

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Ibn Khaldoun de Tiaret**  
**Faculté des Sciences Appliquées**  
**Département de Génie civil**



# **Polycopié**

## **Manuel des Travaux Pratiques de la Mécanique des Sols II**

**3<sup>ème</sup> Année Licence**

**Génie Civil**

Elaboré par:

**Dr. OUAZIR Khatima**

Experts:

**Dr. TLIDJI Youcef**

**Dr. SAOULA Abdelkader**

**Année universitaire : 2024-2025**

## Avant-propos

Le présent polycopie intitulé : « Manuel des Travaux Pratiques de la Mécanique des sols 2 (TP MDS 2) » est un support pédagogique de la matière « Travaux Pratiques Mécanique des sols 2 » destinée aux étudiants en 3<sup>ème</sup> Année Licence : GC . Programmée en Unité Méthodologique au Semestre 05, le canevas d'enseignement en question lui attribue deux crédits et un coefficient de 1.

Comme il est question d'un enseignement partiel correspondant nécessairement à des objectifs spécifiques, cette matière vise à acquérir les niveaux de compétence de la connaissance, de l'analyse et de la synthèse à travers les capacités respectives de caractériser les paramètres physiques des sols, de les classer à partir des essais d'identification de laboratoire . Il va en soi que l'acquisition soit reliée à des connaissances préalables recommandées (Cours de mécanique des sols MDS 1 et MDS 2). Ceci d'un côté. De l'autre, il est pertinent de réaliser les Travaux Pratiques au fur et à mesure que nous avançons.

Ce manuel vise à avoir accès en maîtrise et réception transversales à des éléments de connaissance catégorisés en deux niveaux. Niveau des normes de mesurage et niveau de manipulation.

A- Niveau des normes de mesurage :

- 1- 1- Déterminer et caractériser les paramètres physiques et mécaniques d'un échantillon d'un sol.
- 2- Classer les sols à partir des essais d'identification de laboratoire.
- 3- Savoir-faire d'utiliser le matériel d'un laboratoire
- 4- Détermination de la perméabilité d'un sol, par un perméamètre à charge constante et à charge variable.
- 5- Déterminer le coefficient de perméabilité  $K$  d'un sol et le gradient hydraulique ainsi la vitesse de l'écoulement en appliquant la loi de Darcy.
- 6- Déterminer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol soumis à une augmentation de contrainte verticale.
- 7- Etudier de la consolidation des sols intacts ou remaniés. Soumis à des charges verticales, drainés suivant cette direction et maintenus latéralement par une enceinte rigide.
- 8- Déterminer les courbes de compressibilités et de la consolidation et ainsi en déduire le tassement d'un massif de sol sous l'effet d'une charge quelconque.
- 9- Déterminer les caractéristiques qui permettent de prévoir l'importance et la durée des tassements d'un sol :
  - L'indice de compression
  - La pression de préconsolidation
  - Le coefficient de consolidation
- 10- Déterminer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol pulvérulent (sable) soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante.

- 11- Déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante.
- 12- Tracer la courbe intrinsèque du sol étudié,
- 13- Déterminer les caractéristiques qui se traduisent en général par deux paramètres très importants qui sont:
  - L'angle de frottement interne des grains " $\phi$ "
  - La cohésion du sol "C".

#### B-Niveau d'application :

Manipulation et utilisation des appareils dans les essais d'expérimentation selon le principe de respect des modalités d'usage de la discipline (la précision, le temps de réponse, personnalisation de fonctionnement, ...).

Trois TP sont prévus :

TP N°1 - Perméabilité des sols (Perméamètre 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

Pour boucler la chaîne expérimentale, il y a lieu d'envisager un mode d'évaluation, le compte-rendu est envisagé.

La réalisation des TP s'inspire bien évidemment de ressources et références tout à fait récentes dont les termes techniques ci-dessous offrent les détails :

- Norme NF P 94 051 (Sols : reconnaissance et essais. .
- Classification des sols L.C.P.C.

