

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 08 Mai 1945 de Guelma

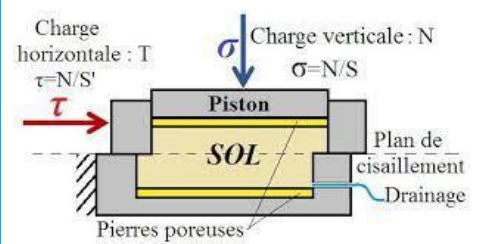
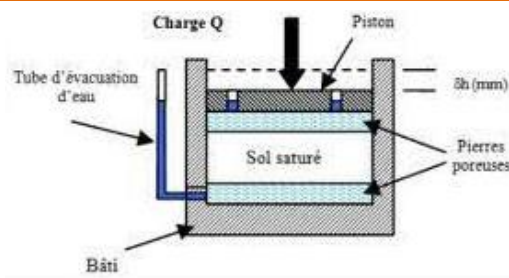
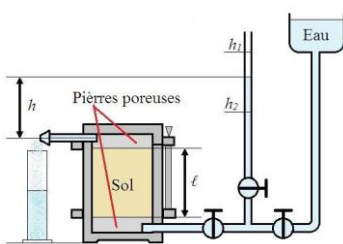
Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Polycopié

TP Mécanique des sols 2

Destiné aux étudiants de : 3 A Licence GC ; Semestre : 5



Élaboré par : Dr. Mme Bouragbi Née Lekouaghet Nassima

(Docteur en : Génie Civil - Option : Hydraulique)

Année universitaire 2022-2023

AVANT-PROPOS

La mécanique des sols est une discipline scientifique qui étudie le comportement mécanique des sols, englobant leurs propriétés physiques, hydrauliques et mécaniques. Elle vise à comprendre et prédire le comportement des sols en ingénierie, tel que leur capacité portante, leurs caractéristiques de tassement, leur résistance au cisaillement et leur perméabilité.

A partir d'essais de laboratoires et in-situ de plus en plus perfectionnés, la Mécanique des Sols fournit aux constructeurs les données nécessaires pour étudier les ouvrages de génie civil et de bâtiment et assurer leur stabilité en fonction des sols sur lesquels ils doivent être fondés, ou avec lesquels ils seront construits (barrages en remblais).

Ce polycopié est adressé aux étudiants de plusieurs spécialités telles que le génie civil, le bâtiment et les travaux publics, son objectif est de fournir les outils pratiques nécessaires à la compréhension du comportement des sols pour la conception et la construction de structures et de fondations, ainsi que pour l'évaluation et la réduction des risques géotechniques.

Dans ce contexte, il représente un aide-mémoire couvrant les trois travaux pratiques du programme officiel, le premier TP s'intéresse à l'estimation de la perméabilité des sols, le deuxième TP présente l'essai de compressibilité à l'oedomètre qui détermine la vitesse et l'amplitude de la consolidation d'un sol lorsqu'il est restreint latéralement et chargé axialement. Cette évaluation est indispensable pour l'ingénieur géotechnique ou des Ponts et Chaussées. Enfin la détermination de la résistance au cisaillement direct d'éprouvettes consolidées drainées à travers le troisième TP qui est l'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrand.

Programme officiel détaillé de la matière

Semestre : 5 ; 3 A Licence GC

Unité d'enseignement : UEM 5.1

Matière : TP Mécanique des sols 2

VHS : 22h30 (TP : 1h30)

Crédits : 2

Coefficient : 1

Objectifs de l'enseignement :

L'étudiant aura l'occasion d'effectuer des essais pratiques en laboratoire qui sont en relation avec les connaissances acquises dans le cours de MDS2.

Connaissances préalables recommandées :

MDS1 et MDS2

Contenu de la matière :

TP N°1 : Perméabilité des sols

(Perméamètres à charge constante et à charge variable)

TP N°2 : Essai de compressibilité à l'oedomètre

TP N°3 : Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande

Mode d'évaluation :

Contrôle continu : 100%

Références bibliographiques :

1. Guide de géotechnique : Lexique et Essais. J. Collas et M. havard, Editions Eyrolles, 1983.

Sommaire

Avant-propos	i
Programme officiel détaillé de la matière	ii
Sommaire	iii

TP1 : Essai de perméabilité des sols

1.1. Définition	1
1.2. But de l'essai	1
1.3. Matériel utilisé	1
1.4. Procédure expérimentale d'essai	3
1.5. Expression des résultats d'essai	6
1.6. Application numérique	7

TP 2 : Essai de compressibilité à l'oedomètre

2.1. But de l'essai	8
2.2. Appareillage	8
2.3. Procédure expérimentale d'essai oedométrique	10
2.4. Interprétation des résultats	11
2.5. Exploitation des résultats	15
2.6. Résultats et calculs	16
2.7. Echelle semi-logarithmique	19
2.8. Application numérique	20

TP 3 : Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande

3.1.	But de l'essai	23
3.2.	Appareillage	23
3.3.	Procédure expérimentale d'essai de cisaillement	25
3.4.	Interprétation des résultats	26
3.5.	Calculs et Résultats	26
3.6.	Application numérique	29
	Références bibliographiques	31

TP 1 : Essai de perméabilité des sols (Soil permeability test)

1.1) Définition :

La perméabilité des sols constitue un élément majeur dans la conception et le calcul de nombreux ouvrages en génie civil (ouvrages de soutènement, digues, tunnels, barrages ...).

Elle intervient également dans les problèmes d'environnement (diffusion de polluants, sites de stockage, contamination de la nappe ...). Aussi, d'importants travaux ont été consacrés à sa mesure que ce soit en laboratoire ou in situ.

Les méthodes de laboratoire consistent à prélever un échantillon de sol et à mesurer sa perméabilité à l'aide d'un perméamètre. Les mesures sont effectuées soit avec :

- Un perméamètre à charge constante, quand il s'agit de grandes perméabilités (graves et sables qui ont généralement une perméabilité $k > 10^{-5}$ m/s) ;
- Soit avec un perméamètre à charge variable, quand il s'agit de mesurer de faibles perméabilités (argiles et marnes où l'on peut avoir une perméabilité $k < 10^{-8}$ m/s)

1.2) But de l'essai :

L'essai de perméabilité consiste à mesurer le temps nécessaire à un volume de fluide pour parcourir la longueur de l'échantillon (coefficient de perméabilité), ce coefficient dépend de la grosseur et la forme des grains et de la porosité du sol

Suivant l'ordre de grandeur de la perméabilité du sol, on a deux types de perméamètres qui sont : le perméamètre à charge constante et le perméamètre à charge variable.

1.3) Matériel utilisé :

Un perméamètre est composé d'une enceinte étanche dans laquelle est placée un échantillon de sol de section **A** et de longueur **L**. les deux extrémités de l'échantillon sont reliés à deux tubes piézométrique par l'intermédiaire de pierres poreuses voir **figures 1.1, 1.2 et 1.3**.

➤ **Accessoires :**

Un perméamètre comporte :

- Une cellule étanche en plexiglass : dans laquelle est placé l'échantillon du sol ;
- Un panneau de tubes Piézométriques à différents niveaux placé dans un support ;
- Un Chronomètre : pour déterminer le temps d'écoulement ;
- Un réservoir d'eau ;
- Une éprouvette graduée ;
- Un thermomètre pour déterminer la température.

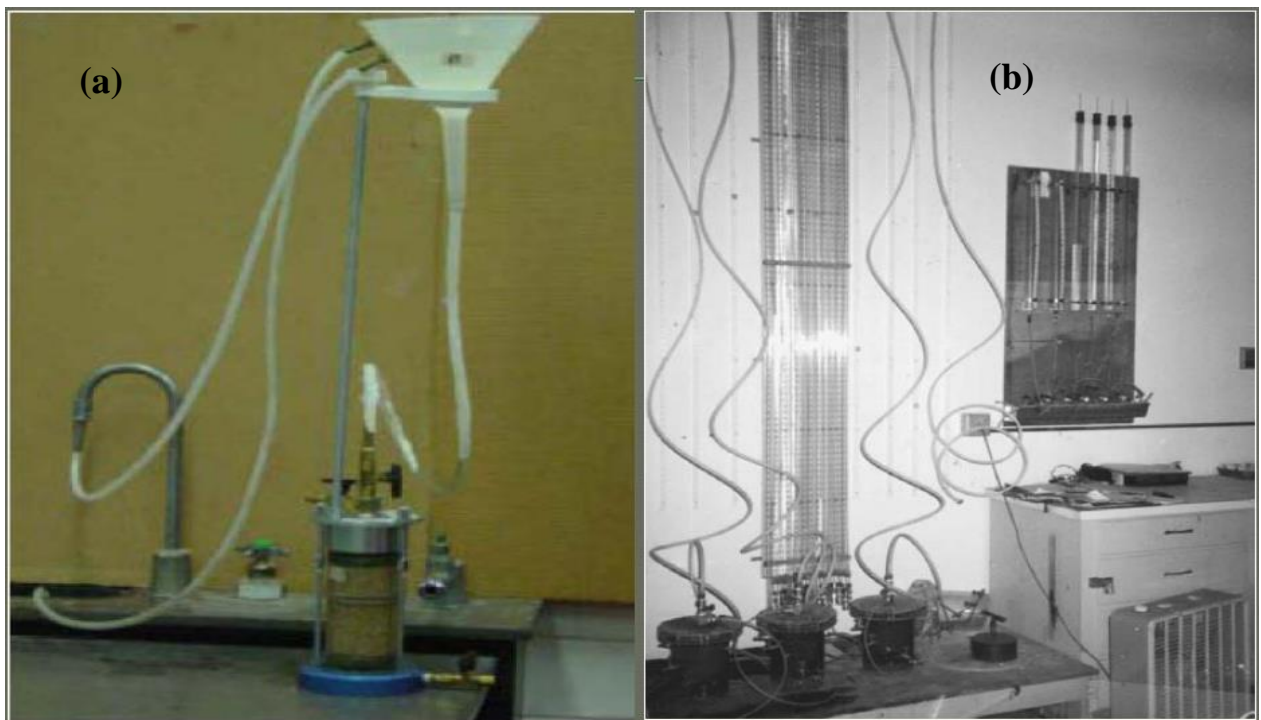


Figure 1.1 : Perméamètre : (a) à charge constante, (b) à charge variable.

