

LIBERT Guillaume

MEKOUI Mohamed

DRAPIEWSKI Brice

TP 2B : ETUDE DU TASSEMENT DES SOLS

Essai œdométrique et mesure de perméabilité

I) L'étude :

1) **OBJECTIFS** : Quantifier l'amplitude et la durée de tassements sous un remblai autoroutier construit sur un sol multicouche.

A partir d'essais de laboratoire, on demande de rendre sous la forme d'une note d'études :

- La valeur du tassement total prévisible sous le remblai (S_t)
- Le temps nécessaire pour obtenir 99.40% de ce tassement total
- L'épaisseur totale de remblai supplémentaire à mettre en œuvre pour obtenir en 1 an l'intégralité du tassement total (S_t)

2) Données du problème :

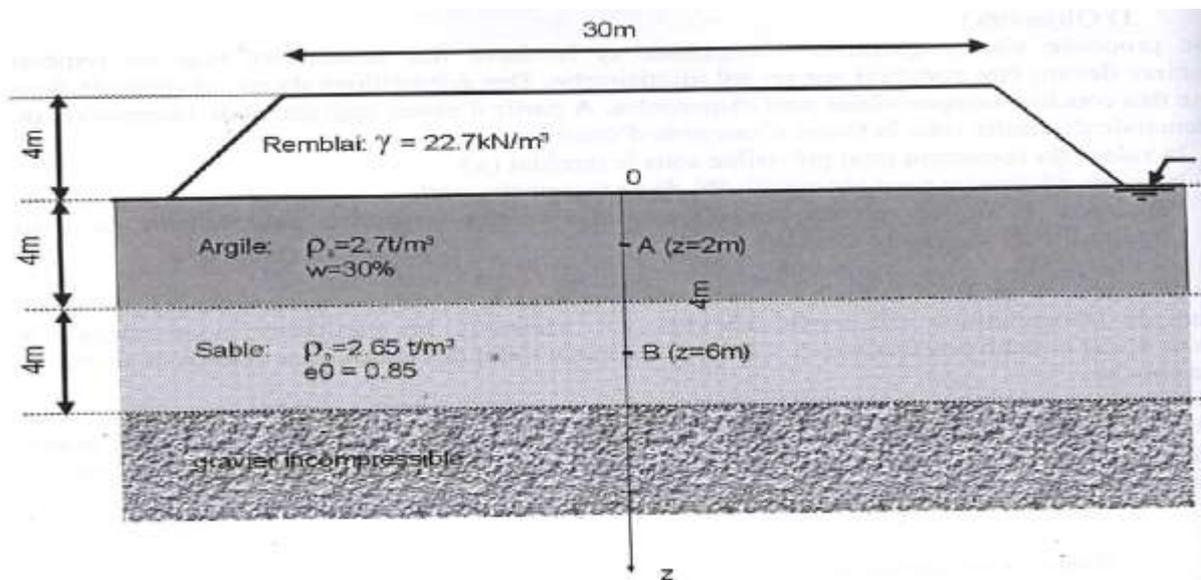


Figure 1 : Schéma en coupe du remblai autoroutier et du sol porteur

3) Déroulement de l'étude :

L'étude est composée de 4 parties :

- Ière partie : Etude du tassement des couches de sable et d'argile en fonction du temps
- IIème partie : Etude du tassement des couches de sable et d'argile en fonction de la charge
- IIIème partie : Mesure de la perméabilité de l'argile sous charge constante
- IVème partie : Application au calcul de tassement sous le remblai routier

4) Moyens expérimentaux employés et rappels théoriques:

- Principe de consolidation des sols fins :

Sous l'action de charge extérieure d'un sol saturé se développe des gradients hydrauliques. L'eau s'écoule de manière non permanente des zones de fortes surpressions vers celles de surpression nulle.(figure 2)

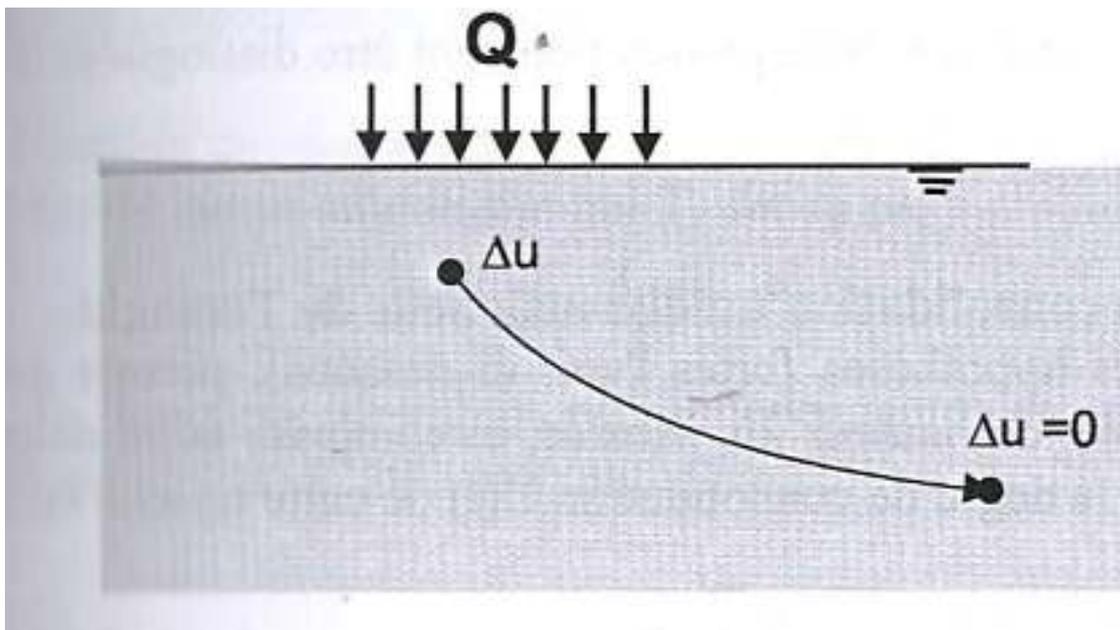
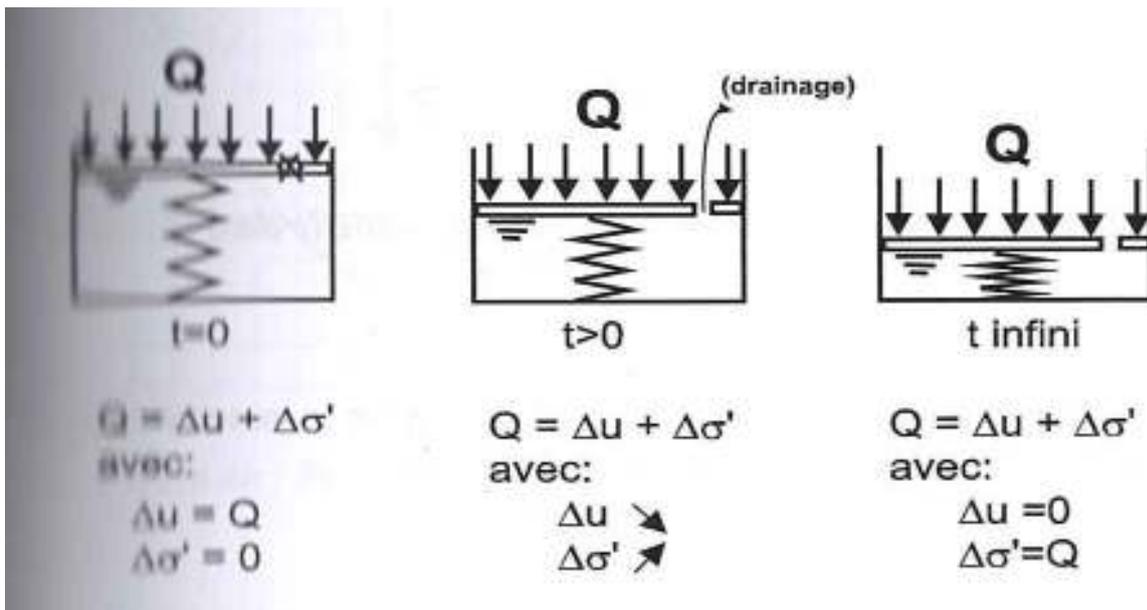


Figure2: Principe d'écoulement d'eau sous l'action des surpressions interstitielles

Au cours de ce drainage, les surpressions diminuent alors que les contraintes effectives augmentent puisque le chargement est repris par le squelette solide du sol. Ce squelette subit alors des déformations et des tassements.