Dr. OUAZIR Khatima

Septembre 2024

# Tables des Matières

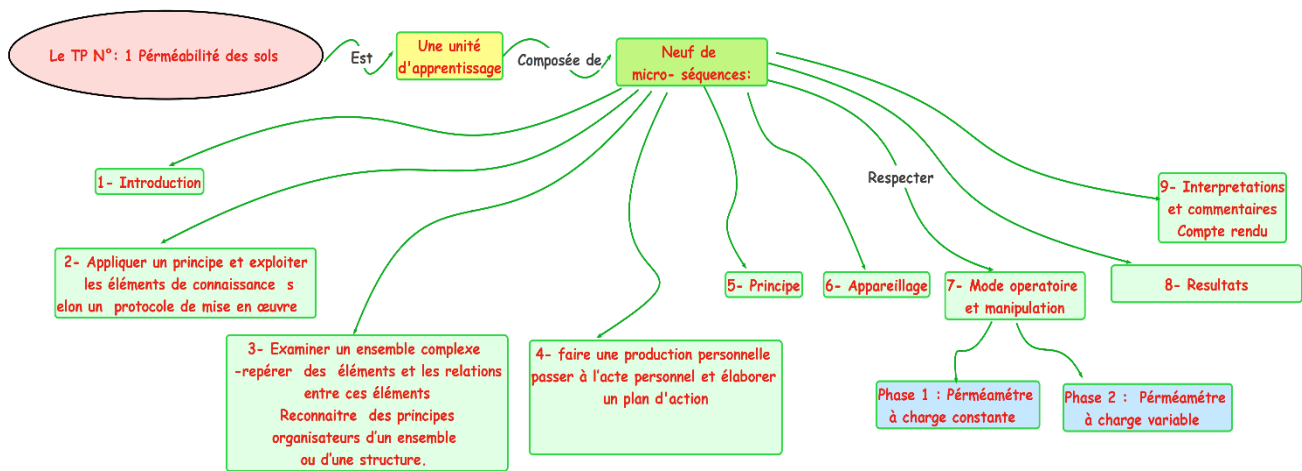
<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>TP N°1: Perméabilité des sols<sup>3</sup>(Perméamètres à charge constante et à charge variables)</b> .....	3
1- Problématique .....	3
2- Documents à consulter :.....	3
3- Introduction : .....	3
4- But de l'essai : .....	3
5- Intérêt en Génie Civil.....	4
6- Définitions : .....	4
7- Principe : .....	5
8- Appareillage :.....	6
9- Mode opératoire :.....	6
10- Expression des résultats :.....	8
11- Compte rendu : .....	10
<b>TP N°2: Essai de compressibilité à l'oedomètre</b> .....	12
1- Problématique .....	12
2- Documents à consulter :.....	12
3- Introduction : .....	12
4- But de l'essai : .....	12
5- Intérêt en Génie Civil.....	13
6- Définitions : .....	13
7- Principe : .....	14
8- Appareillage :.....	15
9- Mode opératoire :.....	18
10- Expression des résultats :.....	19
11- Compte rendu : .....	22
<b>TP N°3: Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande</b> .....	26
1- Problématique .....	26
2- Documents à consulter :.....	26
3- Introduction : .....	26
4- But de l'essai : .....	27
5- Intérêt en Génie Civil.....	27
6- Définitions : .....	27
7- Principe : .....	29
8- Appareillage :.....	30
9- Mode opératoire :.....	33
10- Expression des résultats :.....	36
11- Compte rendu : .....	39
<b>Références Bibliographiques</b> .....	46

## INTRODUCTION

Ce manuel est composé de cinq TP, chaque TP est une unité d'apprentissage composée de neuf de micro-séquences (Cf. ci-dessous). Introduit par des concepts de pré-requis, le manuel porte essentiellement sur le triptyque du TP (manipulation, application et vérification) au bout duquel le compte-rendu est prévu comme modalité d'évaluation formative.

Pour un plus d'ordre pédagogique, la carte conceptuelle ci-dessous représente mieux graphiquement les subdivisions conceptuelles d'un exemple de TP et précise les relations qui les unissent et les hiérarchisent. Elle propose un réseau sémantique de synthèse bien schématisée.

Les niveaux de compétence retenus dans cette matière cherchent à transformer chez les étudiants leurs capacités en compétences. En fait, il est question de les amener à implémenter et à extrapoler selon un socle de savoirs essentiels



**Figure 1 : Carte conceptuelle du contenu technique d'un TP**

➤ **Axe fondamental :**

Connaissances disciplinaires : Exploration et utilisation d'éléments et de formules conceptuelles.

➤ **Axe transversal :**

Connaissances connexes (ayant un rapport de ressemblance ou de dépendance avec les connaissances disciplinaires). A traduire ces repères, il est attendu des étudiants qu'ils soient capables d'effectuer certaines opérations mentales telles qu'elles sont définies dans la taxonomie de bloom

**-1. Connaissance :** retenir des données particulières (des éléments de connaissance), des mots, des termes et des faits