1.4) Procédure expérimentale d'essai :

1.4.1) Perméamètre à charge constante : (l'Essai est selon la norme ASTM D2434)

- On place l'échantillon de sol dans la cellule ;
- Un écoulement d'eau vertical sous une charge constante est maintenu à travers le sol ;
- On mesure la perte de charge h et la quantité d'eau (V_w) qui passe pendant un temps donné (t) ;
- On calcule le gradient hydraulique (i) et le coefficient de perméabilité (k) du sol comme suit :

L'échantillon du sol de section A est le siège d'un écoulement permanent dont

$$\text{la vitesse d'écoulement est : } V = \frac{Q}{A} = K * i = k * \frac{h}{L}$$

D'où le coefficient de perméabilité K est égale à : $K = \frac{Q}{A * i} = \frac{Q}{A} * \frac{L}{h}$

Avec : $Q = \frac{V_w}{t}$: débit d'eau en (m^3/s)

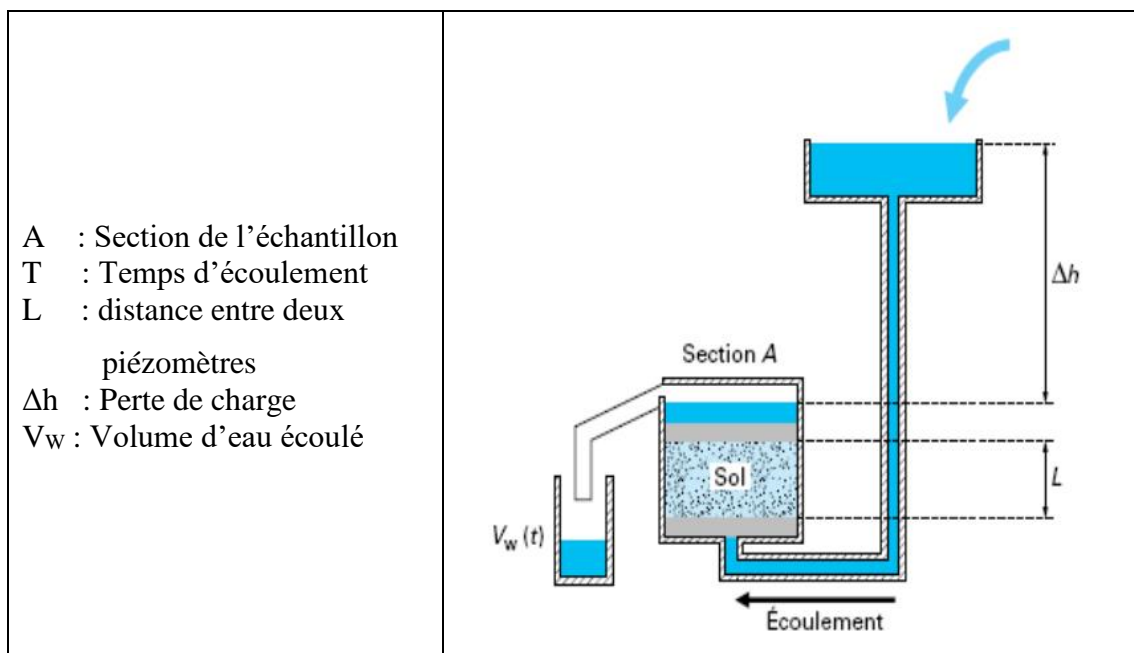


Figure 1.2 : Perméamètre à charge constante (schéma de principe)

Remarque : Il existe une relation inverse entre la viscosité de l'eau et la température tel que : si la température augmente la viscosité diminue et par suite la perméabilité augmente.

Donc le coefficient de perméabilité est normalisé à la température de 20 °C et la perméabilité à toute température T est liée à K_{20} par le rapport suivant :

$$k_{20} = k \frac{\eta}{\eta_{20}}$$

Avec : η et η_{20} sont les viscosités à la température T de l'essai et à 20 °C, respectivement.

À partir du tableau 1.1, on obtient les viscosités (η) à la température T de l'essai puis on calcule K_{20} .

Tableau 1.1 : Propriétés de l'eau distillée

Temperature °C	Densité (g/cm ³)	Viscosité (Poise*)
4	1.00000	0.01567
16	0.99897	0.01111
17	0.99880	0.01083
18	0.99862	0.01056
19	0.99844	0.01030
20	0.99823	0.01005
21	0.99802	0.00981
22	0.99780	0.00958
23	0.99757	0.00936
24	0.99733	0.00914
25	0.99708	0.00894
26	0.99682	0.00874
27	0.99655	0.00855
28	0.99627	0.00836
29	0.99598	0.00818
30	0.99568	0.00801

1.4.2) Perméamètre à charge variable :

- On place l'échantillon de sol dans la cellule ;
- On alimente l'échantillon par une colonne d'eau verticale de section (a) et le drainage effectuée dans un réservoir où le niveau est maintenu constant par un trop plein ;
- Au temps (t₁) le niveau d'eau dans la colonne d'alimentation est (h₁) après un temps dt= (t₂-t₁) son niveau baisse de h₁ à h₂ avec une perte de charge de (dh)
- Le débit d'eau est donné par : $Q = a * \frac{dh}{dt} = A * K * i = A * K * \frac{h}{L}$

En séparant les variables on obtient : $a * \frac{dh}{h} = K * \frac{A}{L} * dt$

Après intégrale on obtient :

$$K = \frac{a}{A} * \frac{L}{\Delta t} * \text{Ln} \left(\frac{h_1}{h_2} \right) = 2.3 \frac{a}{A} * \frac{L}{\Delta t} * \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

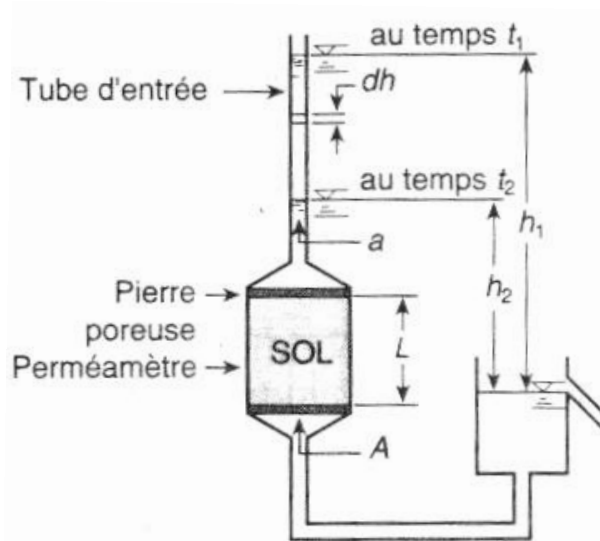


Figure 1.3 : Perméamètre à charge variable (schéma de principe)

Tableau 1.2 : ordres de grandeur du coefficient de perméabilité (k)

	k = 1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹² m/s
CARACTERISTIQUES DE DRAINAGE	BONNE					FAIBLE			PRATIQUEMENT IMPERMEABLE				
PERMEABILITE	FORTE		MOYENNE		FAIBLE		TRES FAIBLE		PRATIQUEMENT IMPERMEABLE				
TYPE DE SOL	GRAVIER		SABLE PROPRE		ARGILE FISSUREE SABLE FIN SILTEUX		ARGILES INTACTES						
METHODES D'ESSAIS EN LABO	CHARGE CONSTANTE				CHARGE VARIABLE				CHARGE VARIABLE OU OEDOMETRE				

1.5) Expression des résultats d'essai :

1.5.1) perméamètre à charge constante :

Les paramètres		Symbole/Formule	Valeur
Les données	Longueur de la cellule (mm)	L	
	Diamètre de la cellule (mm)	D	
	La charge d'eau (mm)	h	
	Volume d'eau (cm ³)	V _w	
	Le temps (min)	t	
	Température de l'essai (°C)	T	
	viscosités à T et à 20 °C (Poise)	η et η ₂₀ et 0.01005
Les calculs	La section de la cellule (m ²)	$A = \pi \cdot D^2 / 4$	
	Le débit d'eau (m ³ /s)	$Q = V_w / t = (V_w \cdot 10^{-6}) / (t \cdot 60)$	
	Le coefficient de perméabilité (m/s)	$K = \frac{Q}{A * i} = \frac{Q}{A} * \frac{L}{h}$	
	Le coefficient de perméabilité à 20 °C (m/s)	$k_{20} = k \frac{\eta}{\eta_{20}}$	
Type de sol			

1.5.2) perméamètre à charge variable :

Les paramètres		Symbole/Formule	Valeur
La cellule échantillon	Longueur de la cellule (cm)	L	
	Diamètre de la cellule (cm)	D	
	La section de la cellule (cm ²)	$A = \pi \cdot D^2 / 4$	
La colonne d'eau	Diamètre du piezomètre (cm)	d	
	Section (cm ²)	$a = \pi \cdot d^2 / 4$	
	La charge d'eau 1 (m)	h ₁	
	La charge d'eau 2 (m)	h ₂	
Le temps (min)	Δt		
Le coefficient de perméabilité (m/s)	$k = 2.3 \frac{a}{A} * \frac{L}{\Delta t} * \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$		
Type de sol			

1.6) Application numérique :

➤ Essai de perméamètre à charge constante

Les paramètres		Symbole/Formule	Valeur
Les données	Longueur de la cellule (mm)	L	160
	Diamètre de la cellule (mm)	D	75
	La charge d'eau (mm)	h	600
	Volume d'eau (cm ³)	V _w	800
	Le temps (min)	t	1.5
	Température de l'essai (°C)	T	17
Les calculés	La section de la cellule (m ²)	$A = \pi \cdot D^2 / 4$	$4.418 \cdot 10^{-3}$
	Le débit d'eau (m ³ /s)	$Q = V_w / t = (V_w \cdot 10^{-6}) / (t \cdot 60)$	$8.888 \cdot 10^{-6}$
	Le coefficient de perméabilité (m/s)	$K = \frac{Q}{A * i} = \frac{Q}{A} * \frac{L}{h}$	$5.37 \cdot 10^{-4}$
	Le coefficient de perméabilité à 20 °C (m/s)	$k_{20} = k \frac{0.01083}{0.01005}$	$5.79 \cdot 10^{-4}$
Type de sol		sable	

➤ Essai de perméamètre à charge variable

Les paramètres		Symbole/Formule	Valeur
La cellule d'échantillon	Longueur de la cellule (cm)	L	11.5
	Diamètre de la cellule (cm)	D	10
	La section de la cellule (cm ²)	$A = \pi \cdot D^2 / 4$	78.54
La colonne d'eau	Diamètre (cm)	d	0.3
	Section (cm ²)	$a = \pi \cdot d^2 / 4$	0.07
	La charge d'eau 1 (m)	h ₁	1
	La charge d'eau 2 (m)	h ₂	0.97
Le temps (min)	Δt	46.15	
Le coefficient de perméabilité (m/s)	$k = 2.3 \frac{a}{A} * \frac{L}{\Delta t} * \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$	$1.128 \cdot 10^{-9}$	
Type de sol		Argile	

TP 2 : Essai de compressibilité à l'oedomètre (Oedometer compressibility test)

2.1) But de l'essai :

L'*essai oedométrique* reproduit les conditions de **déformation** des sols dans le cas d'un massif du sol à surface horizontale chargé par une **pression uniforme** où le sol ne peut se **déplacer** que **verticalement**. Le principe de l'oedomètre a été inventé au début du XXe siècle et cet appareil fait partie de l'équipement de tous les laboratoires de mécanique des sols.

