I. Notions prérequises à la réalisation du TP

A) La consolidation primaire et les tassements

Sous l'action des charges appliquées (fondations, remblais ...), il se développe dans les sols des contraintes verticales qui entraînent des déformations. Les déplacements verticaux vers le bas sont appelés **tassements**.

Le tassement est dû à la compressibilité du sol, c'est à dire au fait qu'il peut diminuer de volume. Puisque les grains solides sont considérés incompressibles, la compressibilité (et donc le tassement) sont essentiellement dus à la diminution du volume des vides. Le sol étant en général supposé saturé, la diminution du volume des vides résulte de l'évacuation de l'eau contenue dans ces derniers. Par conséquent, le sol subit une diminution de volume correspondant au volume d'eau expulsé: ce phénomène est appelé la **consolidation primaire** et il peut être de grande ampleur (entraînant des tassements importants) dans les **sols fins** telle que les argiles.

Par ailleurs, la perméabilité des sols fins étant faible (l'eau interstitielle circule lentement), l'évacuation de l'eau des vides ne s'effectue pas instantanément mais peut prendre un temps relativement long (plusieurs mois ou années).

Pour une bonne durabilité des ouvrages construits (bâtiments, ponts, routes ou voies ferrées sur remblais ...) il est important d'évaluer pour les sols rencontrés la hauteur du tassement final produit, et le temps nécessaire pour atteindre ce tassement final. Au cours de ce TP, vous apprendrez à mesurer à partir de l'essai œdométrique les paramètres utilisés pour l'évaluation de la **hauteur et du temps de tassement.**

B) L'essai œdométrique

1. Dispositif expérimental

L'œdomètre est un appareil de chargement permettant la réalisation de **compressions verticales** pour lesquelles les **déformations horizontales sont empêchées** par une bague (moule métallique rigide).

L'appareil comprend une cellule et un bâti de chargement.

- La **cellule** : elle est présentée sur le figure 1. L'échantillon de sol à étudier, de forme cylindrique (section S, hauteur initiale h0), est placé entre deux pierres poreuses saturées, dans une bague de même diamètre intérieur que l'échantillon.
- Le **bâti** de chargement : il permet d'appliquer sur le piston reposant sur la pierre poreuse supérieure une force Q et de la maintenir constante pendant un temps donné.

On impose ainsi à l'échantillon:

- une contrainte totale verticale constante: = Q/S,
- des déformations radiales (horizontales) nulles,
- le système de drainage permet à l'eau de s'évacuer ou d'entrer dans l'échantillon suivant des trajets verticaux ascendant et descendant, tout en permettant au sol de rester saturé.

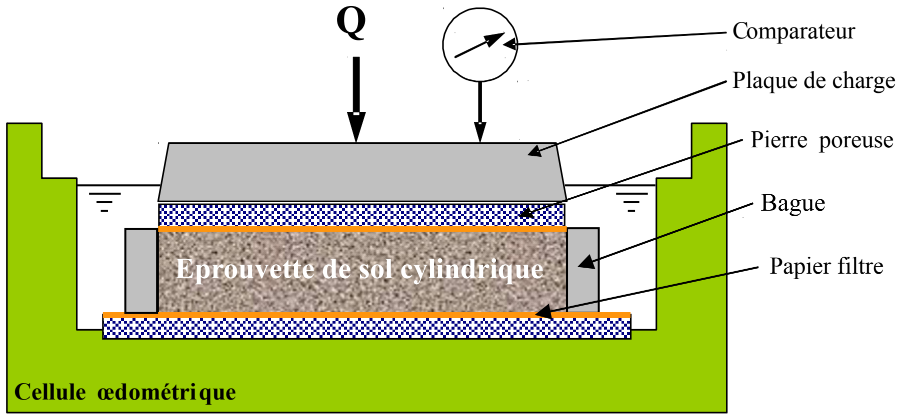

Figure 1: représentation schématique d'une cellule œdométrique

2. Principe et courbes de consolidation et de compressibilité

L'essai consiste à mesurer la variation de hauteur en fonction du temps de l'échantillon de sol soumis à une contrainte . Normalement ces mesures s'effectuent pendant 24 h pour un donné. Au bout de 24 h on considère que la consolidation primaire est terminée. On procède alors à un 2ème chargement sur le même échantillon avec une contrainte en générale deux fois supérieure à la contrainte précédente, et ainsi de suite.

