'amortissement dans la gamme des amplitudes faibles à moyennes des déformations cycliques. L'exploitation d'un essai triaxial cyclique donne une illustration de la méthode. Le sol testé est un limon dont les propriétés physiques et mécaniques sont décrites, avant de passer à ses caractéristiques dynamiques.

2. Description des courbes triaxiales cycliques

2.1. Procédure d'essai

Les essais triaxiaux cycliques destinés à la mesure des propriétés dynamiques des sols se déroulent en plusieurs phases. Pour les aspects conventionnels, la réalisation de l'essai se réfère à la norme de l'essai triaxial à chargement monotone. Pour les aspects cycliques il est fait référence à la norme américaine ASTM D 3999-91. Quelques éléments pratiques sont indiqués ci-dessous.

Après découpage, l'éprouvette est placée dans la cellule triaxiale. Celle-ci est munie d'un dispositif d'extension. Il est recommandé d'utiliser un dispositif de mesure locale de la déformation fixé sur l'éprouvette. La saturation du sol est parachevée par l'application de paliers de contre-pression. L'éprouvette est consolidée sous une pression effective isotrope p_c définie en fonction des conditions de site (la profondeur dans le massif ou le chargement sous l'ouvrage).

La sollicitation cyclique non drainée est appliquée ensuite (CUy). Elle est composée par plusieurs séquences de cycles successives pilotées en déplacement (essai étagé en mode DF, contrôle en déplacement et en fréquence). Le déplacement axial sinusoïdal alterné, qui est imposé, est défini par une amplitude Δh et une fréquence f . La sollicitation cyclique est maintenue constante jusqu'à atteindre un nombre fixé de cycles. A cette amplitude cyclique correspond l'amplitude de la déformation axiale $\Delta \varepsilon_a$ (notée aussi $\Delta \varepsilon_{aSA}$ pour simple amplitude). Cette amplitude $\Delta \varepsilon_a$ est augmentée d'une séquence de cycles à l'autre afin de balayer la gamme des déformations axiales comprises entre 10^{-4} et 10^{-2} (de 0,01 % à 1 %). La reconsolidation préalable de l'éprouvette sous la pression effective isotrope p_c est effectuée avant de commencer une nouvelle séquence si la pression interstitielle accumulée devient trop grande pendant la séquence précédente.

Pendant les séquences de cisaillement cyclique, le déplacement axial Δh (mesures globale et locale), l'effort axial F et la pression interstitielle u sont enregistrés en continu. L'échantillonnage des mesures est réalisé à pas de temps constant à raison de 50 ou 100 points par cycle. Ces mesures sont converties en déformation axiale ε_a , pression effective moyenne $p = (\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3$ et déviateur $q = \sigma'_a - \sigma'_r$, où σ'_a et σ'_r sont les contraintes effectives axiale et radiale. Le déviateur q constitue la réponse du sol. Les déformations et les contraintes sont comptées positivement en compression. Le calcul de ces variables est effectué à partir des données brutes, en tenant compte de la variation de section de l'éprouvette (forme de déformation en tonneau). Pendant chacune des séquences de cycles ces variables sont représentées graphiquement en fonction du temps (t , ε_a , q , u) et sous la forme de courbe contrainte déformation (ε_a , q) et de chemin des contraintes effectives (p , q).

2.2. Module d'Young et amortissement

Dans son principe, l'essai triaxial, pendant lequel la pression de confinement est maintenue constante, permet de mesurer le module d'Young E , rapport entre le déviateur q et la déformation axiale ε_a . Un essai non drainé permet de mesurer le module d'Young non drainé E_u , dans une plage où la pression interstitielle ne change pas trop. Ce module est directement lié au module de cisaillement G ($E_u = 1,5 G$). Dans les essais triaxiaux cycliques, le module d'Young non drainé sécant représente la pente moyenne de la

boucle contrainte-déformation (ε_a, q). Cette pente est bien définie pour un matériau viscoélastique. D'autres définitions des modules concernent les modules tangents.