Cet essai a pour but de déterminer les caractéristiques de compressibilité et de consolidation d'un sol qui permettent d'estimer le tassement. Il fournit deux types de courbes :

- **La courbe de compressibilité** unidimensionnelle, dite « **courbe oedométrique** » : indice des vides (e) en fonction du logarithme de la contrainte effective verticale appliquée (σ) ; $e = f(\log \sigma')$.
- **La courbe de consolidation** : tassement vertical (ε_v) en fonction du logarithme de temps ; $\varepsilon = f(\log t)$.

L'essai consiste à exercer des cycles de chargement et de déchargement sur un échantillon de sol drainé sur deux faces, à l'intérieur d'une cellule rigide.

2.2) Appareillage :

L'appareil Oedométrique comporte :

- ✚ Un bâti métallique permettant par l'intermédiaire d'un bras de levier d'appliquer au piston (couvercle) les pressions de consolidation successives désirées ;
- ✚ Un comparateur pour mesurer les tassements ou les gonflements ;
- ✚ Des masses en acier pour charger l'échantillon ;
- ✚ Une cellule ou enceinte oedométrique de consolidation composée de :
 - Un moule cylindrique ayant une paroi lisse et rigide qui empêche toute déformation radiale lors de l'essai ;
 - Deux bases de pierres poreuses permettant le drainage de l'échantillon en cours de l'essai et éviter au sein de matériau l'apparition de pression interstitielle ;
 - Deux papier filtres sert à protéger les pierres du colmatage due aux grains fins ;
 - Un couvercle ou piston pour répartir l'effort de compression sur la surface totale de l'échantillon.



Figure 2.1 : Vue générale de l'oedomètre

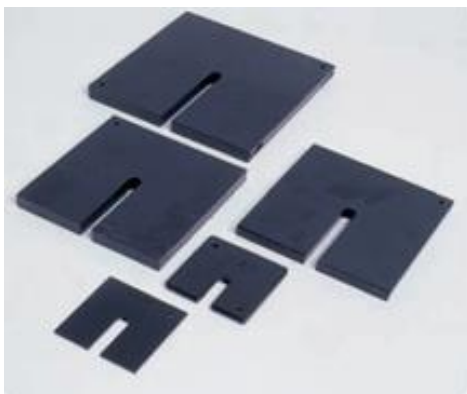


Fig. 2.2 : Masses fendues en acier



Fig. 2.3 : Cellule Oedométrique et accessoires

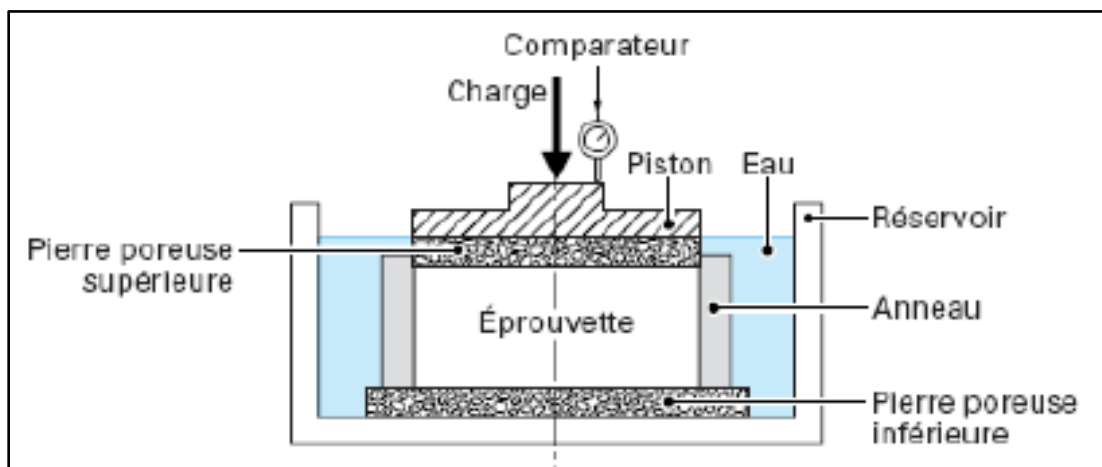


Figure 2.4 : Coupe schématique d'une cellule oedométrique

2.3) Procédure expérimentale d'essai oedométrique :

L'exécution de l'essai oedométrique comporte les opérations suivantes :

- On mesure les dimensions de l'anneau de la cellule oedométrique (Diamètre (D) et Hauteur (H)) ;
- On mesure le bras de levier permettant d'appliquer l'effort revenant sur le piston ;
- On pèse la cellule oedométrique vide
- On remplit l'anneau par l'échantillon du sol ; puis on arase la surface supérieure à l'aide d'une règle ou d'un élément rigide et plan ;
- On pèse l'ensemble cellule oedométrique + éprouvette pour pouvoir calculer l'indice des vides initial (e_0) en fin d'essai ;
- On pose le papier filtre et la pierre poreuse supérieure sur le moule puis on le fixe sur le bac par les vis de fixation ;
- On vérifié l'horizontalité de l'oedomètre par le niveau ;
- On pose la cellule sur le bâti oedométrique puis on met en place le piston et on règle le comparateur à zéro ;
- On sature la cellule par l'eau tout le long de l'essai afin d'éviter la présence d'air et d'annuler les tensions capillaires qui compensent (partiellement) le déchargement (gonflement de l'éprouvette) ;
- On pose le poids correspondant au premier chargement et on mesure le tassement (ϵ ou ΔH) au cours du temps (**0- 15s- 30s- 1min- 2 min- 4 min- 8 min – 15 min- 30min- 1h – 2h- 4h- 8h- 24h**) on double la charge chaque 24h ;
- On procède de la même façon le cycle de déchargement de l'éprouvette ;
- En fin d'essai on détermine le poids du sol sec (P_s) obtenu par pesée de l'éprouvette après séchage à l'étuve (24 heures à 65°C pour les sols organiques et 105°C pour les autres sols)
- On démoule le moule et on le nettoie.

Note : On propose dans cette expérience d'étudier un échantillon **sableux sec** pour lequel le tassement est instantané et on mesure les tassements suivant la cadence (0, 15s, 30s, 45s, 1min et 2minutes).

2.4) Interprétation des résultats :

L'interprétation des résultats des essais oedométriques repose classiquement sur l'exploitation des courbes de compressibilité et de consolidation

2.4.1. Sur les courbes de consolidation $s = f(\log t)$: sous charge constante.

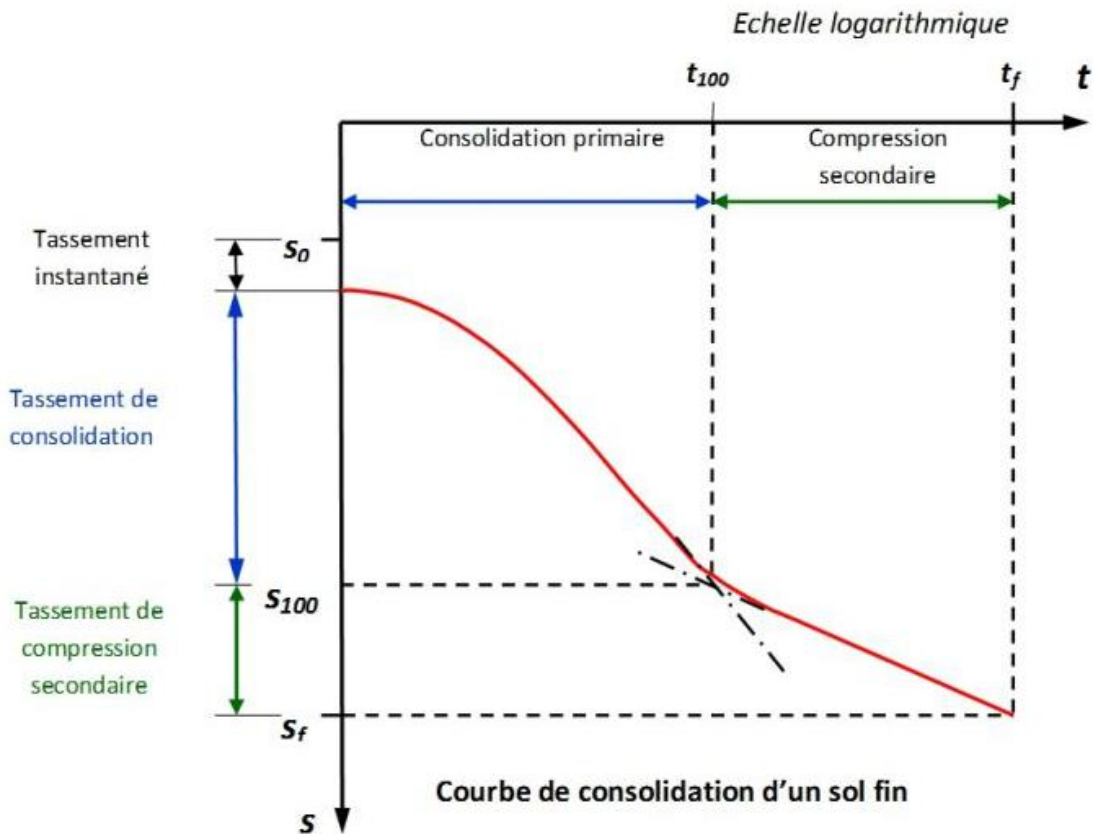


Figure 2.5 : courbe de consolidation

On distingue trois parties dans cette courbe :

- La compression initiale ou instantanée lors de l'application de la charge.
- La consolidation primaire, qui correspond à la dissipation de la pression interstitielle, elle se termine à **24 heures** (t_{100} sur la figure)
- La compression secondaire, qui se poursuit dans le temps après la dissipation de la surpression interstitielle.