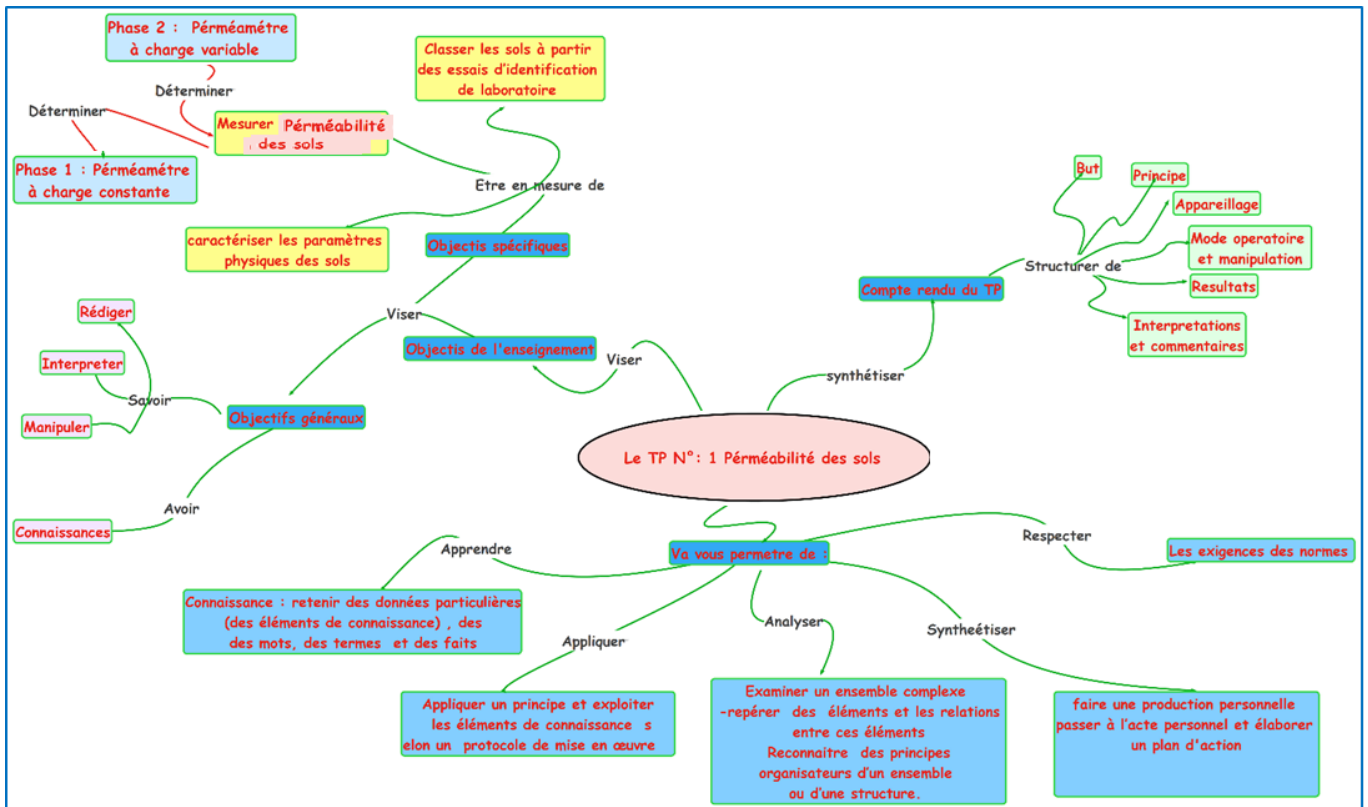
**-2. Application :** Appliquer un principe et exploiter les éléments de connaissance selon un protocole de mise en œuvre

## TINTRODUCTION

-3. **Analyse** : Examiner un ensemble complexe -repérer des éléments et les relations entre ces éléments Reconnaître des principes organisateurs d'un ensemble ou d'une structure.

-4. **Synthèse** : Faire une production personnelle et passer à l'acte personnel et élaborer un plan d'action

**Carte conceptuelle.** Taxonomie de Bloom. Elle illustre le rapport de complémentarité entre les niveaux supérieurs et inférieurs dans l'acte d'apprentissage.



**Figure 2 : Carte conceptuelle des visées d'apprentissages d'un TP**

La compétence visée ne peut avoir de sens sans les savoirs essentiels : savoir ; savoir-faire et savoir être.

Pour les savoirs, seule la méthode transmissive permet d'assurer le maximum de ramassage de connaissances et de concepts théoriques confrontés à des démonstrations et vérifications bien ficelées.

Au sujet des savoir-faire, synonymes d'application des règles et des principes, les TP permettent de tester votre compréhension, assimilation un principe et maîtrise.

Quant au savoir-être, c'est la démarche personnelle qui engage responsabilité, conscience. C'est l'intelligence personnelle qui s'investit pleinement.