L'amortissement hystérétique traduit la dissipation de l'énergie par le sol pendant les cycles de chargement-déchargement. Dans un matériau viscoélastique, il est proportionnel au rapport entre l'énergie dissipée pendant un cycle (l'aire A_c de la boucle) et l'énergie stockée pendant ce cycle (l'aire du triangle $A_t = \Delta\varepsilon_a \times \Delta q / 2$ sous la demi-boucle). Ce rapport exprime aussi le déphasage φ entre la sollicitation $\varepsilon_a(t)$ et la réponse $q(t)$ $D = \sin(\varphi) / 2 = A_c / 4\pi A_t$ (hystérésis signifie "en retard").

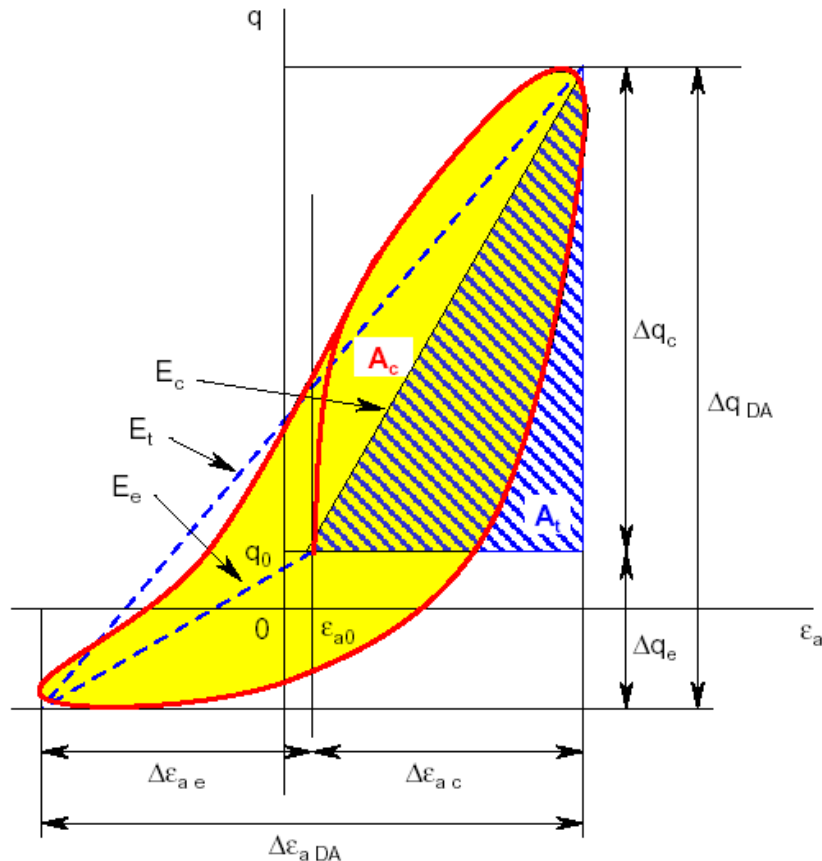


Figure 1. Essai triaxial cyclique.

Courbe déformation axiale, déviateur (ε_a, q). Paramètres.

Dans les sols fins limoneux ou argileux la progression du déviateur est continue pendant chacune des séquences de cycles et s'amortit progressivement. Elle est retardée par rapport à la sollicitation qui est imposée en déformation. Toutefois, les boucles contrainte-déformation (ε_a, q) se distordent peu à peu quand l'amplitude $\Delta\varepsilon_a$ est augmentée d'une séquence de cycles à l'autre, pour s'éloigner progressivement de la réponse d'un matériau viscoélastique. Les boucles (ε_a, q) ne sont plus fermées. La norme ASTM D 3999-91 précise les conditions d'exploitation de l'essai triaxial à ce titre. Dans les sables, les amplitudes supérieures à 10^{-3} conduisent souvent à des fortes déformations plastiques et une dégradation marquée du module E_u , voire à la liquéfaction du sol.

2.3. Représentation des boucles contrainte-déformation

Dans cette situation, la méthode d'exploitation des essais triaxiaux cycliques proposée ici veut répondre à deux objectifs :

- améliorer l'exploitation des essais en tenant compte de la forme compliquée des cycles dans la gamme des déformations moyennes,
- réduire l'effet du bruit des mesures.

En effet, il n'existe pas de méthode pour déterminer les propriétés dynamiques à partir de boucles d'hystérésis déformées.