Ces courbes sont utilisées pour déterminer le **coefficient de consolidation C_v**

➤ **Détermination de coefficient de consolidation (C_v) :**

Ce coefficient (C_v) permet de calculer l'évolution du tassement au cours du temps et donné par la formule suivante :

$C_v = \frac{T_v * d^2}{t} \text{ (en } m^2/s \text{)}$	<p>Avec : t : temps de drainage ; d : distance de drainage.</p>
---	--

Différentes méthodes sont utilisées pour déterminer la valeur de C_v , les plus courantes sont :

1) La méthode de Casagrande, qui détermine le temps t_{50} correspondant à un degré de consolidation de 50% sur la courbe de consolidation représentée en fonction du logarithme du temps (Figure 2.6)

Pour $U=50\%$ on a $T_v(50) = 0.197$ et $d_{50}=H_{50} = (H_0 - H_{100})/2$; donc on aura :

$C_v = \frac{0.197 * d_{50}^2}{t_{50}}$

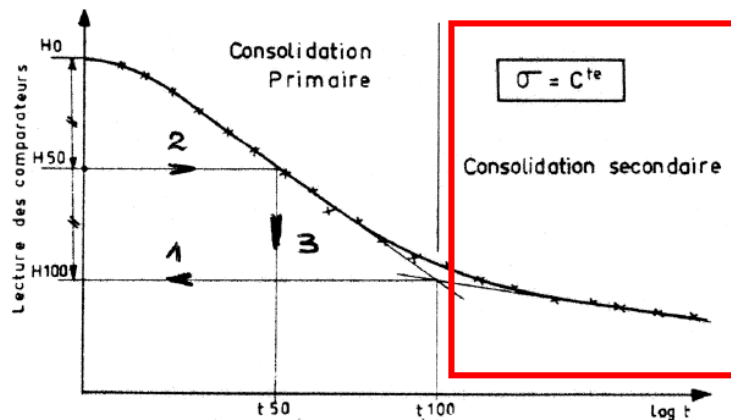
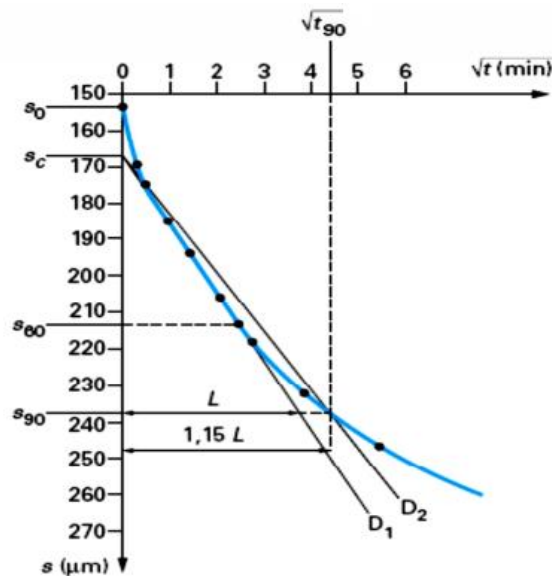


Figure 2.6 : Détermination de C_v par la méthode de Casagrande

2) La méthode de Taylor, qui détermine le temps t_{90} correspondant à un degré de consolidation de 90% sur la courbe de consolidation représentée en fonction de la racine carrée du temps (Figure 2.7).

Pour $U=90\%$ on a $T_v = 0.848$ et $d_{90}=H_{90}/2$, donc on aura :

$C_v = \frac{0.848 * d_{90}^2}{t_{90}}$



On trace successivement la droite D_1 , puis la droite D_2 passant par s_c et de pente 1,15 fois plus faible.

L'intersection de D_2 avec la courbe de tassement fournit $\sqrt{t_{90}}$.

Figure 2.7 : Détermination de C_v par la méthode de Taylor.

2.4.2. Sur la courbe de compressibilité (indice des vides en fonction des contraintes) :

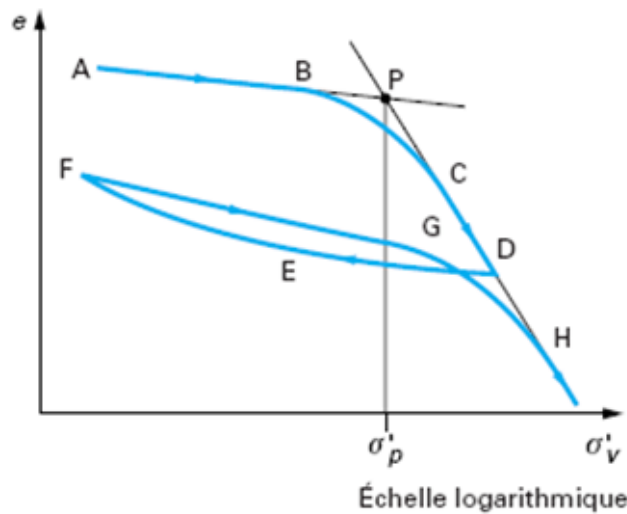


Figure 2.8 : courbe de compressibilité ($e = f(\log \sigma'_v)$).

L'indice des vides pour chaque charge appliquée est calculé comme suit :

On a : $s = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0}$ d'où $\Delta e = (1 + e_0) \frac{\Delta H}{H_0}$; tel que $\Delta e = e_0 - e$

Donc
$$e = e_0 - (1 + e_0) \frac{\Delta H}{H_0}$$

▪ Paramètres obtenus à partir de la courbe de compressibilité $e = f(\log \sigma)$:

On déduit de cette courbe les paramètres suivants :

a) La contrainte de pré-consolidation σ'_p (ou σ'_{pc} , ou $\sigma'c$) :

Définie par le point d'intersection P de la droite CD avec la parallèle AB à la droite FD. C'est la plus grande contrainte qu'a supporté le sol durant son histoire géologique (*la mémoire des charges du sol*). Elle correspond au changement de pente sur la branche supérieure du graphique de la figure 2.8.

- Les sols dits *sous-consolidés* sont ceux pour lesquels la contrainte effective verticale σ'_{v0} est supérieure à σ'_p ($\sigma'_{v0} > \sigma'_p$).
- Les sols dits *surconsolidés* sont ceux pour lesquels la contrainte effective verticale est inférieure à σ'_p ($\sigma'_{v0} < \sigma'_p$).
- Les sols *normalement consolidés* subissent une contrainte effective verticale de l'ordre de σ'_p ($\sigma'_{v0} = \sigma'_p$).

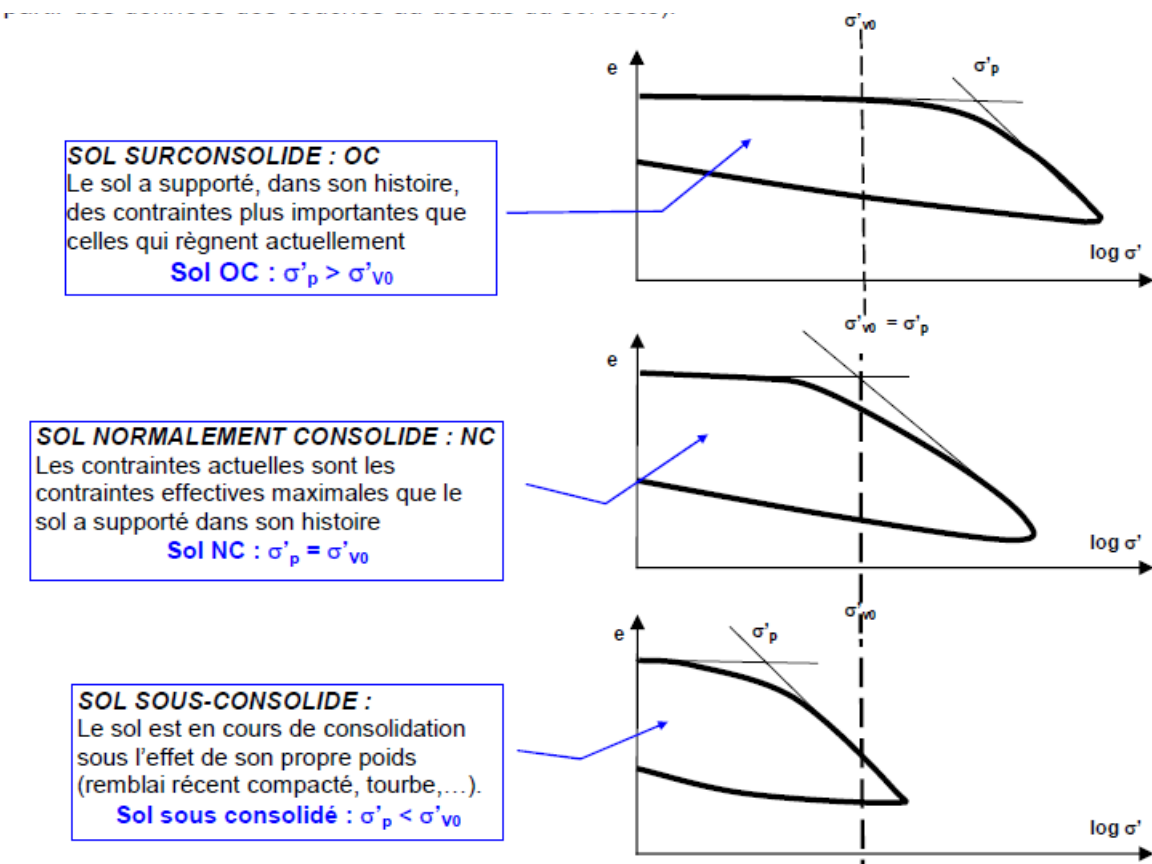


Figure 2.8 : état de consolidation du sol

b) L'indice de gonflement C_s est la pente en valeur absolue de la droite AB

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

c) De même, l'indice de compression C_c est la pente de la droite CD

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

d) L'indice des vides en place e_p est, quant à lui, défini par le point E sur la droite AB pour une contrainte égale à la pression verticale effective des terres au repos σ'_{vo} ;

$$\sigma'_{vo} = \gamma_d \times H_d \quad ; (H_d : \text{hauteur de drainage})$$

e) Le module oedométrique E_{oed} : module de déformation déterminé pour chaque palier de chargement. (Il n'est pas intrinsèque et dépend de la plage de contrainte (σ') et de l'indice des vides (e) du point considéré) et défini de la façon suivante :

$$E_{oed} = \frac{\Delta \sigma'_v}{s} = \frac{(1 + e_0) \Delta \sigma'_v}{\Delta e} = \frac{1}{m_v} \quad ; m_v : \text{le module de compressibilité de volume}$$

f) Le module de compressibilité de volume m_v : représente la quantité de changement dans le volume unitaire qui résulte d'une augmentation unitaire de la contrainte effective, nm

$$m_v = \frac{\Delta H}{H \Delta \sigma'} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} \times \frac{1}{1 + e_0} = \frac{1}{E_{oed}}$$

A titre indicatif, on peut considérer les sols selon l'indice (C_c) comme suit :

- Peu compressible lorsque : $C_c < 0.2$;
- Peu compressible lorsque : $0.2 < C_c < 0.7$;
- Peu compressible lorsque : $0.7 < C_c$.