L'essai œdométrique permet de tracer **deux types de courbes**:

- pour une contrainte de chargement donnée, la mesure du tassement Δh en fonction du temps t permet de tracer la **courbe de consolidation** sous la forme $\Delta h = f(\log t)$ ou $\Delta h = f(\sqrt{t})$. A partir de ces courbes on peut calculer le **coefficient de consolidation** c_V (m^2/s) grâce auquel on peut calculer le temps de tassement d'une couche de sol en place sous une charge quelconque en utilisant la relation:

$$t = \frac{T_V \times h_D^2}{c_V} \tag{1}$$

où: t est le temps de tassement (s),
h_D la hauteur de drainage de la couche de sol (m),
T_V le facteur temps (un paramètre sans dimension).

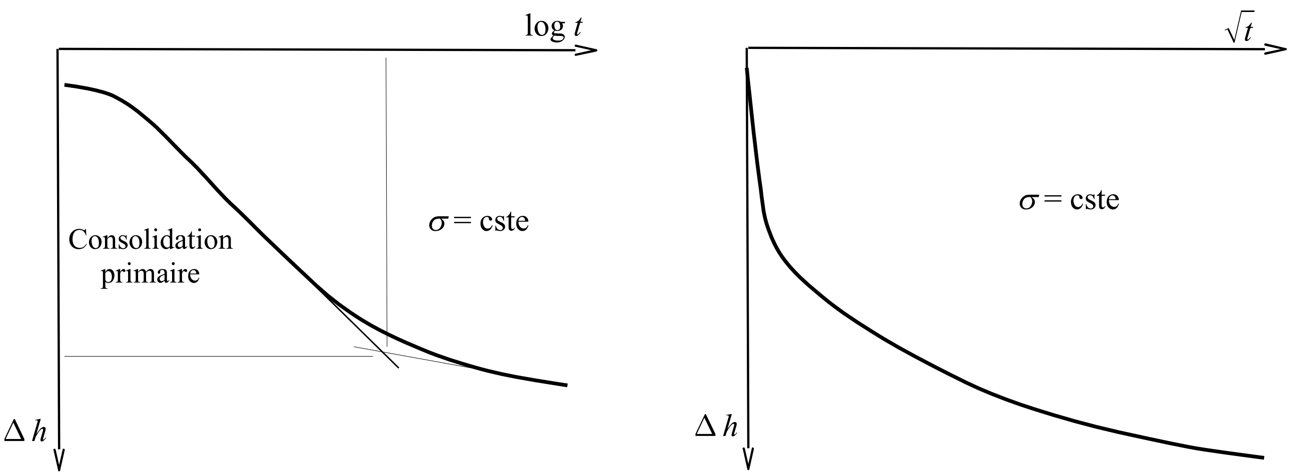

Figure 2: courbes de consolidation.

- une **courbe de compressibilité** sous la forme $e = f(\log \sigma')$, où e est l'indice des vides correspondant aux tassements finaux mesurés à la fin de chaque palier de chargement sous une contrainte σ (notons qu'en condition œdométrique l'évolution de l'indice des vides e est équivalente à l'évolution de la hauteur h de l'échantillon de sol puisqu'il existe une relation directe entre les deux: $\Delta h / h_0 = \Delta e / (1 + e_0)$).
  A partir de cette courbe on peut déterminer:
  - la **contrainte préconsolidation** σ'_p qui correspond à la plus forte contrainte à laquelle a été soumis le sol dans sa vie,
  - l'**indice de compression** C_c (sans dimension) utilisé pour calculer le tassement de la couche de sol lorsque celui-ci est soumis à une contrainte supérieure à σ'_p,
  - l'**indice de gonflement** C_s (sans dimension) utilisé pour calculer le tassement de la couche de sol lorsque celui-ci est soumis à une contrainte inférieure à σ'_p ou sur des cycles de déchargement-rechargement.