L'écoulement s'arrête lorsqu'en tout point la surpression s'est annulée=CONSOLIDATION.

- Analogie mécanique :



- Théorie de consolidation unidimensionnelle de Terzaghi :

Le degré de consolidation $U(t)$ est défini comme le rapport entre le tassement $s(t)$ de la couche au temps t et le tassement S^∞ de cette même couche à t infini :

$$U(t) = \frac{S(t)}{S^\infty}$$

On définit le facteur de temps adimensionnel Tv par :

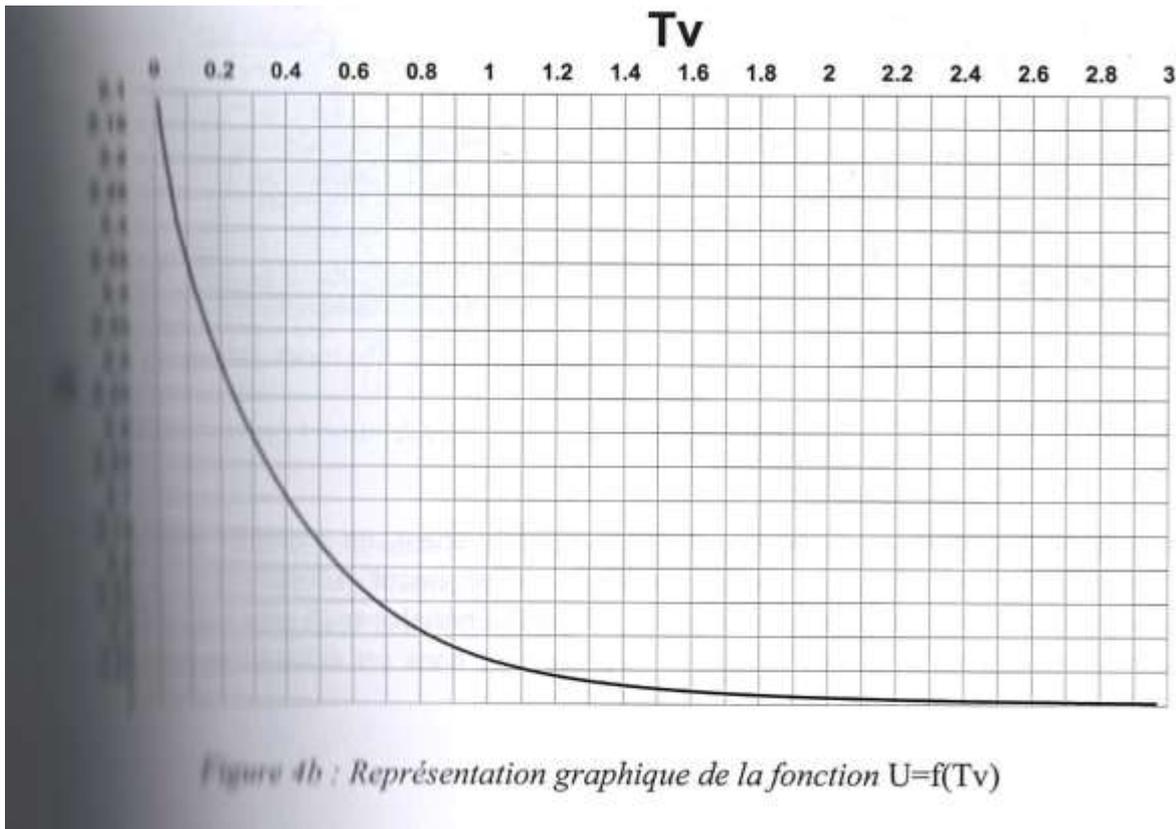
$$Tv = \frac{Cv}{h^2} \times t$$

Cv : coefficient de consolidation du sol

h : $\frac{1}{2}$ de la hauteur de la couche d'argile étudiée

t : temps*

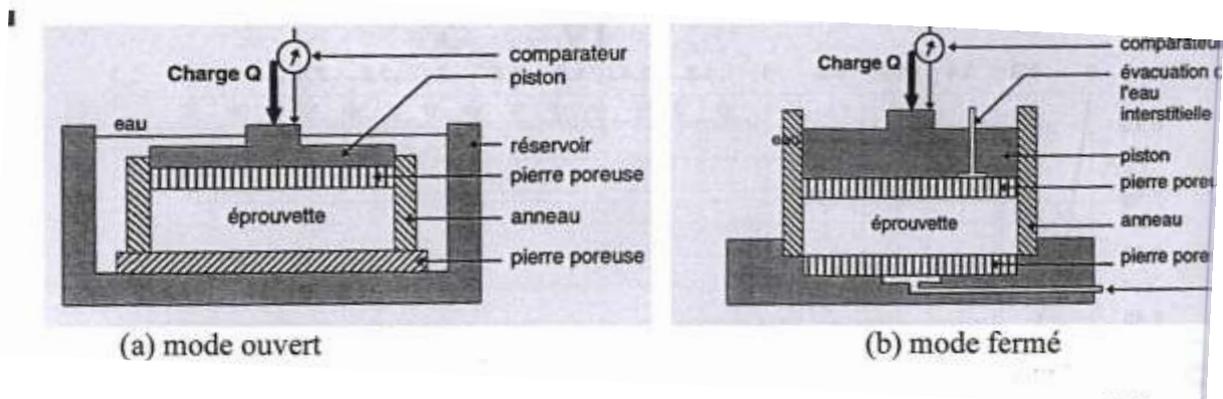
On définit une fonction $U(t) = f(Tv)$ indépendante de h , du coefficient de perméabilité du sol k et du module œdométrique du sol E' .



- L'essai œdométrique :

L'essai œdométrique permet le calcul des tassements et de distinguer et caractériser les différentes phases de consolidation primaires et secondaires pour un échantillon donné.

L'œdomètre est un cylindre de diamètre=7cm et de hauteur=2 à 3cm.



On obtient grâce aux mesures des contraintes verticales la déformation axiale (ou verticale)

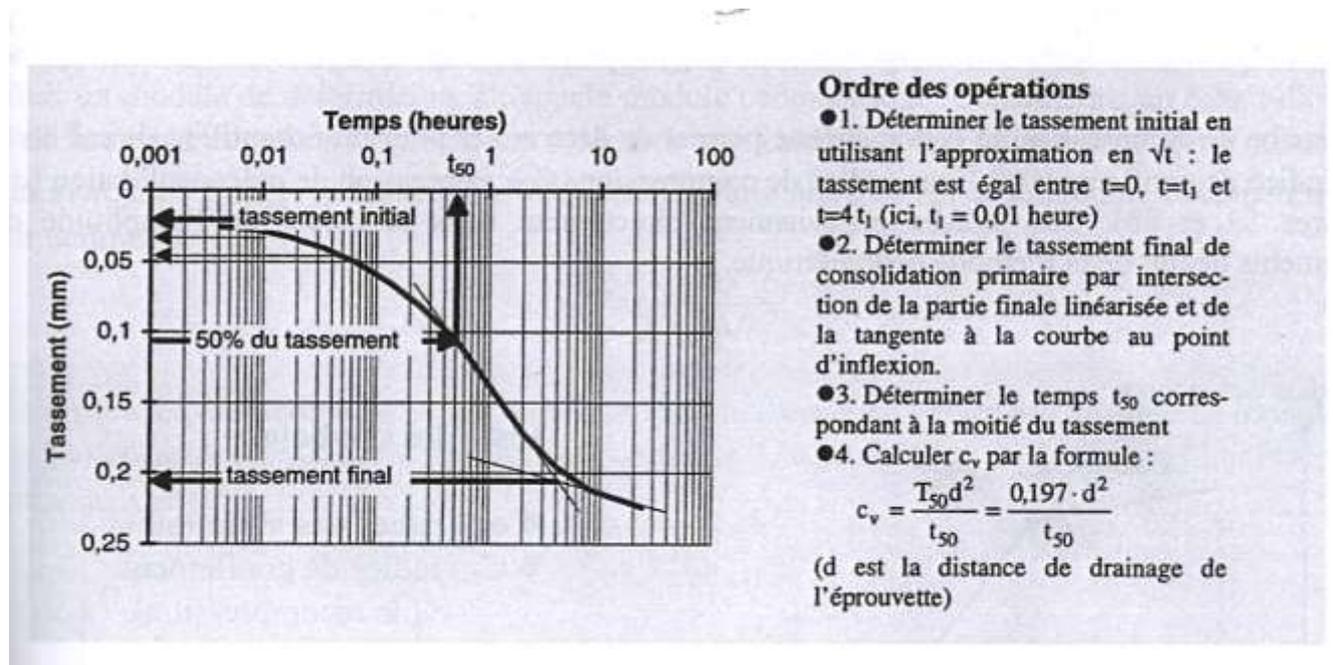
de l'échantillon $\epsilon_{ZZ} = \frac{\Delta h}{h_0}$