Une autre proposition est suggérée ici. Le graphique de la [figure 1](#) montre une boucle contrainte-déformation (ε_a, q) enregistrée pendant une séquence de cycles d'un essai triaxial. L'origine de la boucle a pour coordonnées (ε_{a0}, q_0) . La sollicitation et la réponse sont caractérisées par les doubles-amplitudes $\Delta\varepsilon_{a DA}$ et Δq , mais des amplitudes distinctes en compression et en extension $\Delta\varepsilon_{a c}, \Delta\varepsilon_{a e}, \Delta q_c, \Delta q_e$. De ces caractéristiques sont déduits les modules sécants $E_c = \Delta q_c / \Delta\varepsilon_{a c}$, $E_e = \Delta q_e / \Delta\varepsilon_{a e}$, $E_t = \Delta q_{DA} / \Delta\varepsilon_{a DA}$, l'aire du cycle A_c , l'aire du triangle A_t et l'amortissement $D = \sin(\varphi) / 2 = A_c / 4\pi A_t$, où φ est le déphasage.

2.4. Représentation des courbes en fonction du temps

Chaque séquence de cycles contrôlée en mode DF fait l'objet d'une exploitation séparée (contrôle en déplacement et en fréquence). Pour chacune de ces séquences, des approximations des courbes enregistrées $\varepsilon_a(t)$ et $q(t)$ sont calculées au sens des moindres carrés à l'aide de séries de Fourier (approximation de Bessel). Le calcul est effectué pour tous les cycles de la séquence ou pour un nombre donné de cycles, les dix derniers cycles sur une séquence de cinquante cycles par exemple. Dans les sols fins limoneux ou argileux, ce choix permet de s'éloigner du début de la séquence des cycles où les variations du déviateur et de la pression interstitielle sont souvent les plus fortes, pour ne retenir que les cycles les mieux stabilisés.

L'approximation s'exprime par :

$$y(t) = a_0/2 + \sum_{k=1}^n a_k \cos(2\pi k t / T) + \sum_{k=1}^n b_k \sin(2\pi k t / T) \quad (1)$$

où a_k et b_k sont des amplitudes, T est la durée de la séquence des N cycles et $2n$ le nombre de mesures. Les coefficients a_k et b_k sont calculés par la méthode des moindres carrés. Les fréquences mineures sont éliminées alors, pour ne conserver que les fréquences dominantes. Cette réduction permet d'effectuer un filtrage des hautes fréquences et d'éliminer ainsi le bruit des mesures.

Les propriétés des cycles sont calculées ensuite à partir de ces approximations :

- les amplitudes cycliques de la déformation axiale et du déviateur en compression et en extension, $\Delta\varepsilon_{a c}, \Delta\varepsilon_{a e}, \Delta q_c$ et Δq_e , à partir de l'origine (ε_{a0}, q_0) des cycles,
- les doubles-amplitudes cycliques $\Delta\varepsilon_{a DA} = \Delta\varepsilon_{a c} - \Delta\varepsilon_{a e}$ et $\Delta q_{DA} = \Delta q_c - \Delta q_e$,
- l'aire A_c des boucles (ε_a, q) pendant chacun des cycles,
- l'aire du triangle situé du côté des compressions $A_t = \Delta\varepsilon_{a c} \times \Delta q_c / 2$.

Les propriétés dynamiques du sol se déduisent de ces résultats, pour chacun des cycles, avec les modules sécants en extension E_e et en compression E_c , le module global E_t :

$$E_e = \Delta q_e / \Delta\varepsilon_{a e} \quad E_c = \Delta q_c / \Delta\varepsilon_{a c} \quad E_t = \Delta q_{DA} / \Delta\varepsilon_{a DA} \quad (2)$$

et l'amortissement D , qui représente la dissipation d'énergie (ou le déphasage φ entre la déformation axiale et le déviateur) :

$$D = \sin(\varphi) / 2 = A_c / 4 \pi A_t \quad (3)$$

La méthode s'avère efficace, en particulier pour identifier les modules d'Young sécants sur les courbes. L'identification des amortissements pendant les séquences de cycles successives est améliorée aussi. Mais cette application de cette méthode n'échappe pas aux questions habituelles de l'influence de la machine d'essai et des conditions d'essai (fréquence, nombre de cycles, jeu des contacts machine-éprouvette).