**TP N°1: Perméabilité des sols**  
**(Perméamètres à charge constante et à charge variables)**

**1- Problématique :** Identifier un sol afin de le classer selon les normes.

**2- Documents à consulter :**

- ✓ EN NF 94-050 : Sol : Reconnaissances et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des sols- Méthode par étuvage. Norme Française, 1997.
- ✓ EN NF x30-442 : Détermination au laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau : essais de perméabilité à l'oedomètre, à charge hydraulique constante ou variable. Norme Française, 1998.
- ✓ Classification des sols L.C.P.C.

**3- Introduction :**

L'une des plus importantes caractéristiques physiques d'un sol est la perméabilité. Afin de déterminer les efforts qu'exerce un sol, on doit impérativement déterminer sa perméabilité.

L'étude de l'écoulement de l'eau libre dans les sols trouve ses applications dans divers domaines de la géotechnique.

La perméabilité se diffère d'un sol à un autre, l'eau s'installe à l'intérieur des vides qui se trouve entre les grains. Et cette eau peut être expulsée de ces vides à l'aide de l'évaporation (température élevée) ou à l'aide d'un chargement extérieur qui provoquent le phénomène de tassement qui évolue dans un temps considérable c'est ce qu'on appelle un tassement de consolidation.

Le coefficient de perméabilité d'un sol saturé est une caractéristique du sol qui dépend essentiellement de sa granularité, de sa nature, de sa structure, de son indice des vides et de la température. Plus un sol est fin ou compact, plus les pores sont petits, plus les frottements et les pertes de charge sont importantes et plus le coefficient de perméabilité est petit.

La perméabilité d'un sol peut être déterminée 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 (graviers 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).

**4- But de l'essai :**

- Déterminer les propriétés physiques et mécaniques d'un échantillon d'un sol.
- Détermination de la perméabilité d'un sol, par un perméamètre à charge constante et à charge variable.
- Savoir-faire d'utiliser le matériel d'un laboratoire.
- Déterminer le coefficient de perméabilité  $K$  d'un sol et le gradient hydraulique ainsi la vitesse de l'écoulement en appliquant la loi de Darcy.

## TP N°:1 Perméabilité des sols (Perméamètre à charge constante et à charge variable)

### 5- Intérêt en Génie Civil

La perméabilité d'un sol est un paramètre d'état fondamental qui détermine son comportement. Elle 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 propriétés dynamiques de l'eau de gravité ou la facilité avec laquelle cette eau est capable de s'infiltrer dans le sol est définie comme étant la perméabilité. Elle a une influence vitale sur les problèmes de fondations et certains ouvrages de mécanique des sols tels que :

- ✓ La stabilité des barrages.
- ✓ La stabilité des excavations ouvertes.
- ✓ La stabilité des ouvrages en palplanches.
- ✓ Les caractéristiques de consolidation du sol.
- ✓ La classification des sols et leurs propriétés.

L'étude de l'écoulement d'eau libre dans les sols trouve ses applications dans divers domaines de la géotechnique, notamment :

- ✓ Rabattement des nappes d'eau dans les fouilles,
- ✓ Drainage d'eau dans les ouvrages (soutènement, remblai, ...)
- ✓ Analyse de la stabilité de certains ouvrages vis-à-vis des problèmes causés par l'écoulement d'eau, notamment les barrages, les rideaux de palplanches et les talus,
- ✓ Consolidation du sol par drainage forcé de l'eau interstitielle

### 6- Définitions : L'eau du sol existe sous quatre formes :

- \* **Eau libre :** Qui peut se déplacer dans les vides compris entre les grains solides, sous l'effet d'un gradient hydraulique, circule librement.
- \* **Eau adsorbée :** Qui constitue une pellicule extrêmement mince entourant chaque grain. Elle joue un très grand rôle dans la force de cohésion.
- \* **Eau de constitution :** Qui entre dans la composition chimique du terrain, ou eau de cristallisation par exemple pour le gypse.
- \* **Eau capillaire :** Dans le sol non saturée, l'eau en contact avec l'air interstitielle occupe une partie des vides entre les grains. Les forces de tension capillaire dues au contact air-eau (soudent) les grains entre eux et contribuent à la pseudo-cohésion dans le sol pulvérulent, et à la cohésion du sol argileux.
- \* **La perméabilité** d'un matériau est caractérisée par le coefficient de perméabilité  $K$  défini à partir de la loi de **DARCY**.

$$V = K \cdot i$$

**Avec :**

$V$  : La vitesse d'écoulement.

$i$  : Gradient hydraulique  $i = \frac{dh}{dL}$

$dh$  : Perte de charge sur la distance  $dL$  mesurée dans le sens de l'écoulement (la quantité  $dL$  est positive).

$K$  a les dimensions d'une vitesse. L'essai de perméabilité à pour objet la mesure de  $K$ .