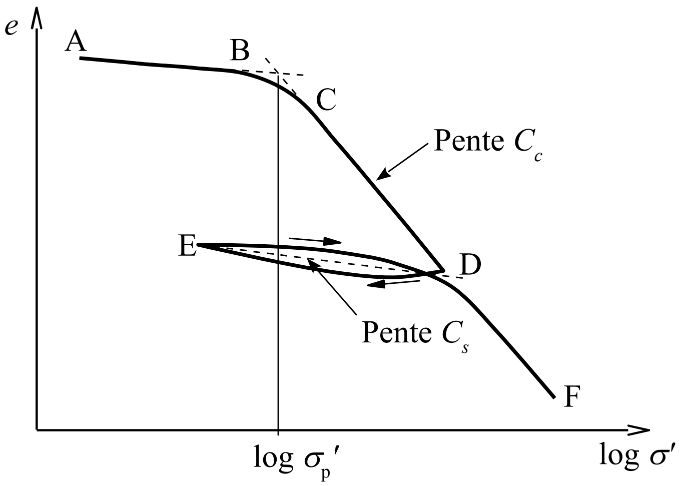

Figure 3: courbe de compressibilité dans le plan (e – log σ').

La **courbe de compressibilité** peut également être tracée sous la forme $\varepsilon = \Delta h / h_0 = f(\sigma')$. Par analogie avec le module de Young on définit le **module oedométrique** $\boldsymbol{E_{oed}} = \Delta\sigma' / \Delta\varepsilon$ qui peut également être utilisé pour calculer le tassement de la couche de sol :

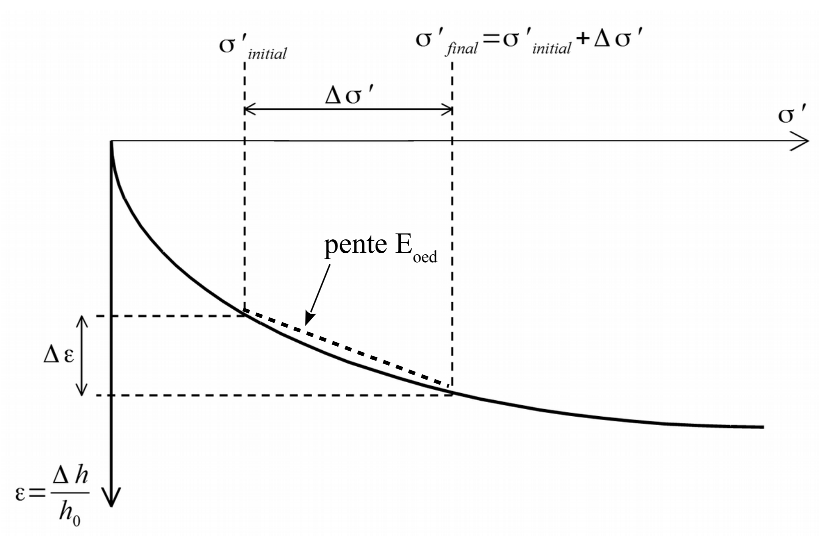

Figure 4: courbe de compressibilité dans le plan (ε – σ').

II. Etude de la courbe de consolidation d'une argile

Un échantillon d'argile a déjà été monté dans la cellule oedométrique, chaque groupe d'étudiants effectue sur ce même échantillon d'argile un nouveau palier de chargement conforme au plan de charge indiqué derrière les bâtis de chargement.

A) Préparation et manipulation

Calculez la masse additionnelle à disposer sur le plateau de chargement du bâti pour obtenir une contrainte verticale sur l'échantillon conforme à celle donnée dans le plan de charge. Un bras de levier permet de multiplier par un facteur de 10 la force créée par l'application des masses, et le diamètre de l'échantillon est de 70 mm.

Préparez un tableau de mesures pour noter, aux temps normalisés suivants, les valeurs de tassement Δh_i lues sur le comparateur :

t_i = 0, 6, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 900, 1800, 3600 et 7200 secondes.

Noter la valeur Δh à t = 0, puis placer la masse sur le plateau. Relever les valeurs suivantes du tassement.