3. Application à l'exemple d'un essai triaxial cyclique sur un limon

L'exemple d'un essai triaxial cyclique est présenté. Il porte sur un limon testé dans son état naturel. Les propriétés dynamiques du sol sont identifiées par la méthode proposée.

4.1. Le limon

Le limon provient du site de Vauxrains, près de Soissons dans l'Aisne. Les échantillons carottés ont été prélevés dans trois sondages de près de cinq mètres de profondeur. Les échantillons carottés sont parfaitement bien conditionnés dans des conteneurs en PVC de 85 mm de diamètre intérieur, fermés à leur extrémité par des bouchons et du ruban adhésif. Ils sont stockés verticalement au laboratoire. L'ouverture des conteneurs révèle la présence d'un limon beige brun ou beige orangé, légèrement argileux ou légèrement sableux, homogène dans l'ensemble. Le [tableau 1](#) indique les moyennes de caractéristiques d'état où z est la profondeur, w la teneur en eau, γ le poids volumique, γ_d le poids volumique sec, e l'indice des vides et S_r le degré de saturation.

Tableau 1. Caractéristiques moyennes d'état du limon.

w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e ()	S_r (%)	ρ_d (g/cm ³)	w_{sat} (%)	$\gamma_{d\ sat}$ ()
20,08	19,50	16,24	0,632	85,9	1,655	23,39	20,04

Le poids volumique γ et le poids volumique sec γ_d sont calculés avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. L'indice des vides e et le degré de saturation S_r sont calculés avec un poids volumique solide $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$ par défaut, soit une masse volumique solide $\rho_s = 2,70 \text{ g/cm}^3$. Le [tableau 1](#) indique aussi la masse volumique sèche moyenne ρ_d , la teneur en eau à saturation w_{sat} et le poids volumique à saturation γ_{sat} du limon. Le sol est peu compact, avec un indice des vides moyen égal à 0,63. Il n'est pas saturé, $S_r < 1$.

Tableau 2. Propriétés physiques du limon.

C_2 (%)	C_{80} (%)	w_L ()	w_P ()	I_P ()	VB (g/100 g)
8 à 16	94 à 97	26 à 32	19 à 22	6 à 12	2,7 à 3,9

Les essais d'identification du limon comptent des analyses granulométriques par diffraction laser, des mesures des limites de consistance et des essais au bleu de méthylène. Ces propriétés sont reportées dans le [tableau 2](#). (C_2 et C_{80} teneurs en particules de diamètre inférieur à 2 μm et 80 μm). Le sol se classe en limon peu plastique (I_P) ou argile peu plastique (A_P) d'après la classification USCS-LCPC.

4.2. Essai triaxial cyclique, courbes expérimentales

L'essai triaxial CU cyclique a été réalisé en mode DF, essai contrôlé en déplacement et en fréquence. L'éprouvette de 50 mm de diamètre et d'éclatement deux est saturée sous contre-pression ($u_{cp} = 400 \text{ kPa}$), puis elle est consolidée sous la pression effective isotrope $p_c = 50 \text{ kPa}$. Les cycles en mode DF sont appliqués ensuite en condition non drainée à la fréquence $f = 0,5 \text{ Hz}$ (période $T = 2 \text{ s}$). Huit séquences de cinquante cycles ont été appliquées pour des amplitudes $\Delta\varepsilon_a$ égales à 0,005 %, 0,01 %, 0,02 %, 0,05 %, 0,1 %, 0,2 %, 0,5 % et 1 % respectivement.

En cours d'essai et pendant les quatre premières séquences de cycles y_1 à y_4 , les enregistrements montrent que l'accroissement de la pression interstitielle reste limité

(inférieure à 5 kPa). Elles ont été enchaînées l'une après l'autre de ce fait, jusqu'à la séquence y5. Des phases de reconsolidation sont effectuées ensuite avant les séquences de cycles y6, y7 et y8, puis après la séquence y8. Les premières produisent des déformations volumiques cumulées limitées, inférieures à 0,5 %. Par contre, les séquences de cycles y6, y7 et y8 provoquent des montées de pression interstitielle plus fortes (17, 25 et 35 kPa), puis des déformations volumiques de reconsolidation cumulées de près de 0,5, 1 et 2 %.