- \* **Loi de Darcy :** La loi de Darcy exprime que le vitesse moyenne  $v$  de l'eau qui s'écoule dans le sol est proportionnelle au gradient hydraulique  $i$  ( $i$  : est défini par la perte de charge par unité de longueur) :  $v = k i = k \Delta h / \Delta l$
- \* **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 (Tableau 1).



## TP N°:1 Perméabilité des sols (Perméamètre à charge constante et à charge variable)

Tableau 1 : Ordre de grandeur de coefficient de perméabilité.

Nature	Ordre de grandeur de K en m/s	Degré de perméabilité
Graviers	$10^{-1}$ à $10^2$	Très élevé
Sable	$10^{-3}$ à $10^{-1}$	Assez élevé
Limon, sable argileux	$10^{-7}$ à $10^{-3}$	Faible
Argile	$10^{-11}$ à $10^{-7}$	Très faible
Roche fissurée	$10^{-10}$ à $10^{-8}$	Pratiquement imperméable

- Au laboratoire, **la perméabilité se mesure** au :
- **perméamètre à charge constante** si l'on mesure le débit nécessaire pour maintenir plein le réservoir haut ;
  - **perméamètre à charge variable** si l'on mesure, en fonction du temps, la descente dans le tube (situé sous le réservoir haut).

### 7- Principe :

L'essai de perméabilité consiste à mesurer le temps nécessaire à un volume de fluide pour parcourir la longueur de l'échantillon, sous une pression d'injection donnée.

L'échantillon de sol placé dans un moule cylindrique est soumis à une charge hydraulique connue constante ou variable. On mesure le volume d'eau qui traverse l'échantillon pendant un temps donné. En appliquant la loi de **DARCY** on déduit le coefficient de perméabilité cherché.

Deux méthodes qui sont des applications directes de la loi de DARCY sont largement utilisées en laboratoire :

- ✓ Mesure sous charge constante pour les sols très perméables (les graviers et les sables).
- ✓ Mesure sous charge variable pour les sols peu perméables (les limons et les argiles).

#### ➤ a) **Perméamètre à charge constante :**

L'échantillon de sol, d'une densité appropriée, est placé dans une cellule étanche de section transversale **S** et de longueur **L**. Les deux extrémités de l'échantillon sont reliées à deux tubes par l'intermédiaire de pierres poreuses. Un écoulement d'eau vertical, sous une charge constante est maintenu à travers le sol. La perte de charge **h** et la quantité d'eau **Q** qui passe pendant un temps donné **t** sont mesurés. Ce qui permet de calculer le gradient hydraulique **i** et le coefficient de perméabilité :  **$k = Q.L / S.h$**

Une série de tests doit être effectuée, chaque test a un taux d'écoulement différent. Avant de commencer l'essai, une succion est appliquée à l'échantillon de sol afin de s'assurer que le degré de saturation avoisine les 100%.

#### ➤ b) **Perméamètre à charge variable :**

L'échantillon de sol non remanié est testé dans un cylindre de longueur **L** et de section transversale **S**, qui peut être l'échantillonneur. Des pierres poreuses sont placées à chaque extrémité du spécimen et une colonne montante connectée à la partie supérieure du cylindre. Le drainage s'effectue dans un réservoir où le niveau est maintenu constant par un trop plein. La colonne est par la suite remplie d'eau et à un temps (**t1-t2**) son niveau baisse de **h1** à **h2**. A l'instant **dt** la perte de charge correspondante est **dh**, donc le débit est :

## TP N°:1 Perméabilité des sols (Perméamètre à charge constante et à charge variable)

$$Q = -a.(dh/dt) = S.k.(h/L)$$

$$-dh/h = (S.k/a.L)dt$$

$$-\log(h_2/h_1) = \log(h_1/h_2) = (S.k/aL)(t_2-t_1)$$

$$k = (a.L/S.(t_2-t_1)).\log(h_1/h_2)$$

### 8- Appareillage :

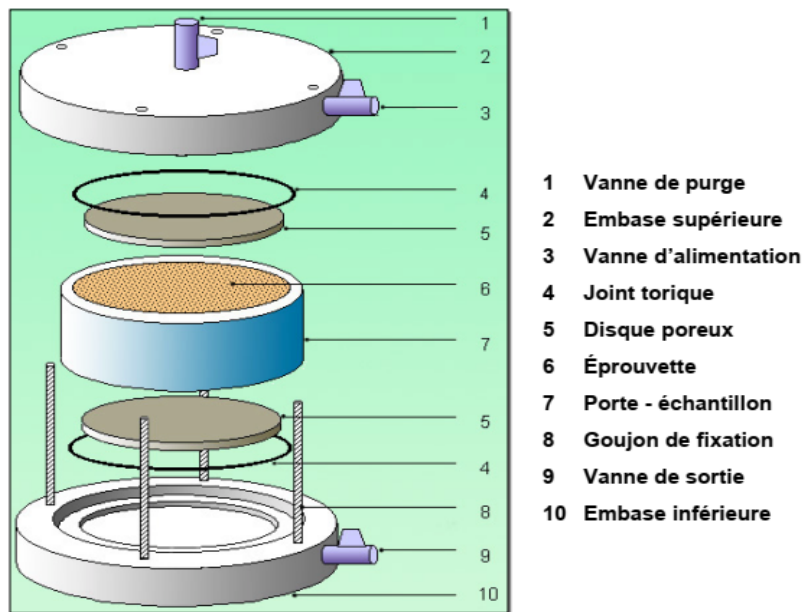
- Un perméamètre est composé d'une cellule rigide de section constante fermée à chacune de ses deux extrémités par une pierre poreuse.