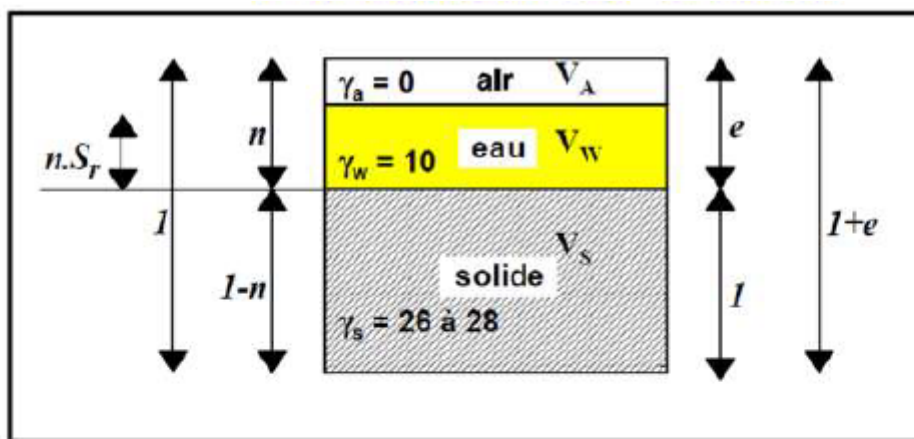
Ordre de grandeur du module oedométrique en fonction du type de sol :

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

Remarque :

Les déformations que l'on peut observer ont plusieurs causes :

- La déformation du squelette provenir d'une diminution de l'indice des vides ;
- Une modification de la structure du squelette par glissement des grains les uns par rapport aux autres → déformation irréversible ;
- Les micros ruptures à voisinage des contacts des grains → phénomène irréversible (contraintes élevées).



$$[1] \quad n = \frac{V_v}{V} \quad *$$

$$[2] \quad n = \frac{e}{1+e}$$

$$[3] \quad n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

$$[4] \quad n = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_s - \gamma_w}$$

$$[5] \quad e = \frac{V_v}{V_s} \quad *$$

$$[6] \quad e = \frac{n}{1-n}$$

$$[7] \quad e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$$

$$[8] \quad e = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w}$$

$$[9] \quad w = \frac{W_w}{W_s} \quad *$$

$$[10] \quad w = e \cdot S_r \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$$

$$[11] \quad w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$$

$$[12] \quad w = S_r \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$$

Figure 2.9 : Paramètres caractéristiques d'un sol

2.5) Exploitation des résultats :

➔ **Calcul de pression (σ [KPa]) :** On à $\sigma = \frac{N}{S} = \frac{Q}{S}$

a) **la valeur de Q :**

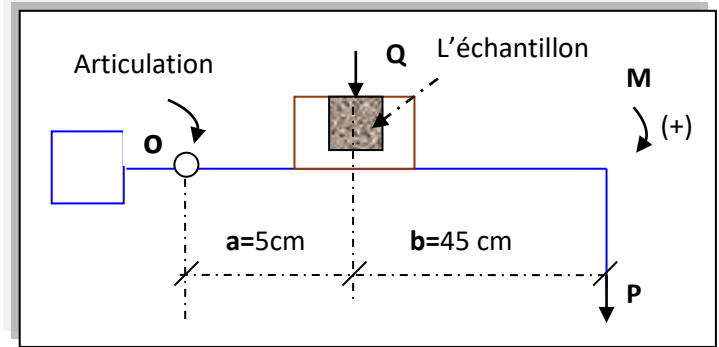
On détermine la valeur de la force **Q** à partir de l'équation d'équilibre des moments par :

$$\sum M_{/o} = 0 \quad \Rightarrow 50 P + 5 Q = 0$$

$$\Rightarrow Q = -10 P$$

Ou par $Q = p \frac{(a+b)}{a} \Rightarrow Q = p \frac{(5+45)}{5}$

$Q = 10 p$



b) **La valeur de S :**

$$S = \frac{\pi D^2}{4} ; \text{ Tel que : } D=7\text{cm}$$

➔ **Calcul du poids de sol (P_s) :** ($g=9.81 \text{ m/s}^2$)

$$P_s = [\text{poids (cellule + éprouvette)}] - [\text{poids (cellule vide)}]$$

➔ **Calcul de γ_d :**

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_t} ; \text{ Tel que } V_t = S \times H_0 \text{ avec } H_0 = 24 \text{ cm}$$

➔ **Calcul de l'indice des vide initiale « e_0 » :** on donne ($\gamma_w = 9.81 \text{ KN/m}^3$)

Type de sol	Gravier sable	Limon sableux	limon	Argile limoneuse	argile
Gravité spécifique ($d = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$)	2.65	2.67	2.70	2.75	2.80

2.6) Résultats et calculs :

A partir des tableaux des résultats tracer :

- La courbe de compressibilité de cette éprouvette et déterminer ses paramètres ;
- La courbe de consolidation et déterminer le coefficient de consolidation ;

Quelles sont vos remarques.

Tableau 2.1 : courbe de consolidation

Masse (P) (Kg)	Charge (Q) (N)	Pression (σ) (kPa)	Tassement (ΔH) en (mm)									
			Temps (s)									
			0	15	30	60	120	240	480	900	1800	3600

Tableau 2.2 : courbe de compressibilité

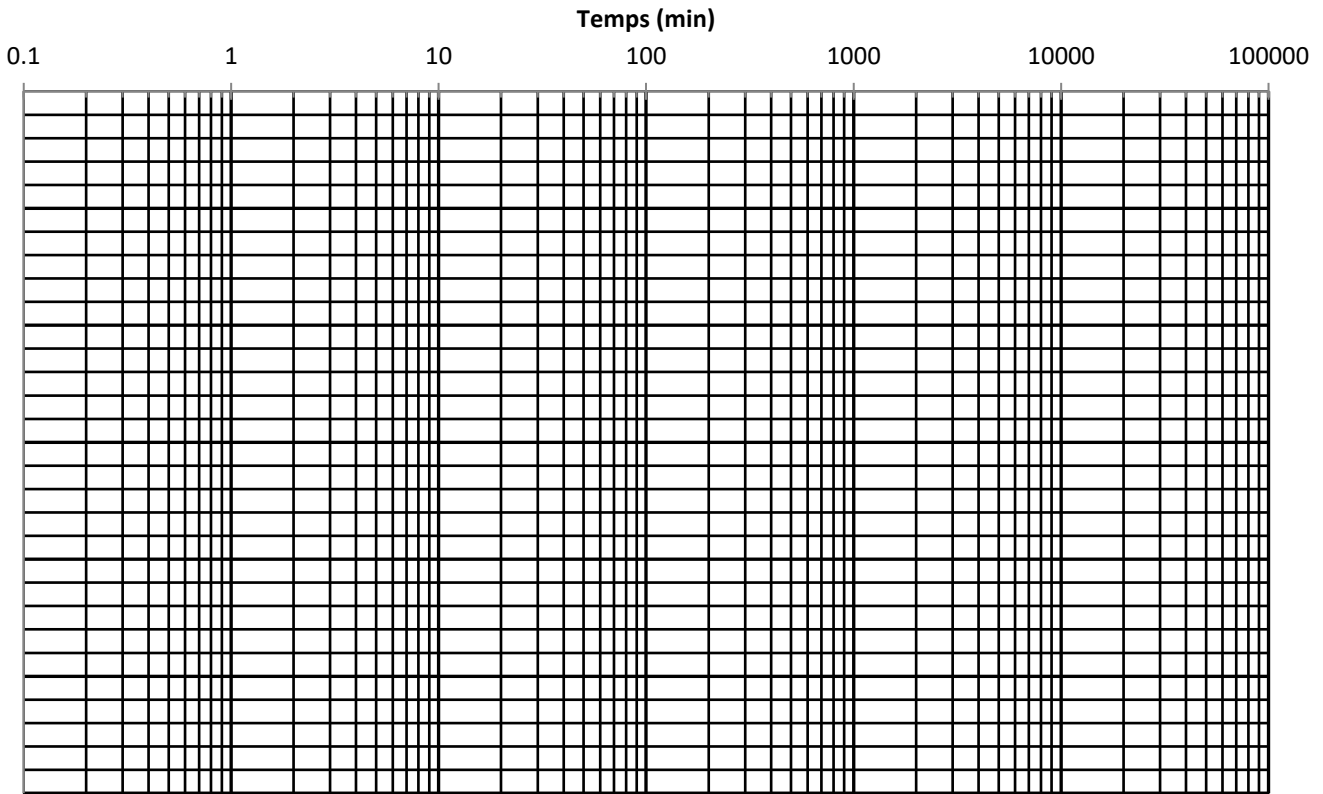
Pression σ (kPa)												
Log σ												
ΔH (mm) t=120 s												
Tassement ε (x 10 ⁻²)												
Indice des vides e												
E _{oed} (kPa)												

La mesure de la perméabilité dans l'oedomètre, peut s'effectuer à partir du coefficient de consolidation :

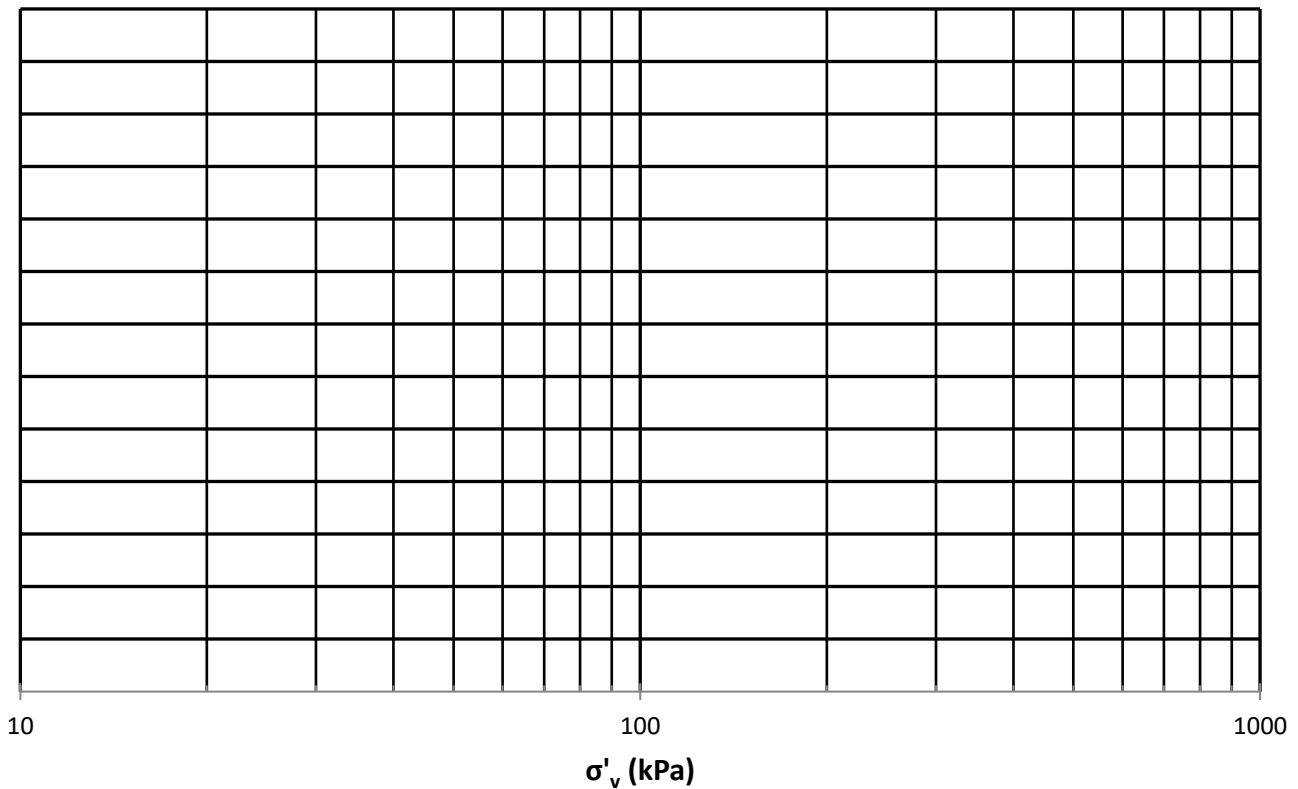
$k = \frac{C_v \cdot \gamma_w}{E'}$	Avec : C_v : coefficient de consolidation. E' : module oedométrique.
-------------------------------------	--