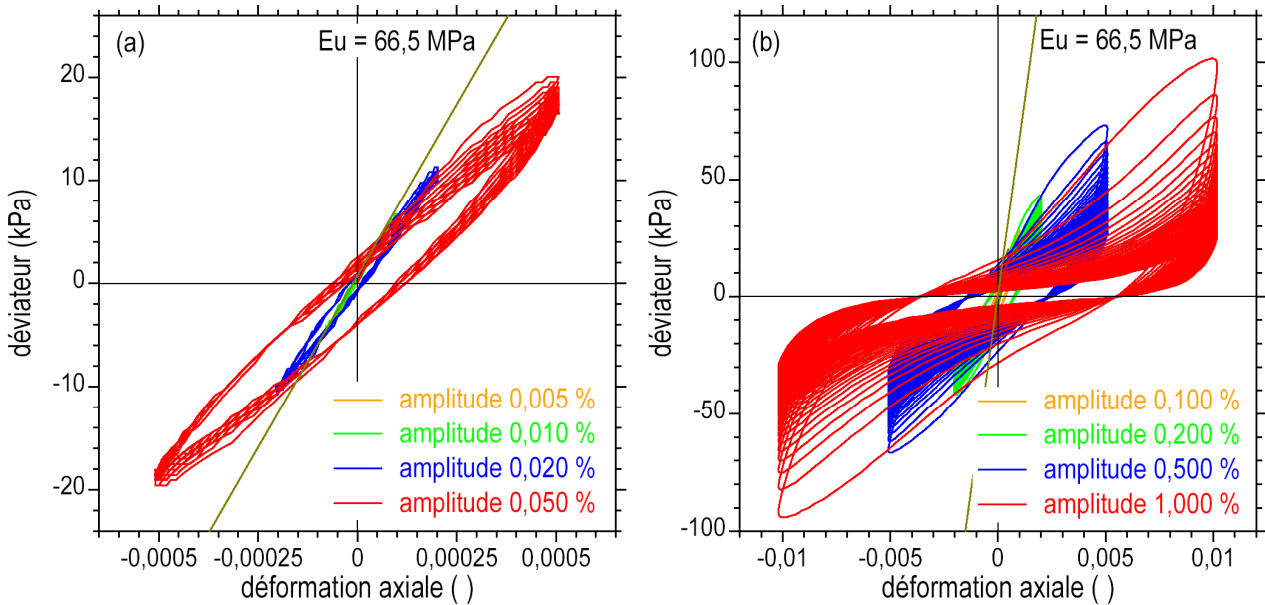


Figure 2. Essai triaxial cyclique CUy DF piloté en déplacement.
 Courbes contrainte-déformation (ε_a , q). 50 cycles par séquence.
 a) Séquences de cycles y1 à y4.
 b) Séquences de cycles y5 à y8.

Les courbes contrainte-déformation (ε_a , q) des huit séquences de cycles sont rassemblées sur les deux graphiques de la figure 2, en séparant les quatre premières séquences des quatre suivantes avec des échelles appropriées. Pendant les premières séquences de cycles, les courbes forment des boucles très étroites et fermées, alors que les dernières se développent largement et ne sont pas fermées. Les modules d'Young sécants se stabilisent rapidement pendant les premières séquences et ne se stabilisent pas pendant les dernières. Ils diminuent d'une séquence à l'autre. Ces évolutions caractérisent la dégradation du module d'Young E_u en fonction de l'amplitude $\Delta\varepsilon_{a,SA}$ des séquences successives de cycles. Parallèlement, les aires intérieures des boucles (ε_a , q) croissent avec $\Delta\varepsilon_{a,SA}$, marquant ainsi une dissipation de plus en plus grande, ce qui sera traduit par l'accroissement de l'amortissement D .

4.3. Exploitation de l'essai triaxial cyclique

Dans la méthode proposée, les courbes représentant la déformation (t , ε_a) et le déviateur (t , q) en fonction du temps font l'objet d'une approximation à l'aide de séries de Fourier. Ces approximations sont calculées au sens des moindres carrés sur la totalité de la séquence de cycles, ou un intervalle particulier de celle-ci. Dans le cas présent, le calcul est effectué sur les dix derniers cycles de chacune des séquences y1 à y8, soit entre 80 et 100 s après le début de la sollicitation sinusoïdale. Cela permet de sélectionner un domaine où l'amplitude Δq du déviateur est la plus amortie et les boucles (ε_a , q) les mieux

fermées. Parallèlement, l'accroissement de la pression interstitielle est plus lent dans cet intervalle. D'autres choix d'intervalles de calcul sont possibles.