- Courbes de consolidation œdométrique :

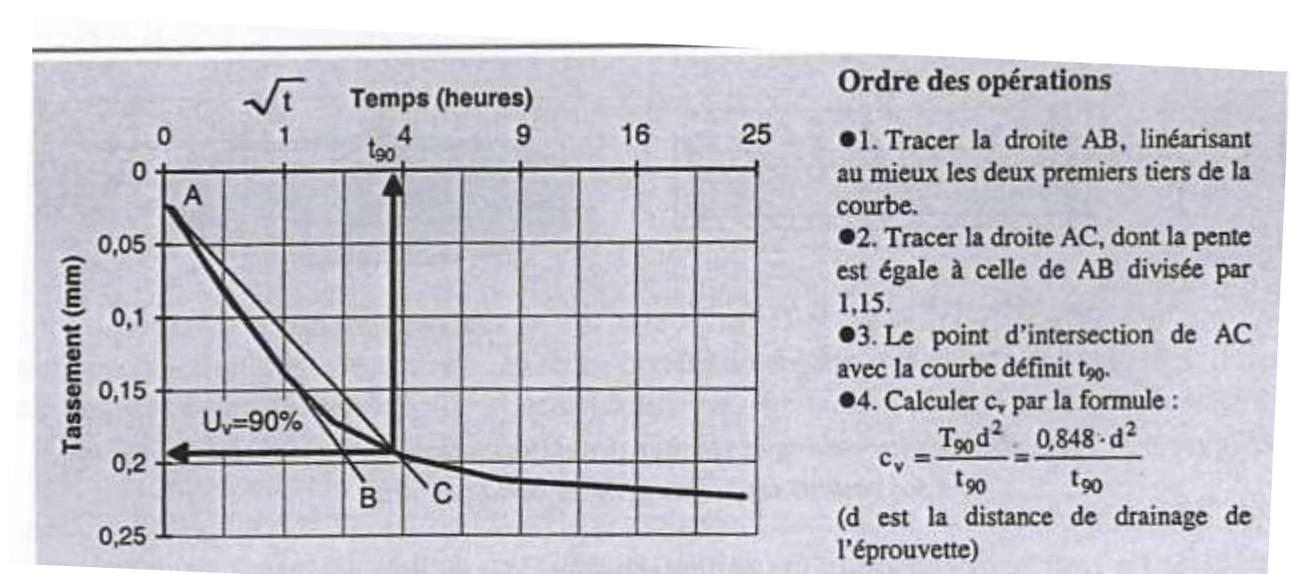
Elles représentent l'évolution du tassement (Δh) de l'éprouvette en fonction du temps ($\lg(t)$ ou \sqrt{t})

Deux types de courbe :

-Modèle de Casagrande :

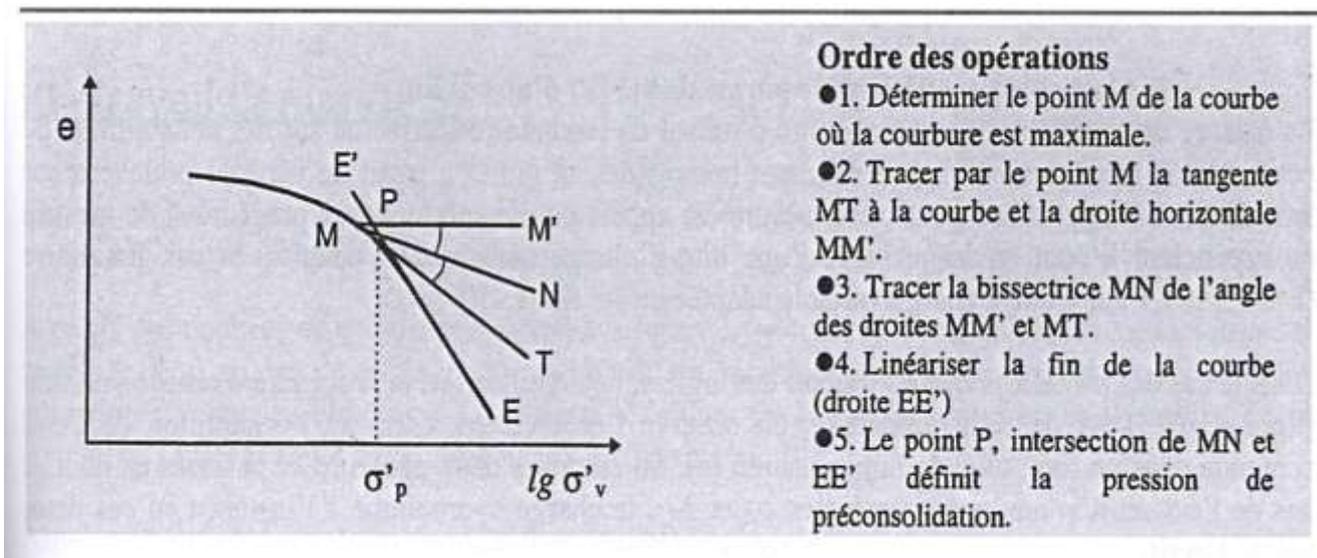


-Modèle de Taylor :



- Courbe de compressibilité œdométrique :

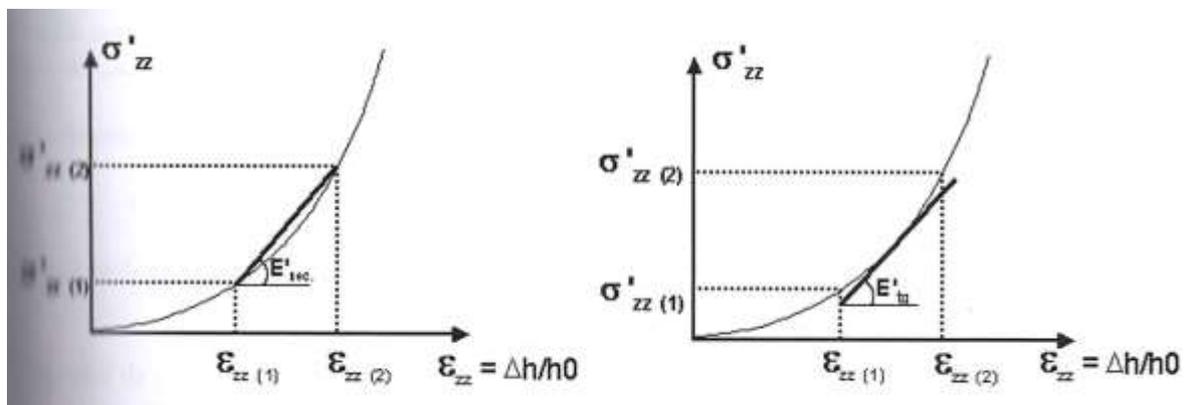
Elle exprime l'évolution de l'indice des vides en fonction de σ'_v .



On détermine ainsi la pression de pré consolidation.

- Courbe contrainte déformation :

Cette courbe exprime l'évolution de la déformation verticale ϵ_{zz} en fonction de la contrainte verticale effective σ'_{zz} .