La mesure de la vitesse  $V$  qui intervient dans la loi de Darcy se faisant par l'intermédiaire de l'équation de continuité sous la forme  $V \cdot S = Q$  ( $Q$  étant le débit) il importe de s'assurer qu'il n'y a pas de fuite latérale.

Le perméamètre utilisé pour la manipulation est de section cylindrique.



Figure 1 : Appareillage (vue éclatée d'un perméamètre à paroi rigide)



Vue éclatée d'un Perméamètre à paroi rigide (d'après NF X30-441)

- Un Perméamétrie avec accessoires : un tube de verre fermé en Bas avec un robinet, des tubes.
- Un panneau de tubes Piézométrique a défèrent niveau.
- Un support de perméamètre avec accessoires.
- Chronomètre : pour déterminer le temps d'écoulement.
- L'échantillon de sol.
- Un réservoir d'eau.
- Une éprouvette graduée.
- Un panneau de mesure constitué essentiellement d'un bac à niveau constant, d'un tube piézométrique et d'une règle graduée.



Figure 2 : Appareillage (panneau de tubes Piézométrique a défèrent niveau)

### 9- Mode opératoire :

#### ❖ Confection de l'échantillon :

Le perméamètre est constitué de deux embases (contenant les pierres poreuses) s'ajustant sur une corps cylindrique. Un joint torique placé entre les embases et le corps assure l'étanchéité latérale. L'échantillon doit remplir toute la section disponible et être bien appliqué entre les parois du perméamètre pour mesurer la perméabilité de l'échantillon uniquement et non celle de l'assemblage échantillon-corps du perméamètre.

## TP N°:1 Perméabilité des sols (Perméamètre à charge constante et à charge variable)

On monte le corps du perméamètre sur l'une des embases (sans oublier le joint d'étanchéité) et on protège la pierre poreuse par une rondelle de papier filtre afin d'éviter un encrassement prématuré de celle-ci. Le papier filtre doit recouvrir complètement la pierre poreuse sans déborder, afin d'éviter toute fuite d'eau à ce niveau.

On verse progressivement le matériau sec jusqu'au niveau supérieure du moule en essayant de lui donner la compacité maximale. Pendant cette opération il faut maintenir le corps du perméamètre pour éviter qu'il ne se dégage de l'embase inférieure, ce qui aurait pour conséquence l'apparition d'une fuite certaine.

Le moule étant rempli, on arase. On place une rondelle de papier filtre sur la pierre poreuse solidaire du couvercle (humecter cette dernière pour assurer une bonne adhérence), et ensuite on pose l'ensemble sur le perméamètre sans oublier le joint d'étanchéité. Le tout est rendu solidaire par l'intermédiaire des trois écrous à oreilles.

Enfin, en temps vol, on raccorde les canalisations souples au perméamètre de façon que le courant liquide qui traversera ultérieurement l'échantillon soit ascendant, ceci afin de limiter l'entraînement des particules fines par le courant liquide.

### ❖ Saturation de l'échantillon et des circuits de mesure :

Avant tout essai de perméabilité, l'échantillon et tout le circuit hydraulique doivent être saturés.

Pour cela il n'existe pas de méthode générale et celle-ci doit être adaptée à l'appareillage utilisé et même au type de sol étudié. Dans le cadre de la manipulation, il suffit de mettre le système de mesure en eau et de chasser les bulles d'air au fur et à mesure qu'elles apparaissent dans les circuits hydrauliques.

On laisse l'eau s'écouler librement à travers l'échantillon, progressivement celui-ci se sature et un régime permanent d'écoulement s'établit.

L'essai portant sur un échantillon très perméable, on considère que dix minutes suffisent pour obtenir une bonne saturation.

Ensuite les mesures peuvent débiter.