B) Détermination du coefficient de consolidation c_V

On utilise la méthode de Casagrande pour déterminer c_V (suivant une version simplifiée dans le cadre de ce TP). Cette méthode consiste à tracer la courbe $\Delta h = f(\log t)$.

On détermine $\Delta h_{(U=100\%)}$ le tassement obtenu à la fin de la consolidation primaire par construction graphique. $\Delta h_{(U=100\%)}$ correspond à l'ordonnée du point d'intersection entre la tangente à la courbe de tassement au point d'inflexion et la tangente à la partie finale de la courbe (voir la figure 5). Le temps final de tassement de consolidation primaire t_{100} correspond à l'abscisse de ce point.

$\Delta h_{(U=50\%)}$, correspondant au tassement à 50 % de la consolidation primaire, est égal à $\Delta h_{(U=100\%)}/2$. Cette valeur de $\Delta h_{(U=50\%)}$ est obtenue après un temps t_{50} qu'on lit en abscisse du graphique (figure 5). C'est cette valeur de t_{50} (temps nécessaire pour obtenir 50 % de la hauteur de tassement) que l'on utilise pour calculer c_V .

Pour une consolidation réalisée à 50 %, la valeur du facteur temps est $T_V = 0{,}197$. La valeur de c_V est alors donnée par:

$$c_V = \frac{T_V \times h_D^2}{t_{50}} = \frac{0{,}197 \times h^2}{4 \times t_{50}}$$

1/ Effectuer la construction graphique de Casagrande, en déduire la valeur du coefficient de consolidation et la comparer aux ordres de grandeur donnés ci-après.

2/ Comparer les valeurs de t_{50} et t_{100} : exprimer le temps nécessaire pour réaliser la deuxième moitié du tassement (de $\Delta h_{(U=50\%)}$ à $\Delta h_{(U=100\%)}$) en fonction de t_{50}.

A titre indicatif, voici des ordres de grandeurs de c_V en fonction du type de sol :

- pour les argiles : $2.10^{-8} < c_V < 4.10^{-7}$ m²/s,
- pour les argiles sableuse : c_V de l'ordre de 10^{-7} m²/s,
- pour les limons : c_V de l'ordre de 5.10^{-6} m²/s.

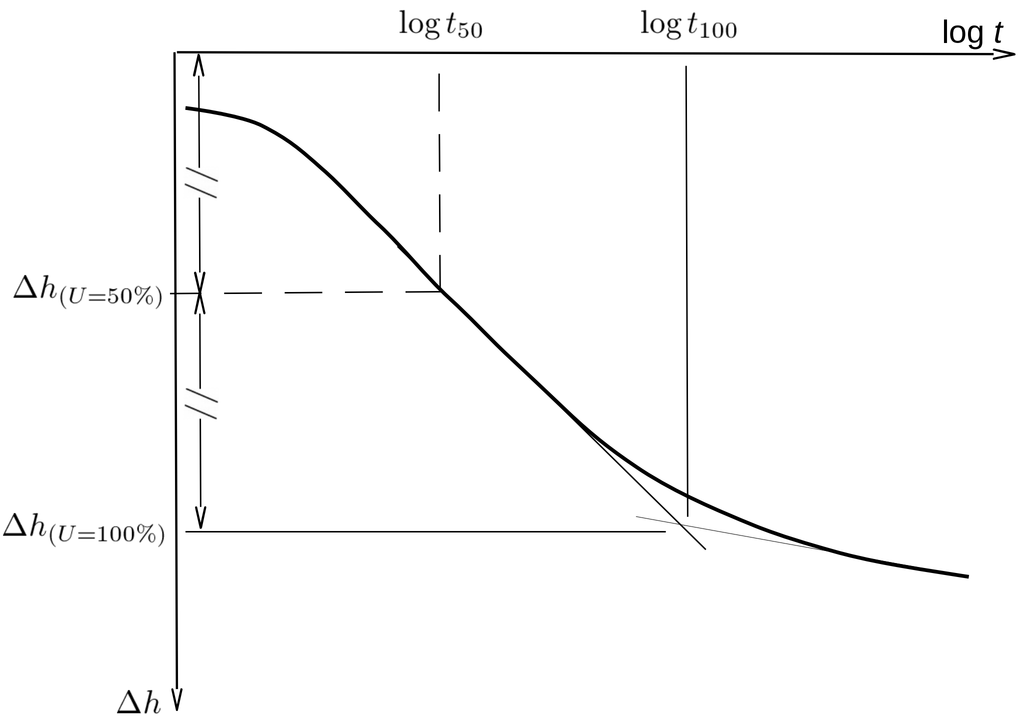

Figure 5: exploitation de la courbe de consolidation d'après la méthode de Casagrande