Comme dans le cadre de la théorie de l'élasticité, cette représentation permet de trouver le module de déformation E' :

$$E' = - \frac{\sigma'_{zz}}{\frac{\Delta h}{h}}$$

III) Travail demandé :

Caractéristiques du matériel :

Cellule œdométrique : mode ouvert, diamètre=71 mm, hauteur=20mm

Dispositif du chargement pour l'argile : Masse du piston=0.2 kg, action du bras de levier=11 fois la charge appliquée, contrainte de pré-charge=55 kPa

Dispositif du chargement pour le sable : Masse du piston=0.2 kg, action du bras de levier=10 fois la charge appliquée, contrainte de pré-charge=0 kPa

La surface de la cellule est de 38.48 cm².

Tout d'abord, nous allons nous efforcer de vérifier le chargement utilisé en laboratoire sur la cellule œdométrique qui serait conforme à la réalité du chargement du remblai sur le terrain.

- Charge utilisé pour l'argile :
 - Charge de contrainte du terrain : $\Delta\sigma_{zz} = h_{remblai} \times \gamma = 4 \times 22.7 = 90.8 \text{ kPa}$

Comme 2.48kPa=1 kg (rapport entre la surface de la cellule et le remblai), la masse à appliquer sur la cellule afin d'avoir les mêmes contraintes que sur le terrain est donc :

$$m = \frac{\Delta\sigma_{zz}}{2.48} = 36.62 \text{ kg}$$

Soit avec une masse de pré-charge égale à 22.2 kg, l'incrément de masse à appliquer devrait être de $36.62 - 22.2 = 14.42 \text{ kg}$ soit avec un bras de levier de 11, la masse à appliquer devrait être de $\frac{14.42-0.2}{11} = 1.30 \text{ kg}$.

La contrainte appliquée sur la cellule avec une masse de 2kg est de 109.50 kPa ce qui représente une augmentation du poids volumique de remblai à 27,37 kN/m³ ou alors à une surépaisseur du remblai de 83 cm.

- Charge utilisée pour le sable :

En utilisant la même méthode que ci-dessus mais en utilisant un bras de levier de 10, on obtient pour le sable :

$$\frac{14.42 - 0.2}{10} = 1.42 \text{ kg}$$

Conclusion : Les chargements disponibles en laboratoire étant échelonnés de kg en kg, il serait difficile d'appliquer la méthode en laboratoire à cet exemple du terrain sans fausser les résultats.

Vérifier les valeurs suivantes :

	Avant remblai	Après remblai
$\sigma'_{zz}(A)$	18.8 kPa	109.6 kPa
$\sigma'_{zz}(B)$	55.4 kPa	146.2 kPa

- **Calculons dans un premier temps ce que représente la contrainte de charge du remblai au point A et au point B:**

$$\Delta\sigma = h_{remblai} \times \gamma_{remblai} = 4 \times 22.7 = 90.80 \text{ kN/m}^3$$

- **Vérification de $\sigma'_{zz}(A)$ avant remblai (couche argile) :**

On connaît $\rho_s=2.7\text{t/m}^3$, $\rho_w=1\text{t/m}^3$ et $w=30\%$ or $w = \frac{M_w}{M_s}$

$$\text{Soit } \gamma'_{sat} = \frac{M_{totale}}{\text{Volume total}} = \frac{M_w + M_s}{V_{eau} + V_s} = \frac{(1+w) \times M_s}{\frac{w \times M_s}{\rho_w} + V_s} = \frac{(1+w) \times \rho_s}{\frac{w \times \rho_s}{\rho_w} + 1} =$$

$$\frac{(1+0.3) \times 27}{\frac{0.3 \times 27}{10} + 1} = 19.40 \text{ kN/m}^3$$

Pour obtenir le γ' , il suffit de soustraire le γ_w au γ'_{sat} soit

$$\gamma'_{argile} = \gamma'_{sat} - \gamma_w = 19.40 - 10 = 9.40 \text{ kN/m}^3$$

Le point A étant situé à 2m sous le niveau du remblai, on calcule la contrainte $\sigma'_{zz}(A)$

$$\sigma'_{zz}(A)_{sr} = h(A) \times \gamma' = 2 \times 9.40 = 18.80 \text{ kN/m}^3$$

	Avant remblai	Après remblai
$\sigma'_{zz}(A)$	18.8 kPa	109.6 kPa
$\sigma'_{zz}(B)$	55.4 kPa	146.2 kPa

Vérification OK !

- **Vérification de $\sigma'_{zz}(A)$ après remblai (couche argile) :**

$$\sigma'_{zz}(A)_{ar} = \sigma'_{zz}(A)_{sr} + \Delta\sigma = 18.80 + 90.80 = 109.60 \text{ kN/m}^3$$

	Avant remblai	Après remblai
$\sigma'_{zz}(A)$	18.8 kPa	109.6 kPa
$\sigma'_{zz}(B)$	55.4 kPa	146.2 kPa

Vérification OK !

- **Vérification de $\sigma'_{zz}(B)$ avant remblai (couche de sable) :**

On connaît $\rho_s=2.65\text{t/m}^3$, $\rho_w=1\text{t/m}^3$ et $e=0.85$

$$\text{Soit } e = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} \text{ soit}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{e \times \gamma_w + \gamma_s}{1 + e} = \frac{0.85 \times 10 + 26.5}{1.85} = 18.92 \text{ kN/m}^3$$

Pour obtenir le γ' , on soustrait de nouveau le γ_w au γ'_{sat} soit

$$\gamma'_{sable} = \gamma'_{sat} - \gamma_w = 18.92 - 10 = 8.92 \text{ kN/m}^3$$

Le point B étant situé à 6m sous le niveau du remblai, dont 4m sous la couche argileuse, on calcule la contrainte $\sigma'_{zz}(B)$

$$\begin{aligned} \sigma'_{zz}(B)_{sr} &= h(\text{argile}) \times \gamma'_{argile} + \frac{h(\text{sable})}{2} \times \gamma'_{sable} \\ &= 4 \times 9.40 + 2 \times 8.92 = 55.40 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

	Avant remblai	Après remblai
$\sigma'_{zz}(A)$	18.8 kPa	109.6 kPa
$\sigma'_{zz}(B)$	55.4 kPa	146.2 kPa

Vérification OK !

- **Vérification de $\sigma'_{zz}(B)$ après remblai (couche argile) :**

$$\sigma'_{zz}(B)_{ar} = \sigma'_{zz}(B)_{sr} + \Delta\sigma = 55.40 + 90.80 = 146.20 \text{ kN/m}^3$$

	Avant remblai	Après remblai
$\sigma'_{zz}(A)$	18.8 kPa	109.6 kPa
$\sigma'_{zz}(B)$	55.4 kPa	146.2 kPa

Vérification OK !

Conclusion : Après avoir effectué ces différents calculs, nous allons pouvoir calculer le coefficient de consolidation du sol pour chaque couche à l'aide de plusieurs méthodes :

- Deux méthodes graphiques de Casagrande et de Taylor
- Une autre méthode par la courbe contrainte-déformation

1) Etude de tassement des couches de sable et d'argile en fonction du temps :

1-1) Etude de tassement de la couche d'argile en fonction du temps :

OBJECTIF : Mesure du coefficient de consolidation du sol C_v de l'argile sous charge constante afin de caractériser la phase de consolidation primaire de ce matériau.