2.7) Echelle semi-logarithmique :

Courbe de consolidations: tassement $s = f(\log t)$



courbe de compressibilité : $e = f(\log \sigma'_v)$

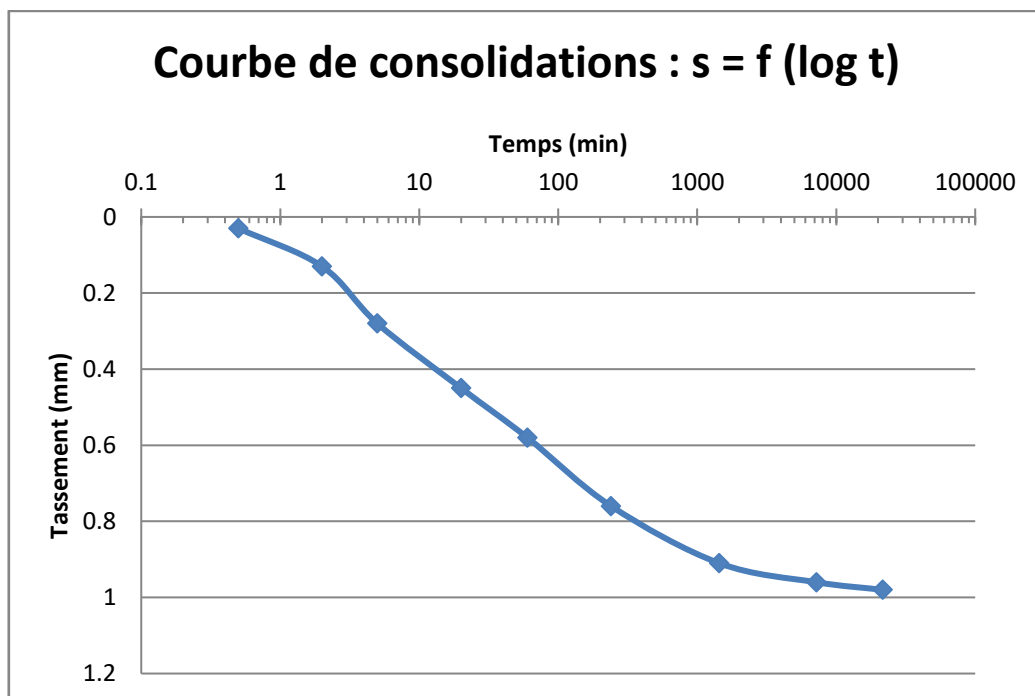


2.8) Application numérique :

2.8.1) Courbe de consolidations : tassement $s = f(\log t)$

Temps	30"	2'	5'	20'	1 h	4 h	24 h	5 j	15 j
Tassement (10^{-2} mm)	3	13	28	45	58	76	91	96	98

Temps (min)	0,5	2	5	20	60	240	1440	7200	21600
Tassement (mm)	0,03	0,13	0,28	0,45	0,58	0,76	0,91	0,96	0,98



Du graphe : $t_{50} = 18 \text{ min} = 1080 \text{ s}$

Et $H_0 = 20 \text{ mm}$

On a :
$$C_v = \frac{0.197 * d^2}{t_{50}}$$

Donc :
$$C_v = 0,197 * (20 * 10^{-3} / 2)^2 / 1080$$

$$C_v = 1,82.10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

2.8.2) Courbe de compressibilité $e = f(\log \sigma'_v)$

$$e = e_0 - (1 + e_0) \frac{\Delta H}{H_0}$$

Les données	Ho (mm)	g (m/s ²)	D (cm)	S (m ²)
	20	9,81	7,5	0,004416

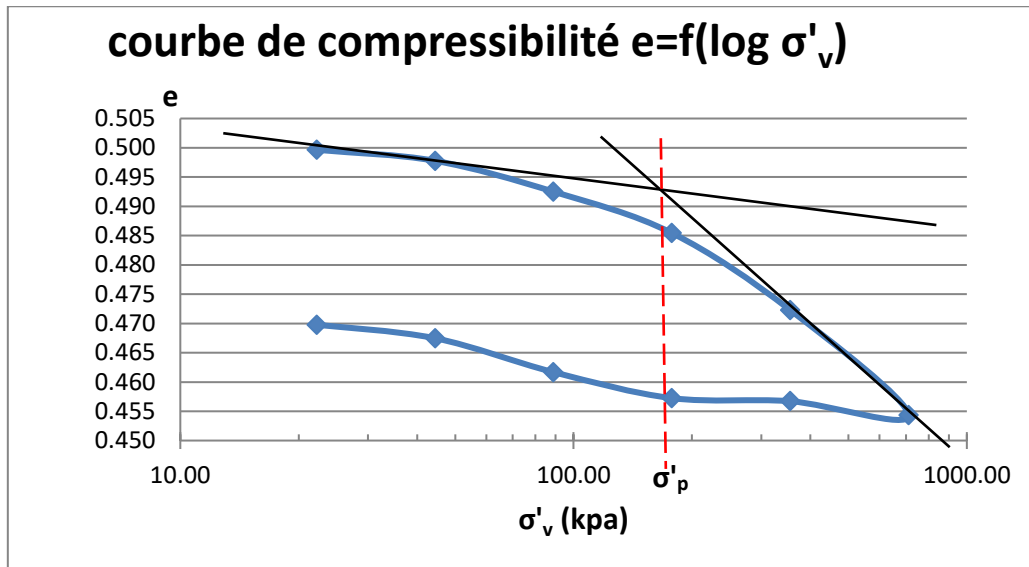
Calcul de l'indice des vides initiale "e₀" :

$$e_0 = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma_d = [(d \cdot \gamma_w) - \gamma_d] / \gamma_d$$

Yd=Ps/Vt	Ps=(M2-M1)*g = (M2-M1)*9,81 (N)			Vt= S*Ho = 0,004415*0,02		Yd (KN/m ³)
	M2=0,4618	M1=0,3050	Ps=1,538	8,83E-05	(m ³)	

On prend : un sol type Limon Sableux	La densité (d)	γw (KN/m ³)	γs (KN/m ³)	e ₀ = (γs-γd)/γd
	2,67	9,81		

La Masse M (Kg)	0	1	2	4	8	16	32	16	8	4	2	1	0
Charge sur plateau P=M*g (N)	0	9.81	19.62	39.24	78.48	156.96	313.92	156.96	78.48	39.24	19.62	9.81	0
Charge sur piston Q=10*P (N)	0	98.1	196.2	392.4	784.8	1569.6	3139.2	1569.6	784.8	392.4	196.2	98.1	0
Pression σ' =Q/S (kPa)		22.22	44.43	88.87	177.73	355.46	710.93	355.46	177.73	88.87	44.43	22.22	
Log σ'		1.347	1.648	1.9487	2.2498	2.5508	2.8518	2.5508	2.2498	1.949	1.648	1.3467	
ΔH (mm) t=120 s	0	0.055	0.08	0.15	0.244	0.419	0.658	0.626	0.619	0.56	0.483	0.4525	0.4
Tassement s=ΔH/H₀ (x 10⁻²)		0.275	0.400	0.750	1.220	2.095	3.290	3.130	3.095	2.800	2.415	2.263	2.000
Pression σ' =Q/S (kPa)		22.22	44.43	88.87	177.73	355.46	710.93	355.46	177.73	88.87	44.43	22.22	
Indice des vides e		0.500	0.498	0.493	0.485	0.472	0.454	0.457	0.457	0.462	0.467	0.470	0.474
E_{oed} = Δσ'/s (kPa)			17773	12695	18908	20312	29746	222166	507807	30124	11541	14568	
mv=s/ Δσ' (m²/MN)			0.563	0.7877	0.5289	0.4923	0.3362	0.045	0.0197	0.332	0.866	0.6864	
		Cs = 0.001				Cc = 0.007							



De la courbe de compressibilité on tire :

Paramètre	Unité	Valeur
Indice de gonflement C_s	-	0.001
Indice de gonflement C_c	-	0.007
Contrainte de prés consolidation σ'_p	kPa	170

TP 3 : Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande (Direct shear test on the Casagrande box)

3.1) But de l'essai :

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante.

L'essai de cisaillement permet **de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié**, et de déterminer son **angle de frottement interne ϕ** et sa **cohésion C**.

Ces valeurs servent entre autres à déterminer **la contrainte admissible par le sol** dans le cas de **fondations superficielles**, **la poussée du sol sur un mur de soutènement** et les calculs de vérification **des coefficients de sécurité F_s à la rupture des talus**.

3.2) Appareillage :

L'échantillon de sol à étudier est placé entre **deux demi-boîtes** qui peuvent **se déplacer horizontalement** l'une par rapport à l'autre.

Un piston permet d'exercer sur le sol une contrainte normale σ déterminée.

La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement **à vitesse constante**. La force totale de cisaillement **T** est mesurée à l'aide d'un **anneau dynamométrique** fixé à la demi-boîte supérieure.

Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon.

L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant **un plan imposé** sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée.