### ❖ Les mesures au perméamètre :

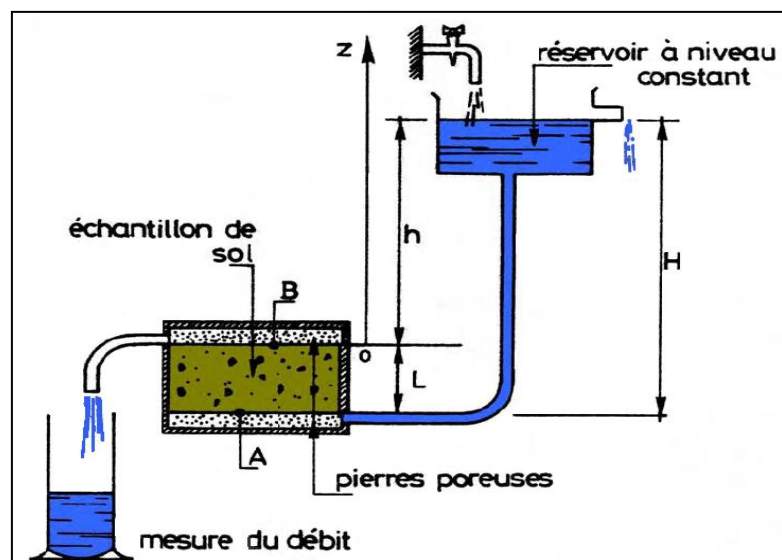
On mesure le temps nécessaire à l'écoulement d'une certaine quantité d'eau à travers un échantillon de sol placé dans le moule. Cet échantillon peut être intact ou remanié, l'essai peut être réalisé à charge constante ou variable. On obtient le coefficient de perméabilité ( $K$ ) par application de la loi de **Darcy**. Dans tout les cas le coefficient de perméabilité est défini pour un indice des vides donné.

Le perméamètre à charge constante est utilisé pour des matériaux pulvérulents assez perméables (sable propre, graviers, etc...), alors que le perméamètre à charge variable est employé pour des matériaux de faibles perméabilité (argile, etc...).

#### ➤ Le perméamètre à charge constante :

L'alimentation se fait directement par le réservoir dans lequel on maintient un niveau constant d'eau. On recueille l'eau qui traverse le matériau dans une éprouvette graduée en notant le temps nécessaire à l'écoulement d'un volume d'eau donné.

Figure 3 : Perméamètre à charge constante.



## TP N°:1 Perméabilité des sols (Perméamètre à charge constante et à charge variable)

### ➤ Le perméamètre à charge variable :

- ☞ Ouvrir la vanne **R2** afin de faire remonter l'eau dans le tube de mesure jusqu'à un niveau légèrement supérieur à  $h_1$ . Refermer **R2**, puis **R1**.
- ☞ L'essai peut commencer.
- ☞ Rouvrir **R2**, lorsque le niveau passe au repère  $h_1$ , déclencher un chronomètre (en fonction de la nature du sol une montre peut être nécessaire).
- ☞ Laisser descendre le niveau jusqu'au repère  $h_2$ , au dessous du plan de sortie, et noter le temps  $t_1$  écoulé.
- ☞ Fermer **R3**.
- ☞ Recommencer l'essai plusieurs fois.

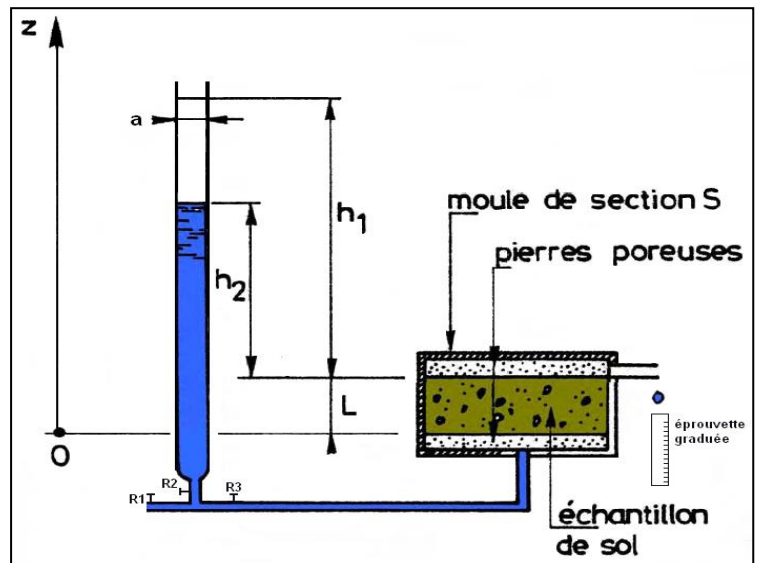


Figure 4 : Perméamètre à charge variable.

### 10- Expression des résultats :

Pour chaque essai il convient de calculer le coefficient de perméabilité, de tracer et de compléter les tableaux des calculs.