Nature du matériau : Argile saturée

Masse volumique des particules : $\rho_s = 2.7 \text{ t/m}^3$

Teneur en eau : $\omega = 30\%$

$$\text{Indice des vides initial } e = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} = \frac{27 - 19.40}{19.40 - 10} = 0.81$$

Contrainte de pré-chargement : $\sigma_{zzpc} = 55 \text{ kPa}$

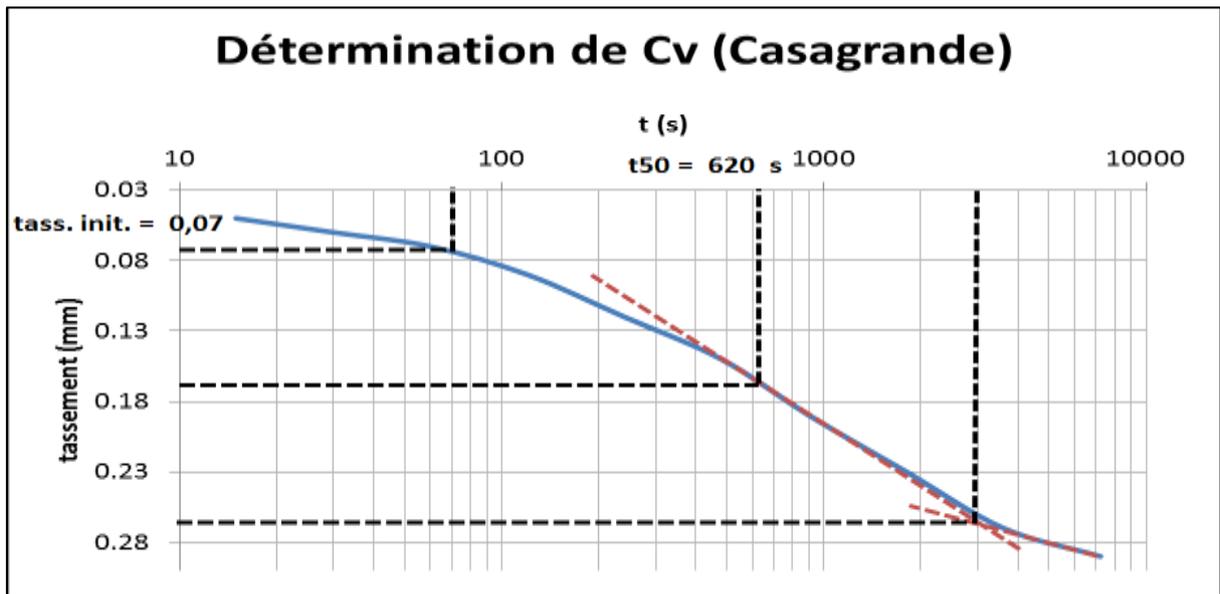
Incrément de contrainte à appliquer : $\Delta\sigma_{zz} = 54.50 \text{ kPa}$

Contrainte totale appliquée : $\sigma_{zz} = \sigma_{zzpc} + \Delta\sigma_{zz} = 109.50 \text{ kPa}$

Relevé des études expérimentales (ANNEXE A):

Temps t	\sqrt{t}	Tassement Δh (mm)
0	0	0
15s	3.9	5
30s	5.5	6
1 mn	7.7	7
2 mn	11	9
4 mn	15.5	12
8 mn	21.9	15
15 mn	30	19
30 mn	42.4	23
1 h	60	27
2 h	84.9	29

- Méthode de Casagrande (méthode à plus long terme) :

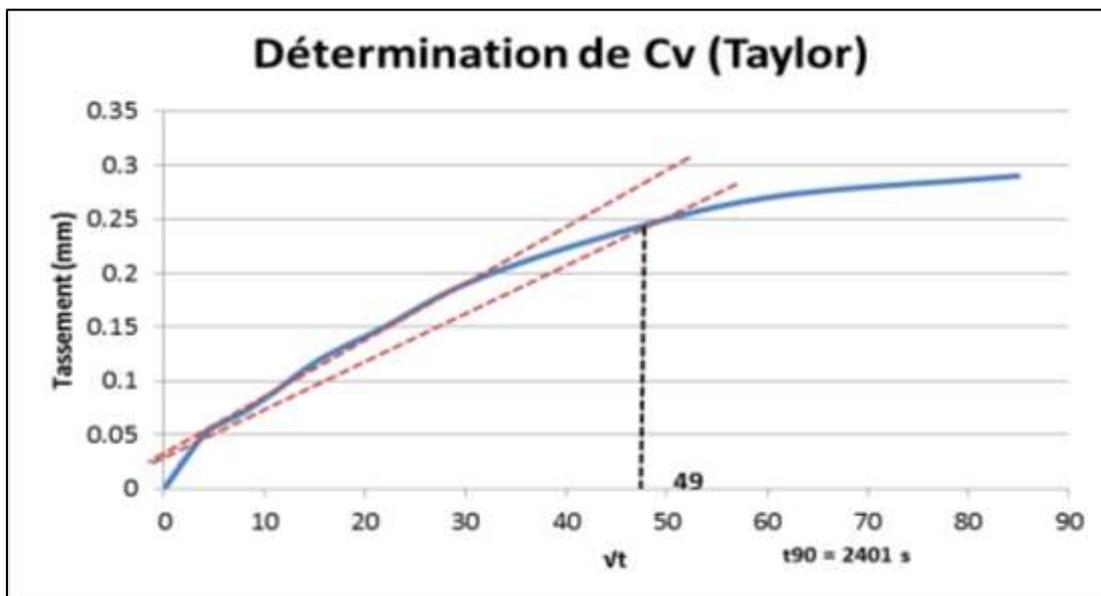


En suivant l'ordre des opérations déterminer dans les rappels théoriques, nous identifions par construction géométrique le $t_{50} = 620s$. En utilisant la formule de Casagrande, nous pouvons effectuer le calcul de C_v avec :

d : distance de drainage de l'éprouvette = 10 mm et $T_{50}=0.197$

$$\text{Soit } C_v = \frac{T_{50} \times d^2}{t_{50}} = \frac{0.197 \times 0.01^2}{620} = 3.18 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Méthode de Taylor (méthode à court terme):



En suivant de la même manière les opérations de la méthode de Taylor, nous identifions par construction géométrique un $t_{90} = 2401 s$. En utilisant la formule rappelée dans le rappel

théorique, nous pouvons effectuer une vérification du calcul de Cv obtenu précédemment avec :

d : distance de drainage de l'éprouvette = 10 mm et T90=0.848

$$\text{Soit } Cv = \frac{T90 \times d^2}{t90} = \frac{0.848 \times 0.01^2}{2401} = 3.53 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

Conclusion : Nous obtenons grâce au tableau en annexe une argile type:

Sol	Sable de Fontainebleau	Argile verte du Sannoisien	Limon d'Orly	Tourbe de Bourgoin
Cv(m2/s)	∞	$3 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$

1-2) Etude de tassement de la couche de sable en fonction du temps :

Pour un sol grenu type sable, il n'y a pas de consolidation primaire car en raison de leur forte perméabilité, l'eau interstitielle n'a pas d'influence sur l'évolution de leurs déformations au cours du temps. La mesure du coefficient Cv et donc l'essai œdométrique n'est pas nécessaire pour la couche de sable.

2) Etude de tassement des couches de sable et d'argile en fonction de la charge :

OBJECTIFS :

- Mesure du module œdométrique E', de la contrainte de pré-consolidation σ'_c et du coefficient de compressibilité Cc de l'argile à la cote verticale z=2m sous le remblai
- Mesure du module œdométrique E', du coefficient de gonflement Cs, du coefficient de compressibilité Cc du sable, à la cote verticale z=6m sous le remblai

2-1) Etude de tassement de la couche d'argile en fonction de la charge :

Nature du matériau : Argile saturée

Masse volumique des particules : $\rho_s = 2.7 \text{ t/m}^3$

Teneur en eau : $\omega = 30\%$

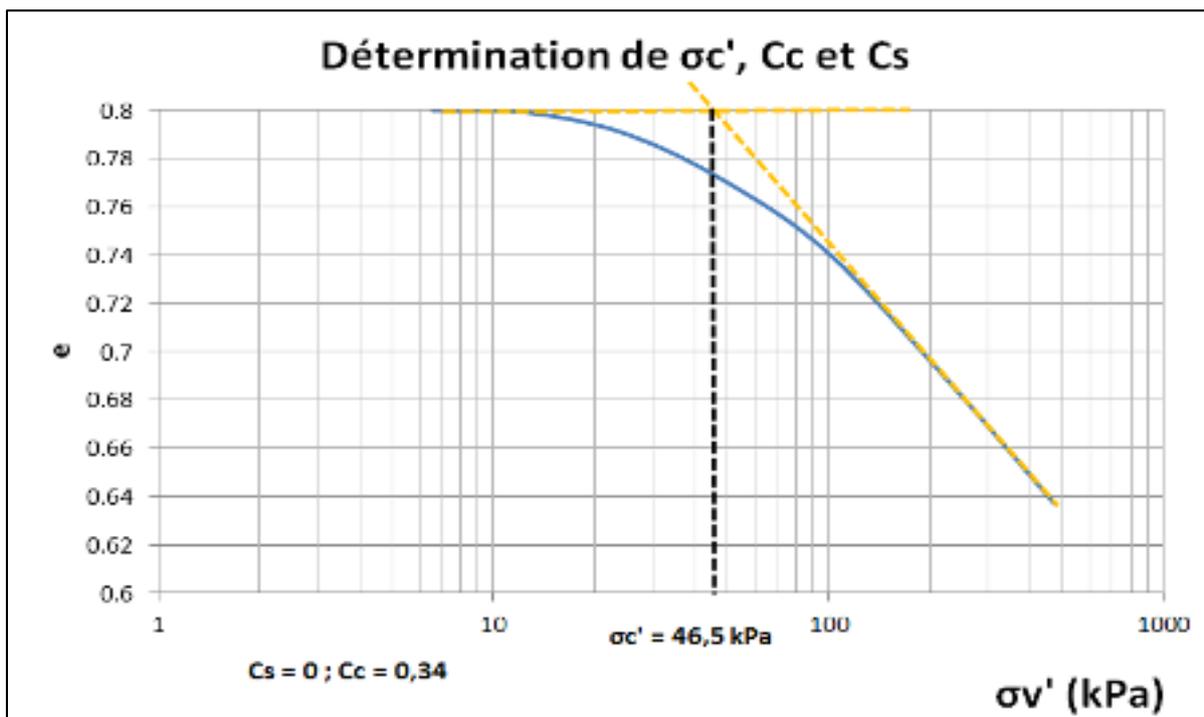
$$\text{Indice des vides initial } e = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w} = \frac{27 - 19.40}{19.40 - 10} = 0.81$$