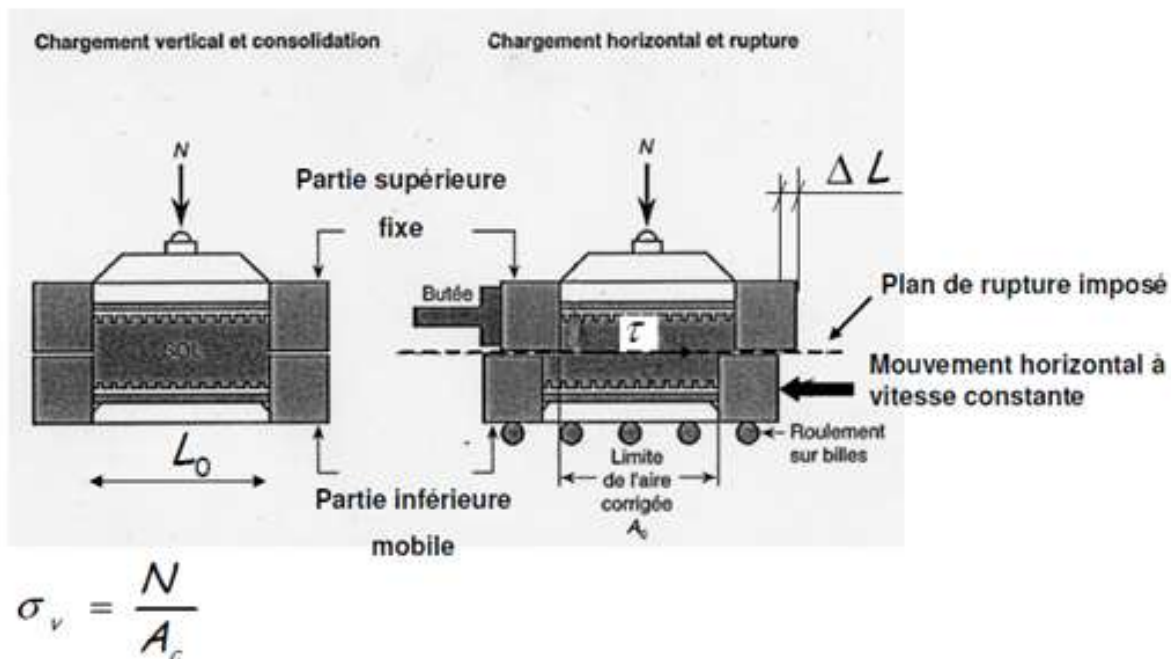


Figure 3.1 : Coupe schématique de la boîte de cisaillement



Figure 3.2 : Le bâti métallique de l'essai de cisaillement direct

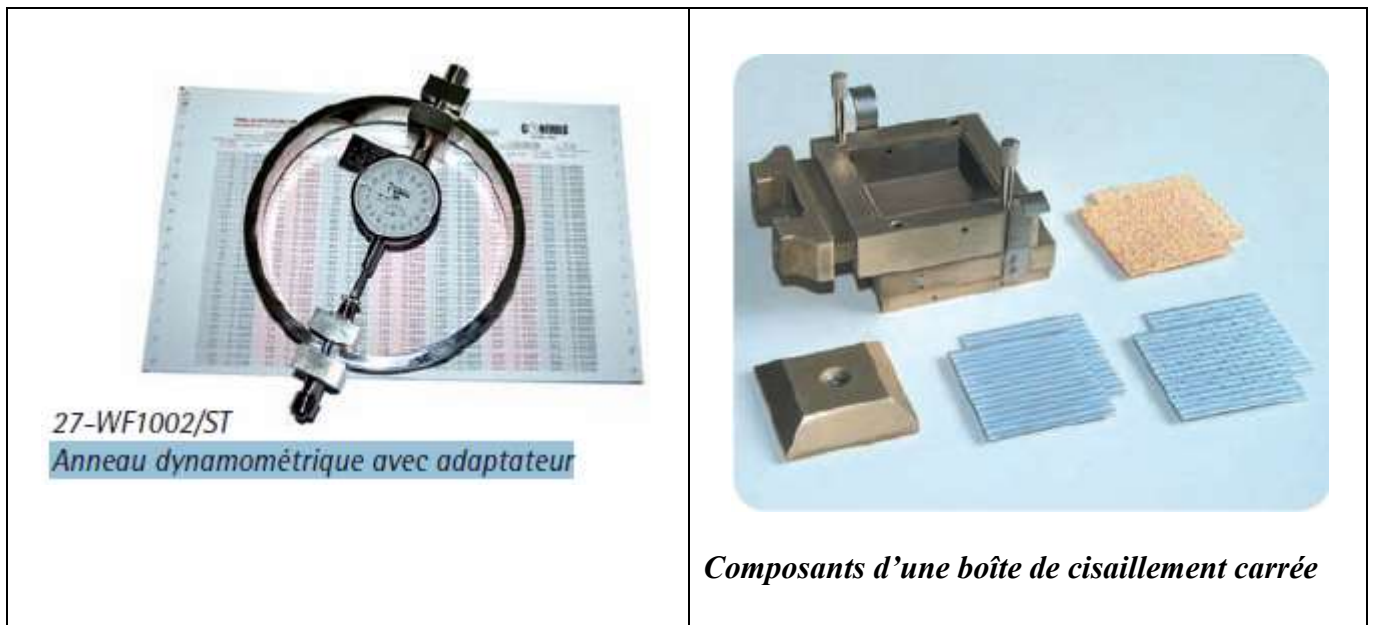


Figure 3.3 : Accessoires du bâti de l'essai de cisaillement direct

3.3) Procédure expérimentale d'essai de cisaillement :

3.3.1) Mise en place de l'échantillon dans la boîte

- Les deux demi-boîtes étant verrouillées, on place successivement :
 - Le fond de boîte, une pierre poreuse,
 - Une plaque striée, les stries étant perpendiculaires au sens de cisaillement (les plaques perforées permettent les essais drainés, les plaques pleines sont utilisées pour les essais non drainés)
 - L'échantillon de sol, en respectant la condition de la hauteur des éprouvettes suivante :
 - Sols pulvérulents : $6 d_{max} \leq h < \left(\frac{l}{2}\right)$
 - Sols cohérents : $20 \text{ mm} \leq h < \left(\frac{l}{2}\right)$
- Avec : **h** : hauteur de l'échantillon à l'intérieur de la boîte ;
l : largeur de la boîte (**6 cm ou 10 cm**) ;
d_{max} : diamètre maximal des particules ; On utilise :
- ✓ la boîte de 6 cm de côté lorsque $d_{max} \leq 5 \text{ mm}$
 - ✓ la boîte de 10 cm de côté lorsque $d_{max} \leq 8 \text{ mm}$
- Une plaque striée identique à la première ; une pierre poreuse ;
 - Le piston.

3.3.2) Mise en place de la boîte sur la machine

- Placer l'étrier de charge sur le piston de la boîte,
- Placer le comparateur vertical et le mettre à zéro,
- Monter l'anneau dynamométrique sur la machine, le relier à la boîte et compenser les jeux en mettant l'anneau légèrement en traction et en ramenant lentement le comparateur de l'anneau au zéro,
- Appliquer sur l'éprouvette la charge désirée, en principe :
 - Pour un sol pulvérulent : **100 - 200 - 300 kPa**.
 - Pour un sol cohérent :
 - ✓ Essai non consolidé, non drainé : **50 - 100 - 200 - 300 kPa**
 - ✓ Essai consolidé, drainé ou non : appliquer les mêmes pressions que pour la consolidation de l'éprouvette.
- Désolidariser les deux demi-boîtes en enlevant les goupilles,
- Mettre en route à la vitesse désirée.

Application : Déterminer la masse nécessaire à appliquer pour obtenir **150 kPa** sur l'éprouvette.

3.3.3) Vitesse d'essai

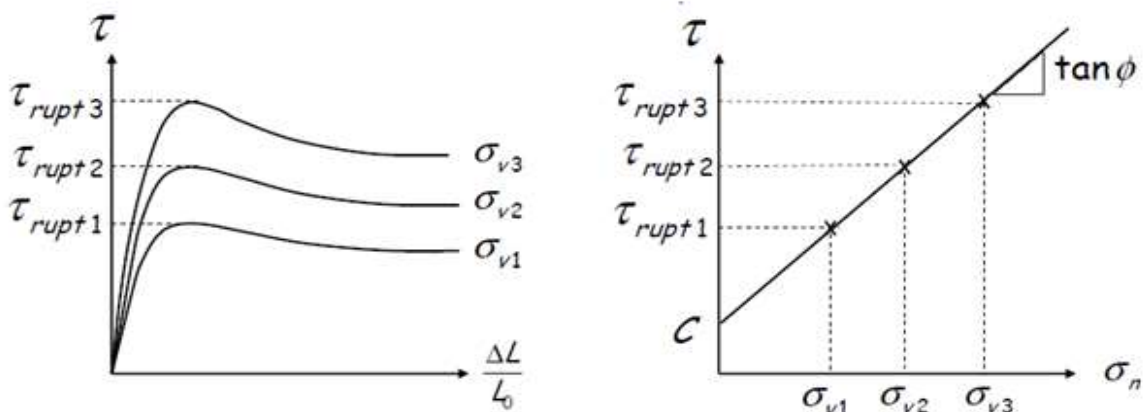
- ✓ Sols pulvérulents : **1,5 mm / min**
- ✓ Sols cohérents :
 - Essais non drainés, consolidés ou non (UU ou CU): **1,5 mm / min**
 - Essai drainé (CD) : vitesse la plus lente exprimée en micromètre par minute $V_{max} = 125/t_{100}$ avec $V_{max} < 25$.

Avec : t_{100} : temps nécessaire pour atteindre 100% de consolidation primaire.

3.3.4) Lectures

- Lire, à intervalles réguliers les indications du comparateur de l'anneau, du comparateur de déplacement horizontal et du comparateur vertical.
- Arrêter l'essai lorsque la contrainte de cisaillement est devenue constante ou lorsqu'on a une déformation horizontale de **5mm**

3.4) Interprétation des résultats :



→ Nécessité de 3 essais sur des échantillons identiques avec 3 pressions verticales différentes

3.5) Calculs et Résultats :

3.5.1) Effort de cisaillement

Convertir les lectures de l'anneau en kN ou N. Voir tableau donnant les correspondances entre la lecture et la valeur de l'effort.

3.5.2) Détermination de la surface cisailée

Pendant l'essai, la surface cisailée diminue proportionnellement au déplacement des demi-boîtes. La section corrigée **A_c** de l'éprouvette à l'instant **t** est :

$$A_c = l (1 - \Delta l) \quad \text{avec } l : \text{longueur de l'éprouvette (6 cm ou 10 cm)}$$

$$\Delta l = V \cdot t \quad \text{avec } V : \text{Vitesse de cisaillement}$$

3.5.3) Contrainte de cisaillement

- a) On calcule les contraintes de cisaillement : $\tau = T / A_c$
- b) On trace ensuite, pour chaque essai, les courbes de contraintes en fonction des déplacements et on détermine la valeur de la contrainte de cisaillement maximale $\tau = f(\delta l)$.
- c) On reporte ensuite chaque point sur un graphique ayant pour abscisse la contrainte normale σ et pour ordonnée la contrainte de cisaillement τ_{max} . Tracer la courbe intrinsèque du sol étudié $\tau = f(\sigma)$.