4.4. Représentation de la réponse dynamique du limon

Pour terminer, les paramètres dynamiques du limon, qui ont été mesurés à partir de l'essai triaxial cyclique non drainé présenté ici, sont comparés aux propriétés tirées de deux formulations empiriques. Les modules sécants E_t et les amortissements D sont reportés sur les graphiques de la [figure 3](#) en fonction de l'amplitude de la déformation axiale $\Delta\varepsilon_{aSA}$.

Sur la base d'une compilation de nombreux essais de laboratoire publiés dans la littérature concernant des argiles et des limons, Vardanega et Bolton (2013) ont proposé une expression semi-empirique donnant le module maximal de cisaillement G_{max} en fonction de la pression effective de confinement et de l'indice des vides. Le module de cisaillement G s'exprime, via le rapport G / G_{max} , en fonction de la déformation de cisaillement γ et d'une déformation de référence γ_{ref} . Comme G_{max} pour l'axe des modules G en ordonnée, γ_{ref} est introduite là pour normaliser l'axe des déformations en abscisse. Son expression est établie en fonction de l'indice de plasticité I_p :

$$\gamma_{ref} = 2,2 (I_p / 100000) \quad (4)$$

Le rapport G_{max} / G est donné alors par l'expression :

$$G_{max} / G = 1 + (\gamma / \gamma_{ref})^{0,943} \quad (5)$$

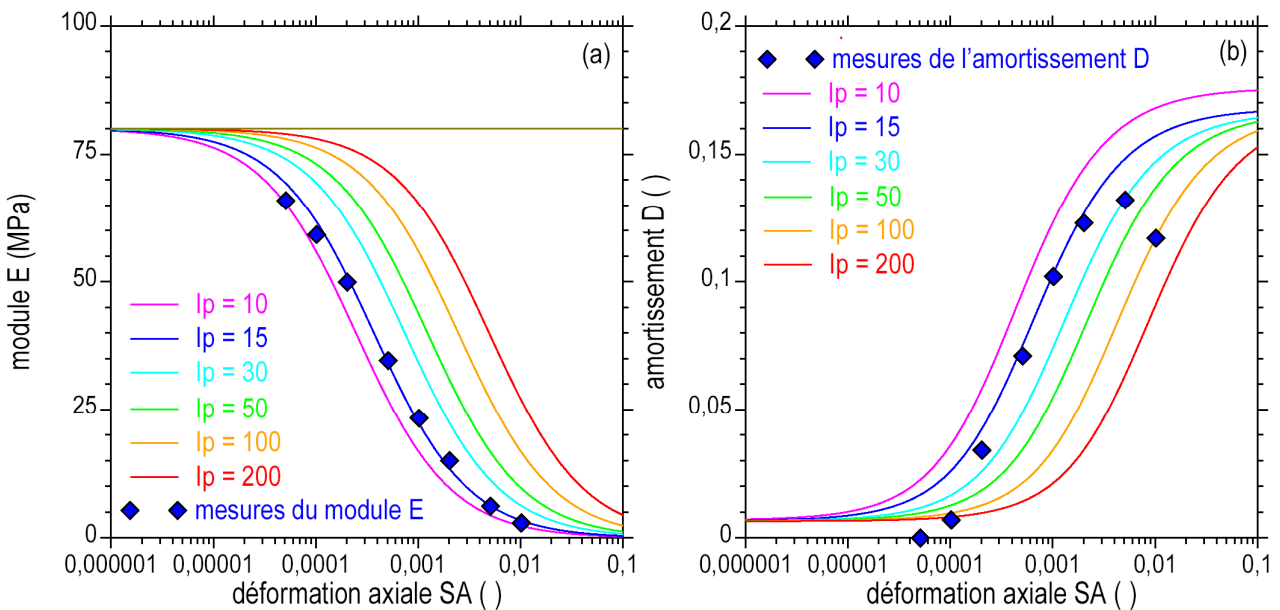


Figure 3. Propriétés dynamiques E_u et D du limon en fonction de l'amplitude de la sollicitation $\Delta\varepsilon_{aSA}$. Comparaison des données expérimentales aux formulations empiriques.