Contrainte de pré-chargement : $\sigma_{zzpc} = 0 \text{ kP}$

Relevé des études expérimentales (ANNEXE C):

Masse m (kg)	Charge verticale σ_{zz} (kPa)	Tassement Δh (10^{-2} mm)	Δe	Indice des vides $e=e_0-\Delta e$
		24 h		
0	0	0	0	0
0.2+0.25*10	6.6	11.3	$7.53 \cdot 10^{-3}$	0.8
0.2+0.5*10	12.8	16.5	0.011	0.799
0.2+1*10	25.2	29.5	0.02	0.79
0.2+2*10	50	58	0.039	0.771
0.2+4*10	99.5	103	0.069	0.741
0.2+9*10	223.4	180.5	0.121	0.689
0.2+19*10	471.2	257.5	0.173	0.637

- Courbe de compressibilité œdométrique :

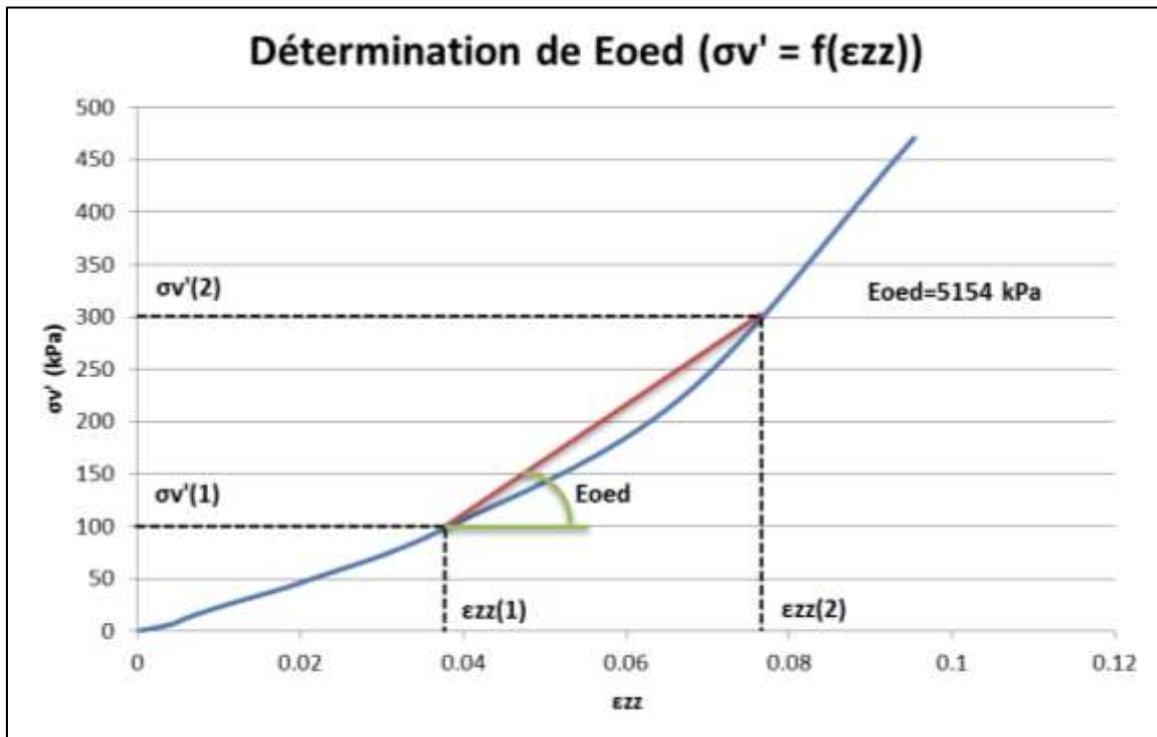


On trouve un $C_c = 0.34$ et une contrainte de pré-consolidation $\sigma'_c = 46.50 \text{ kPa}$

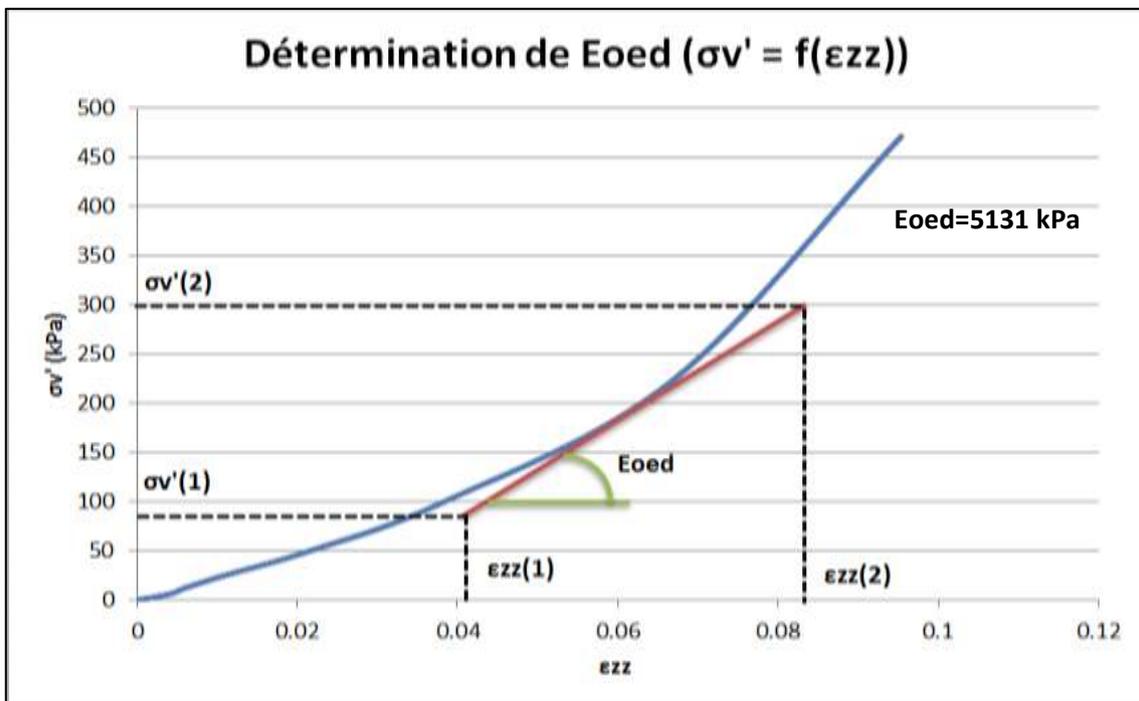
Conclusion : Nous obtenons grâce au tableau en annexe une argile type:

Sol	Sable	Argile raide	Argile moyenne	Argille molle
Cc	$0.01 < C_c < 0.1$	$0.1 < C_c < 0.25$	$0.25 < C_c < 0.80$	$0.80 < C_c < 2.50$

- Courbe de contrainte-déformation :



On trouve par méthode graphique la valeur du module œdométrique sécant= 5154 kPa.