III. Etude de la courbe de compressibilité à partir d'un échantillon de sable

A) Manipulation et mode opératoire

1/ Le montage de l'échantillon AVANT ESSAI est décrit sur les feuilles distribuées en séance.

2/ Pour simuler le fait que cet échantillon de sable a été prélevé en profondeur et a déjà connu une consolidation sous contrainte (due par exemple au poids du sol situé au-dessus) on piquera l'échantillon de sable lors de sa réalisation pour le compacter et on appliquera une pression modérée à la main sur le piston positionné sur l'échantillon.

3/ Effectuer l'essai tel que décrit sur les feuilles distribuées en séance en suivant le plan de chargement indiqué sur le feuille de relevée des tassements.

Formules et données utiles : $\varepsilon_1 = \Delta h/h_0$; $e_0 = \gamma_s / \gamma_d - 1$; $\Delta h/h_0 = \Delta e/(1+e_0)$.
un bras de levier permet de multiplier par un facteur de 10 la force créée par l'application des masses, et le diamètre de l'échantillon est de 70 mm.

B) Exploitation de la courbe de compressibilité

A partir du tracé de la courbe $e = f(\log \sigma')$ on observe que:

- les segments AB et DE sont sensiblement parallèles,
- au-delà de C, le tracé CF en passant par D forme une partie rectiligne.

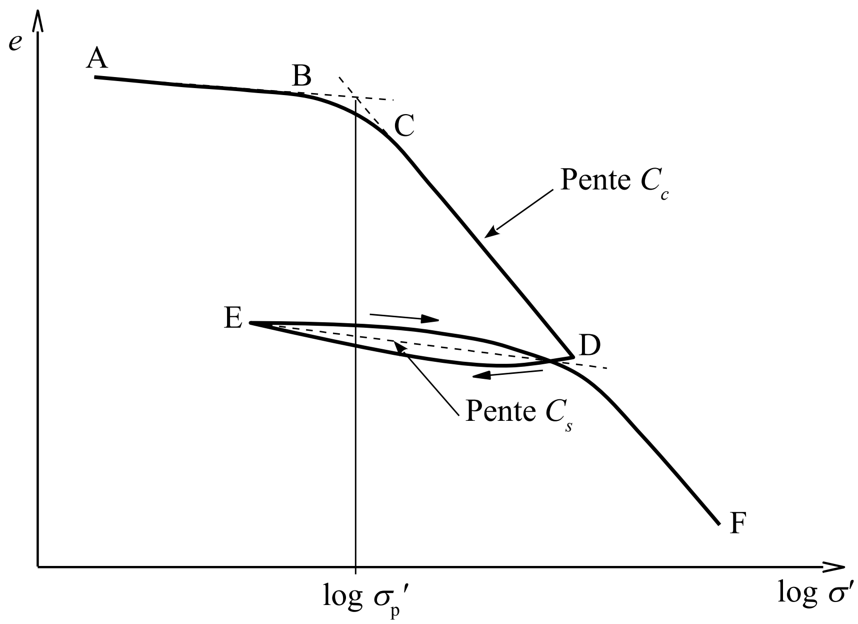

Figure 6: exploitation de la courbe de compressibilité.