Cette formulation établie en termes de cisaillement est convertie dans les variables triaxiales ε_a et q en admettant que $E_u = 1,5 G$ et que $\gamma = 1,5 \varepsilon_a$. Il est admis aussi que le module d'Young non drainé maximal vaut $E_{u,max} = 80$ MPa. Ce module en petite déformation est attribué arbitrairement ici à titre d'illustration et en l'absence de mesures de la vitesse des ondes de cisaillement V_s ou l'utilisation d'une colonne résonnante sur le limon. Les courbes obtenues ainsi sont reportées dans le plan $(\Delta\varepsilon_{aSA}, E_u)$ de la [figure 3a](#) pour des indices de plasticité allant de 10 à 200. Les points expérimentaux tirés de l'essai

triaxial cyclique, sont reportés sur le graphique. Ces points sont groupés autour des courbes empiriques $I_p = 10$ et 15 qui reflètent à peu près l'indice de plasticité du limon.

Différents auteurs ont proposé de relier l'amortissement D au rapport G/G_{\max} au moyen de formulations empiriques appropriées. La relation polynomiale en G/G_{\max} de Ishibashi et Zhang (1993) est mise en œuvre ici. Elle est paramétrée aussi en fonction de l'indice de plasticité I_p . Elle est constituée de deux termes :

$$D_{I_p} = 0,167 [1 + \exp(-0,0145 (I_p)^{1,3})] \quad D = D_{I_p} [0,586 (G/G_{\max})^2 - 1,546 (G/G_{\max}) + 1] \quad (6)$$

Dans ces expressions, l'amortissement minimal pour $\gamma = 0$ est $D_{\min} = 0,039 D_{I_p}$, tandis que l'amortissement maximal pour $\gamma = \infty$ est $D_{\infty} = D_{I_p}$. Les courbes calculées par ces expressions sont reportées dans le plan $(\Delta\varepsilon_{aSA}, D)$ de la [figure 3b](#). Les points expérimentaux tirés de l'essai triaxial cyclique sont groupés autour de la courbe $I_p = 15$, pour un indice de plasticité qui n'est pas trop éloigné de celui du limon. L'amortissement prévu par les lois empiriques croît vers une asymptote, alors que la mesure recueillie pendant la séquence de cycles y_8 se trouve en retrait par rapport à celle de la séquence y_7 .

5. Conclusion

Une méthode d'identification des paramètres dynamiques d'un sol est proposée. Elle s'applique aux courbes contraintes et déformations qui sont enregistrées au cours d'un essai triaxial cyclique. Des approximations en série de Fourier des courbes expérimentales sont calculées au préalable sur un intervalle donné des enregistrements. Partant de ces courbes et après filtrage pour éliminer le bruit des mesures, il est possible d'identifier les paramètres caractéristiques des boucles d'hystérésis recueillies pendant les séquences de cycles successives appliquées à l'éprouvette. La méthode trouve un intérêt dans sa capacité à décrire des boucles distordues qui s'observent quand l'amplitude cyclique de la déformation imposée augmente et produit une réponse de plus en plus non-linéaire. La méthode proposée pour identifier les propriétés dynamiques à partir des courbes triaxiales semble donner satisfaction. Elle est adaptable aux différentes modalités pratiques de mise en œuvre de l'essai triaxial (amplitude, fréquences, durée des séquences de cycles). Elle peut s'appliquer à toute ou partie des séquences de cycles. Elle a été mise en œuvre avec succès à de nombreux essais triaxiaux cycliques effectués sur des sables, des limons et des argiles.

6. Références bibliographiques

- ASTM (American Society for Testing and Materials, 1996) ASTM standard D3999-11, Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus, *ASTM Standards*, 14 p.
- El Mohtar C.S., Drnevich V., Santagata M., Bobet A. (2013) Combined resonant column and cyclic triaxial tests for measuring undrained shear modulus reduction of sand with plastic fines. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 36, n° 4, pp. 1-8.
- Ishibashi I., Zhang X.J. (1993) Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, vol. 33, n° 1, pp. 182-191.
- Vardanega P. J., Bolton M. D. (2013). Stiffness of clays and silts: normalizing shear modulus and shear strain. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, n° 9, pp. 1575-1589.