On trouve par méthode graphique la valeur du module œdométrique tangent= 5131 kPa.

Conclusion : Nous obtenons grâce au tableau en annexe une argile type:

Sol	Sable	Argile raide	Argile molle
E' (Mpa)	10<E'<300	1.5<E'<10	0.1<E'<1

2-2) Etude de tassement de la couche de sable en fonction de la charge

Notons tout d'abord que le prélèvement d'échantillons intacts de sols grenus étant pratiquement impossible, les études doivent être menées sur des éprouvettes reconstituées en TP, en respectant les courbes granulométriques et l'état de densité estimé de ces sols sur le terrain.

Nature du matériau : Sable sec ou saturé

Masse volumique des particules : $\rho_s = 2.65 \text{ t/m}^3$

Indice des vides initial $e_0 = 0.85$

Contrainte de pré-chargement : $\sigma_{zzpc} = 0$

La masse de sable à considérer est donc :

$$m = \rho_d \cdot V_{\text{cylindre}}$$

Avec

$$\rho_d = M_s/V = M_s/(V_s + V_v) = \rho_s/(1+e_0) = 1,43 \text{ t/m}^3$$

$$V_{\text{cylindre}} = \pi \cdot h \cdot (\phi/2)^2 = \pi \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot (71 \cdot 10^{-3}/2)^2 = 108 \text{ g}$$

Soit **m = 108 g**

Relevé des études expérimentales (ANNEXE B):

Masse m (kg)	Charge verticale σ_{zz} (kPa)	Tassement Δh (mm)		charge		décharge	
		charge	décharge	Δe	Indice des vides $e = e_0 - \Delta e$	Δe	Indice des vides $e = e_0 - \Delta e$
0	0	0	0.03	0	0.85	0.002775	0.847225
0.2+0.25*10	6.6	0.02	0.07	0.00185	0.84815	0.005475	0.843525
0.2+0.5*10	12.8	0.02	0.08	0.00185	0.84815	0.0074	0.8426
0.2+1*10	25.2	0.041	0.1	0.0037925	0.8462075	0.00925	0.84075
0.2+2*10	50	0.089	0.129	0.0082325	0.8417675	0.0119325	0.8380675
0.2+4*10	99.5	0.15	0.141	0.013875	0.836125	0.0130425	0.8369575
0.2+9*10	223.4	0.255	0.255	0.0235875	0.8264125	0.0235875	0.8264125
0.2+19*10	471.4	0.38	0.38	0.03515	0.81485	0.03515	0.81485

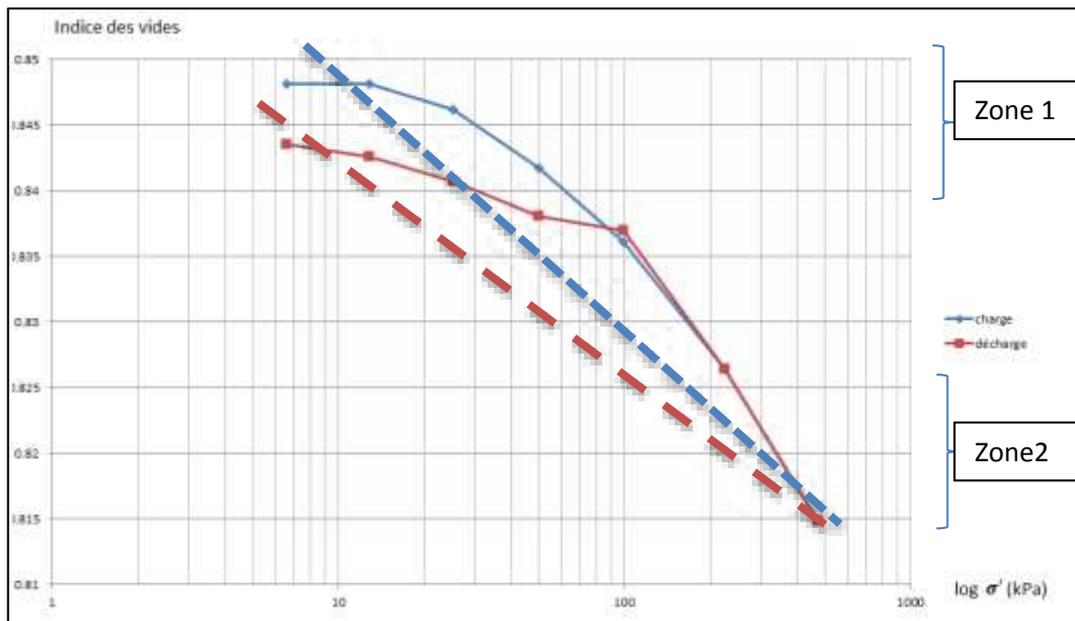


Figure 1 : courbe œdométrique charge-décharge du sable

On observe, d'une part qu'il n'y a pas de pression de consolidation pour le sable.

Dans la zone 1 de la courbe, la variation de volume est notable et provient surtout du réarrangement des grains. Dans la zone 2, elle est faible et provient de la déformation élastique des grains.

On constate aussi que le comportement du matériau n'est pas réversible ; seule, la part liée à la déformation élastique des grains est récupérée.

Enfin, malgré l'incertitude des mesures, on peut donner les coefficients des tangentes bleues et rouge correspondant respectivement à C_c (Indice de compression) et C_s (Indice de gonflement) soit :

- $C_c = 0.018$
- $C_s = 0.014$

3) Mesure de la perméabilité d'une argile :

OBJECTIF : Mesure du coefficient de perméabilité k de l'argile en place (à la cote $z=2m$) sous le remblai

- **Mesure du coefficient de perméabilité de l'argile**

Nature du matériau : argile saturée

Masse volumique des particules : $\rho_s=2.7t/m^3$

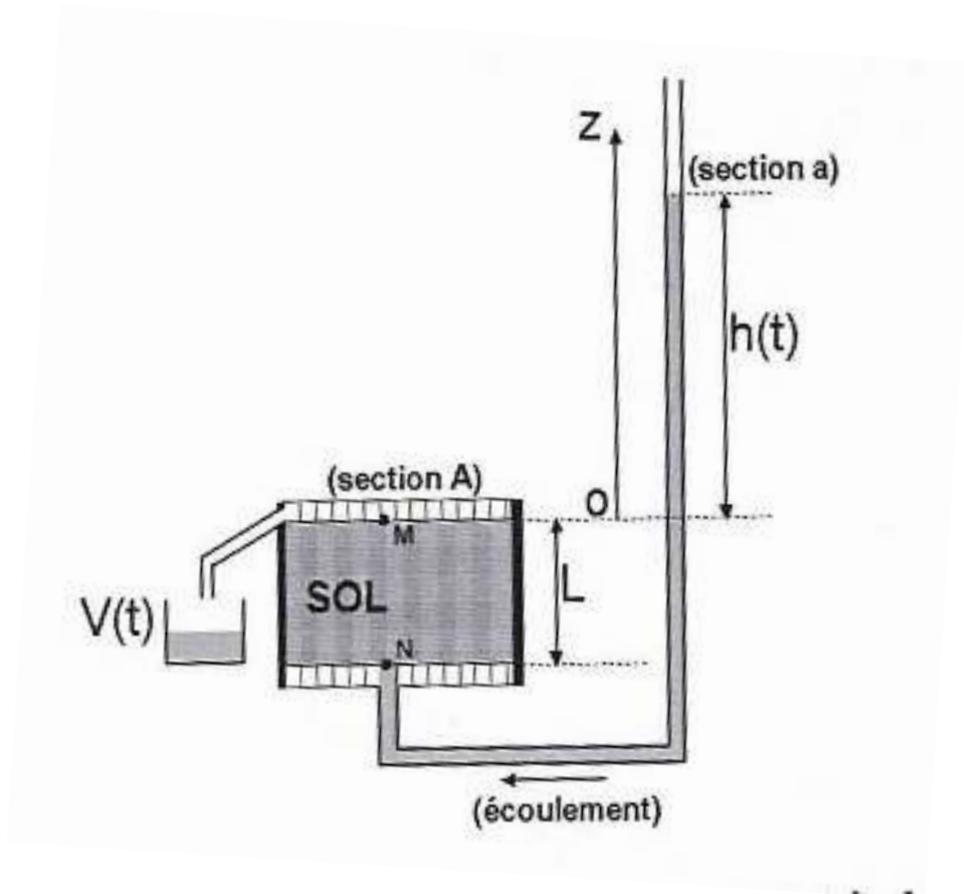
Teneur en eau : $\omega = 30\%$

Contrainte de chargement : $\sigma_{zz}=109.50$ kPa

Hauteur drainée de l'échantillon : $L = 2cm$

Section du tube : $a = 8.04$ mm²

Section de l'échantillon du sol : $A = 38.48 \text{ cm}^2$



Nous pouvons, à partir des charges hydrauliques (remplissage à 45cm + hauteur du tube de 26.60 cm) calculer le coefficient de perméabilité à partir de la formule de Darcy :

$$k = \frac{a \times L}{A \times (t_1 - t_0)} \times \ln\left(\frac{h(t_0)}{h(t_1)}\right)$$