On détermine:

- la **contrainte de préconsolidation** σ'_p comme la contrainte correspondant au point d'intersection des deux droites tangentes à AB et CF,

- l'**indice de compresssion** C_c comme la pente (au signe près) de la courbe de consolidation vierge (c'est-à-dire la partie de la courbe de compressibilité au-delà du point C),

$$C_c = \left| \frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma')} \right|$$

- l'**indice de gonflement** C_s comme la pente moyenne (au signe près) de la courbe de compressibilité calculée sur un cycle de déchargement-rechargement. En général C_s est de l'ordre de $C_c/10$

$$C_s = \left| \frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma')} \right|$$

1/ Tracez la courbe $e = f(\log \sigma')$, déterminer alors la valeur de la contrainte de préconsolidation σ'_p et calculez les valeurs des indices de compression C_c et de gonflement C_s.
Comparer les valeurs de C_c **et** C_s**.**
A quel profondeur devrait se situer cet échantillon de sol pour le considérer comme normalement consolidé ? (on supposera l'ensemble du sol constitué uniquement du sable utilisé pour l'essai).

2/ Tracer la courbe $\varepsilon = f(\sigma')$ en déduire la valeur du module oedométrique E_{oed} pour un accroissement de contrainte $\Delta\sigma'$ de 200 kPa à partir d'une contrainte initiale de 300 kPa.

3/ Si le sol est normalement consolidé, le module oedométrique E_{oed} est relié à l'indice de compression C_c par :

$$E_{oed} = \frac{1+e_0}{C_c} \frac{\sigma'_{final} - \sigma'_{initial}}{\log\left(\sigma'_{final} / \sigma'_{initial}\right)}$$

Comparer la valeur de E_{oed} déduite de l'expression ci-dessus avec celle obtenue à partir de la courbe $\varepsilon = f(\sigma')$.

A titre indicatif, On peut considérer qu'un sol est :
- peu compressible lorsque Cc < 0,2,
- compressible lorsque 0,2 < Cc < 0,7,
- très compressible lorsque 0,7 < Cc .

Ordre de grandeur du module oedométrique en fonction du type de sol :

	E_{oed} (MPa)
- argile molle	0,1 à 1
- argile moyenne	0,5 à 4
- argile raide	1 à 10
- limon uniforme	3 à 35
- sable	15 à 50
- gravier	30 à 120

IV. Mesures de perméabilité

La loi de Darcy exprime que le **vitesse moyenne** *v* de l'eau qui s'écoule dans le sol est **proportionnelle au gradient hydraulique** *i*:

$$v = k \, . \, i$$

Le coefficient de proportionnalité *k* est appelé la **perméabilité**, sa dimension est celle d'une vitesse. Plus un sol est perméable plus la valeur de *k* sera élevée.

Sol	gravier	sable	limon	argile
k (m/s)	1 à 10^{-3}	10^{-3} à 10^{-5}	10^{-5} à 10^{-8}	10^{-8} à 10^{-13}

A) Mesure de perméabilité sur l'argile avec un perméamètre à charge variable

1/ Déterminer la perméabilité de l'argile sachant que pour un perméamètre à charge variable la perméabilité est donnée par :

$$k = \frac{s \, . \, L}{S(t_1 - t_0)} \, . \, \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$

avec :

S = section de l'échantillon,
L = hauteur de l'échantillon,
s = section du tube d'alimentation,
$h0$ = hauteur de départ à t_0,
$h1$ = hauteur à la fin de l'essai à t_1 .

B) Mesure de perméabilité d'un sable avec un perméamètre à charge constante

2/ Déterminer la perméabilité du sable sachant que :

- le gradient est hydraulique est donné par : $i = \Delta h / L$, avec Δh la perte de charge et L la distance parcourue par l'eau
- la vitesse fictive de l'eau est donnée par $v = Q / S$, où Q est le débit mesuré et S la section de l'échantillon (de diamètre 75 mm).

3/ Comparer la perméabilité mesurée du sable à la valeur obtenue à l'aide de la formule empirique de Hazen : $k = 10^4 (d_{10})^2$ avec d_{10} en m (voir la courbe granulométrique du sable utilisé à la page suivante) et k en m/s.

4/ Comparer et discuter les valeurs de perméabilité obtenues pour l'argile et le sable.

N'oubliez pas d'apporter une introduction et une conclusion à votre travail, et de RANGER ET NETTOYER VOTRE PAILLASSE, MERCI.

Perméabilité : essai à charge constante
Courbe granulométrique du sable utilisé