3.5.4) Courbes intrinsèques :

CAS DES SOLS COHERENTS

	<p>Essai non consolidé - non drainé (UU) La courbe intrinsèque obtenue est une droite parallèle à l'axe des contraintes normales. Elle est caractérisée par son ordonnée à l'origine C_{cu}.</p>
	<p>Essai consolidé non drainé (CU) La courbe intrinsèque est approximativement une droite inclinée sur l'axe des contraintes normales. On la caractérise par : <ul style="list-style-type: none"> ➤ Son ordonnée à l'origine C_{cu} ➤ Son angle avec l'axe des abscisses ϕ_{cu} </p>
	<p>Essai consolidé drainé (CD) On obtient également approximativement une droite inclinée sur l'axe des contraintes normales. Elle fournit la cohésion effective C' et l'angle de frottement effectif ϕ'.</p>

CAS DES SOLS PULVERULENTS

	<p>Les points relatifs à chaque pression normale sont alignés et la droite qui les joint passe par l'origine. 3 points suffisent en principe avec une approximation convenable.</p>
--	---

Tableau 3.1 : $C_R=2.07641(N/div)$ « facteur de calibrage d’anneau »

δl (mm)		0	0.2	0.5	0.75	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$T_i^{\sigma 1}$	Lus (div)													
	Calculé (N)													
$T_i^{\sigma 2}$	Lus (div)													
	Calculé (N)													
$T_i^{\sigma 3}$	Lus (div)													
	Calculé (N)													

Tableau 3.2 : courbe $\tau_i=f(\delta l)$

δl (mm)	0	0.2	0.5	0.75	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
S (cm ²)													
$\tau_i^{\sigma 1}$ (kPa)													
$\tau_i^{\sigma 2}$ (kPa)													
$\tau_i^{\sigma 3}$ (kPa)													

3.6) Application numérique :

δl (mm)	0	0,2	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	
T_i σ₁	Lus (div)	0	35	50	54	66	77	86	130	132	132	132	132	
	Calculé (N)	0,00	72,67	103,82	112,13	137,04	159,88	178,57	269,93	274,09	274,09	274,09	274,09	
T_i σ₂	Lus (div)	0	135	185	197	204	209	209	209	209	209	209	209	
	Calculé (N)	0,00	280,32	384,14	409,05	423,59	433,97	433,97	433,97	433,97	433,97	433,97	433,97	
T_i σ₃	Lus (div)	0	140	177	222	250	270	280	283	273	257	255	252	243
	Calculé (N)	0,00	290,70	367,52	460,96	519,10	560,63	581,39	587,62	566,86	533,64	529,48	523,26	504,57

1 (N/cm²) = 10 KPa

CR = 2,07641 (N/div)

S (cm²)	36	35,88	35,7	35,55	35,4	35,1	34,8	34,5	34,2	33,9	33,6	33,3	33
δl (mm)	0	0,2	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
T_i σ₁ (KPa)	0,00	20,25	29,08	31,54	38,71	45,55	51,31	78,24	80,14	80,85	81,57	82,31	83,06
T_i σ₂ (kPa)	0,00	78,13	107,60	115,06	119,66	123,64	124,70	125,79	126,89	128,01	129,16	130,32	
T_i σ₃ (kPa)	0,00	81,02	102,95	129,67	146,64	159,72	167,07	170,33	165,75	157,42	157,58	157,13	152,90

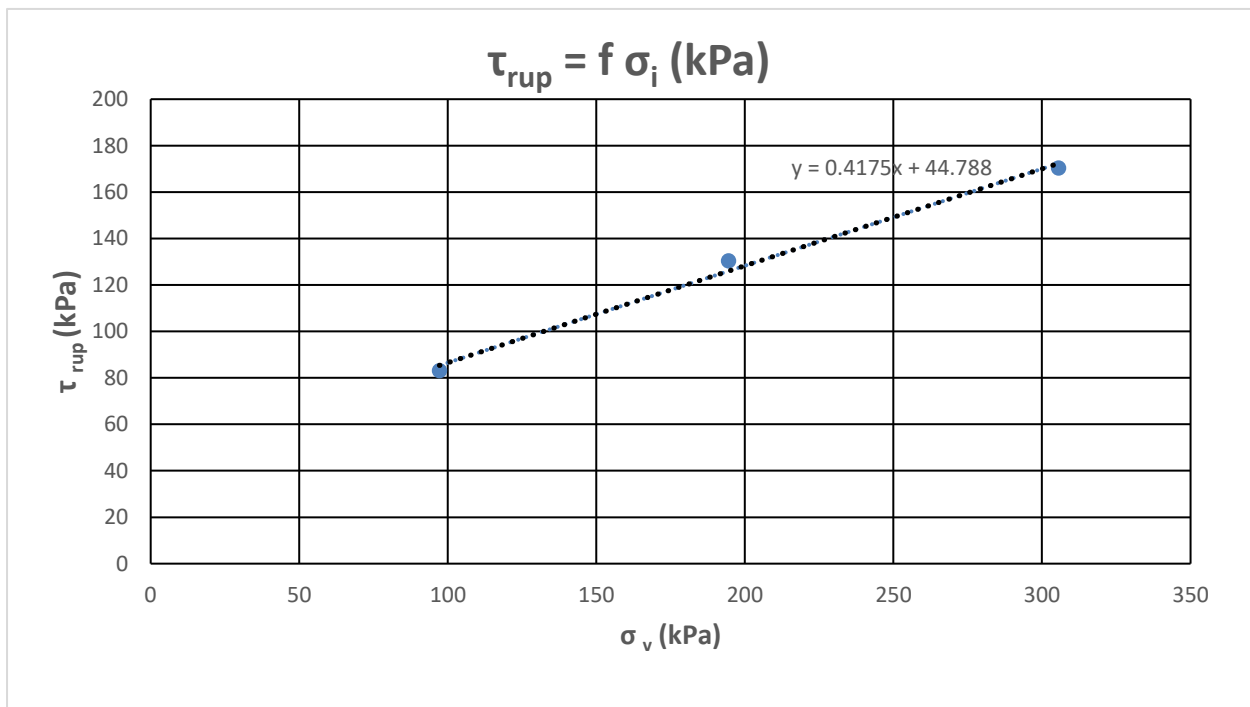
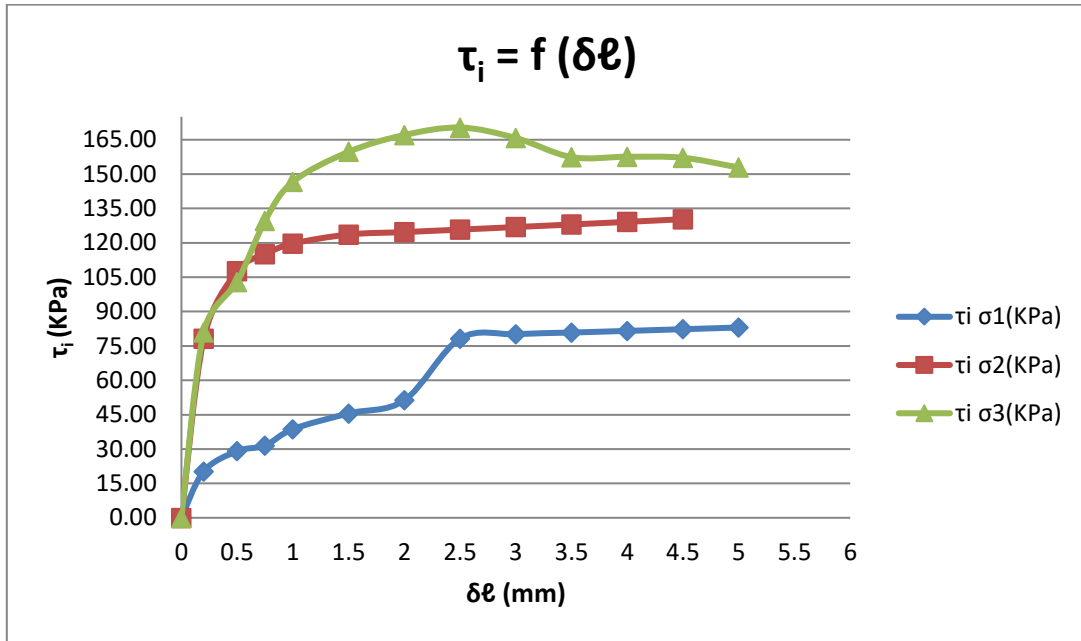
$g=10 \text{ m/s}^2$; $S=6*6=36 \text{ cm}^2$; $M \text{ (g)}$; $\sigma=(N/S)= 10*(10*M_i*g/36)= 1000 M_i/36 \text{ (KPa)}$

i =	1	2	3
M_i (Kg)	3,5	7	11
σ_vⁱ (kPa)	97,22	194,44	305,56
τ_{rup}ⁱ (kPa)	83,06	130,32	170,33

On trouve : τ_{rup}=0,417 et σ_v = 44,78

donc : tgφ =0,417 → φ=22,64°

et : C= 44,78 kPa



Références bibliographiques :

- [1] Daniel Corday « Mécanique des sols » Lavoisier Tec et Doc 1994
- [2] François Schlosser « éléments de mécanique des sols » Presses ponts et chaussées 2003
- [3] AFNOR. 1995 « Géotechnique tome 1 : Essais de reconnaissance des sols ».
- [4] Philippe Reiffsteck et al « Essais de laboratoire pour la mécanique des sols et la géotechnique, les outils pour la (re)connaissance des sols et des roches », Presses des ponts, 2018, 569p.
- [5] Clément Dosodt et Philippe Reiffsteck « Géotechnique, Exercices et problèmes corrigés de mécanique des sols, avec rappels de cours », Dunod, 2013, 246p.
- [6] J. Costet & G. Sanglerat « Cours pratique de mécanique des sols, Tome 1 : plasticité et calcul des tassements », Dunod 1981.
- [7] Guy Sanglerat Gilbert Olivari & Bernard Cambou « Problèmes pratiques de mécanique des sols et de fondation 1 », Dunod 1983.
- [8] Claude Plumelle « théorie et pratique de la géotechnique tome 1 et 2 » le Moniteur 2013
- [9] Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de L'Environnement (2iE), « Cours de mécanique des sols, tome 1 : Propriétés des sols », 137p.
- [10] R. Whitlow « Basic soil mechanics », 3rd Edition Longman, 1996, 559p.
- [11] Dr. Khalifa Harichane MCA, AU : 213-2014, « Cours Mécanique des sols 2^{ème} Année LMD ST », Univ. Hassiba Ben-Bouali de Chlef, 125p.
- [12] Appareils et matériels d'essai pour le bâtiment et les travaux publics (Contols), « Essais de sols ». 72p.
- [13] Mme BOUROKBA MRABENT Souad Amal et Mme BENGRA Lahouaria, 2022, « Polycoché : Manuel de travaux pratiques de mécanique des sols et de géotechnique routière », Université Mohamed BOUDIAF d'Oran, 99p.
- [14] Document technique réglementaire D.T.R B.C 2.32 « Methodes de sondage et d'essais des sols », Imprimerie Sarri El-Ebiar (Alger), 47p.