Relevé des études expérimentales (ANNEXE D):

Temps (s)	Charge hydraulique(cm)	Coefficient de perméabilité(m/s)
t0=0	h(t0)=71.6	
t1=1800	h(t1)=71.3	k1=9.75.10 ⁻¹¹
t2=3600	h(t2)=71	k2=9.79.10 ⁻¹¹
t3=5400	h(t3)=70.8	k3=7.37.10 ⁻¹¹
t4=7200	h(t4)=70.7	k4=3.28.10 ⁻¹¹
		moy k= 7.55.10 ⁻¹¹

Conclusion perméabilité : Nous avons confirmation de l'ordre de grandeur du coefficient de perméabilité grâce au tableau ci-dessous :

Sol	Gravier	Sable	Limon	Argile
K (m/s)	10 ⁻² à 10 ⁻³	10 ⁻³ à 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁹	<10 ⁻⁹

On peut grâce à la formule $Cv^* = \frac{k \times E_{oed}}{\gamma_w}$ calculer le coefficient de consolidation soit :

$$Cv^* = \frac{7.55 \cdot 10^{-11} \times 5154}{10} = 3.9 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \text{ pour le module sécant}$$

$$Cv^* = \frac{7.55 \cdot 10^{-11} \times 5131}{10} = 3.87 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} \text{ pour le module tangent}$$

Soit voici un tableau récapitulatif des différents Cv obtenus:

	Méthode de Casagrande	Méthode de Taylor	Méthode module œdométrique Sécant et tangent
Cv (m ² /s)	3.18.10 ⁻⁸	3.53.10 ⁻⁸	≈3.9.10 ⁻⁸

Conclusion sur les Cv: On remarque que les trois méthodes offrent un ordre de grandeur similaire et conforme aux tableaux des annexes.

4) Application au calcul de tassement sous un remblai routier :

- **Calcul du tassement total (St) prévisible dû au remblai pour l'argile :**

Hypothèses :

- La surcharge du remblai est uniforme au sein d'une même couche de sol (largeur du remblai >> épaisseur des couches compressibles)
- On adopte la méthode œdométrique de calcul des tassements en cumulant les tassements calculés à mi-hauteur de chacune des couches compressibles

Tout d'abord, pour calculer le tassement final, il est indispensable de connaître l'indice des vides final qui se calcule par la formule :

$$\Delta e = Cs \times \log\left(\frac{\sigma'p}{\Delta\sigma v}\right) + Cc \times \log\left(\frac{\sigma'vf}{\sigma'p}\right)$$

Soit pour l'argile :

$$Cs = 0 \quad \sigma'vf = 109.60 \text{ kPa} \quad e0 = 0.81$$

$$Cc = 0.34 \quad \sigma'p = 46.50 \text{ kPa} \quad H0 = 4\text{m}$$

$$\Delta e = 0.34 \times \log\left(\frac{109.60}{46.50}\right) = 0.12$$

$$\text{Soit } S_{\infty} = \frac{\Delta e}{(1+e_0)} \times H_0 \text{ soit } S_{\infty} = \frac{0.12}{(1+0.81)} \times 4 = 26.52 \text{ cm}$$

- **Calcul du tassement total (St) prévisible dû au remblai pour le sable :**

On a :

$$\sigma'_{v0} = \sigma'_p$$

$$\Delta e = Cc \times \log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}}\right)$$

$$\sigma'_{vf} = 146.2 \text{ kPa} \quad e_0 = 0.85$$

$$Cc = 0.018 \quad \sigma'_{v0} = 55.4 \text{ kPa} \quad H_0 = 4 \text{ m}$$

$$\Delta e = 0.018 \times \log\left(\frac{146.20}{55.4}\right) = 7,6 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Soit } S_{\infty} = \frac{\Delta e}{(1+e_0)} \times H_0 \text{ soit } S_{\infty} = \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{(1+0.85)} \times 4 = 1.64 \text{ cm}$$

Conclusion sur les tassements : Le tassement du sable est négligeable par rapport à la couche d'argile.

Récapitulatif des résultats :

Point de calcul	Z (m)	H (m)	Contrainte effective initiale (kPa)	Contrainte effective finale (kPa)	Indice des vides final Δe	Tassement des couches (cm)
A	2	4	18.8	109.6	0.12	26.52
B	6	4	55.4	146.2	$7,6 \cdot 10^{-3}$	1.64
					TOTAL	28.16

- **Calcul du temps pour obtenir 99.4% de ce tassement total:**

On considère le tassement terminé lorsque $U=99.4\%$, c'est-à-dire $T_v=2$.

- ✓ Temps que mettra la couche d'argile pour atteindre 99.4% du tassement final

$$\text{Or } Tv = \frac{Cv}{h^2} \times t$$

Soit en prenant les paramètres de l'énoncé, on estime t qui est égal à

$$t = \frac{Tv \times h^2}{Cv} = \frac{2 \times 2^2}{3.5 \cdot 10^{-8}} = \mathbf{7 \text{ ans et } 88 \text{ jours}}$$

✓ Temps que mettra la couche de sable pour atteindre 99.4% du tassement final

De même,

$$Tv = \frac{Cv}{h^2} \times t$$

Soit en prenant les paramètres de l'énoncé, on estime t qui est égal à

$$t = \frac{Tv \times h^2}{Cv} = \frac{2 \times 4^2}{\infty} = 0$$

Le tassement de la couche de sable est instantané.

- **Calcul de la hauteur de remblai supplémentaire pour obtenir en 1 an de tassement total S_t :**

➤ Calcul du facteur de temps Tv correspondant à un temps de tassement de 1 année :

$$Tv = \frac{Cv}{h^2} \times t = \frac{3.5 \cdot 10^{-8}}{2^2} \times 365.25 \times 24 \times 3600 = 0.28$$

➤ Valeur du degré de consolidation U correspondant à ce temps de tassement (lecture graphique):

$$U = 60\%$$

➤ Tassement total S_∞ de la couche d'argile dans le cas de cette consolidation accélérée :

$$S(t = 1an) = S_\infty \times U = 26.52 \times 0.60 = 15.90 \text{ cm}$$

➤ Déduire la surcharge verticale à appliquer pour obtenir ce tassement total correspondant au tassement $S(t = 1an)$:

$$\Delta e = \frac{S(t = 1an)}{H_0} \times (1 + e_0) = \frac{0.1590}{4} \times (1 + 0.81) = 0.072$$

Or $\Delta e = C_s \times \log\left(\frac{\sigma'_p}{\Delta\sigma_v}\right) + C_c \times \log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p}\right)$ avec $C_s=0$

Soit $\Delta e = C_c \times \log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p}\right)$

Donc $\sigma'_{vf} = \sigma'_p \times 10^{\frac{\Delta e}{C_c}} = 46.50 \times 10^{\frac{0.072}{0.34}} = 75.72 \text{ kPa}$

DONC la force désirée devrait être de 109.60 kPa donc la pression de remblai supplémentaire doit augmenter de 33.9 kPa.

➤ **Hauteur de remblai nécessaire à appliquer pour obtenir le tassement total $S(t = 1\text{an})$**

La force volumique du remblai étant de 22.7 kN/m³, on obtient la hauteur supplémentaire par l'équation ci-dessous :

$$H_{\text{remblai}} = \frac{\sigma'_{vfsupp}}{\gamma'_{\text{remblai}}} = \frac{33.90}{22.7} = 1.49 \text{ mètres}$$