Le coefficient de perméabilité  $K$  est une grandeur physique définie théoriquement par les formules suivantes :

### ➤ Essai : perméamètre à charge constante

#### Feuille d'essai :

Calcul des débits et de la perméabilité.

$$L = \dots\dots\dots (m)$$

$$S = \dots\dots\dots (m^2)$$

Opération (i)	Volume d'eau V (m <sup>3</sup> )	Temps t(s)	Débit Q = V/t (m <sup>3</sup> /s)	Coefficient de perméabilité (K)
1				
2				
3				
4				
5				

La perméabilité est calculée par :

$$K = \frac{Q}{t} \cdot \frac{L}{S \cdot h}$$

#### Avec :

$K$  : Coefficient de perméabilité.

$S$  : Section de l'échantillon.

$L$  : Hauteur de l'échantillon.

$Q$  : Volume recueilli pendant un temps  $t$ .

$h$  : Charge hydraulique.

## TP N°:1 Perméabilité des sols (Perméamètre à charge constante et à charge variable)

### ➤ Essai : perméamètre à charge variable

Calcul des débits et de la perméabilité

$L = \dots\dots\dots (m)$

$S = \dots\dots\dots (m^2)$

$a = \dots\dots\dots (m^2)$

Opération (i)	Charge initiale $h_i$	Perte de charge $\Delta h$	Gradient hydraulique $i = \Delta h/L$	Temps t(s)	Coefficient de perméabilité (K)	Débit ( $m^3/s$ )
0						
1						
2						
3						
4						
5						

La perméabilité est calculée par :

$$K = \frac{L}{t} \cdot \frac{a}{S} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

#### Avec :

$K$  : Coefficient de perméabilité.

$Q$  : Volume d'eau recueilli.

$t$  : Temps nécessaire pour la charge passe de  $h_1$  à  $h_2$ .

$L$  : Hauteur de l'échantillon.

$S$  : Section de l'échantillon.

$a$  : Section du tube.

$h_1$  : Charge hydraulique initiale.

$h_2$  : Charge hydraulique finale.

#### Annexe :

Le tableau ci-après donne les intervalles de valeurs correspondant aux perméabilités de quelques types de sol :

Type de sol	Coefficient de perméabilité (m/s)	Perméabilité
Grave	$10^{-3} < k < 1$	très élevée
Sables	$10^{-5} < k < 10^{-3}$	assez élevée
Limons et sables argileux	$10^{-9} < k < 10^{-5}$	faible
Argiles	$10^{-13} < k < 10^{-9}$	Pratiquement imperméable

#### Remarque :

1. Pour avoir un ordre de grandeur facile à retenir  $10^{-8}m/s$  représente une vitesse de **30 cm/an** environ.
2. Les roches non fissurées ont des perméabilités variant de  $10^{-10}$  à  $10^{-12} m/s$ .

## TP N°:1 Perméabilité des sols (Perméamètre à charge constante et à charge variable)

### 11- Compte rendu :

Il vous est demandé de :

1. Réaliser au moins deux essais selon le type .
2. Dresser le tableau des résultats. Compléter les tableaux des calculs en vous aidant du document réponse N°1.
3. Déterminer le coefficient de perméabilité du sol .
4. Commenter vos résultats ?
5. Tracer les courbes de relation  $Q = f(i)$  pour les deux essais ?
6. Quelle est la relation entre débit et perte de charge pour l'essai à charge variable ?

**TP N°:1 Perméabilité des sols (Perméamètre à charge constante et à charge variable)**

**Document réponse N°1**

**I – Détermination le coefficient de perméabilité du sol.**

Compléter le tableau des calculs suivant :

➤ **Essai : perméamètre à charge constante**

Calcul des débits et de la perméabilité.

$h = 1.56 \text{ m}$                        $S = \dots\dots\dots (m^2)$      $d_{\text{moule}} = 10.5 \text{ cm}$      $L_{\text{moule}} = 11.5 \text{ cm}$

Opération (i)	Volume d'eau V (ml)	Temps t(s)	Débit $Q = V/t$ ( $m^3/s$ )	Coefficient de perméabilité (K)
1	200	50		
2	400	55		
3	600	54		
4	800	49		
5	1000	52		
6	1200	54		
7	1400	54		
8	1600	57		
10	1800	57		
11	2000	56		

La perméabilité est calculée par :  $K = \frac{Q}{t} \cdot \frac{L}{S \cdot h}$

**Avec :**

**K** : Coefficient de perméabilité. **S** : Section de l'échantillon. **d<sub>moule</sub> = 10.5cm**    **L** : Hauteur de l'échantillon. **L=11.5cm**  
**Q** : Volume recueilli pendant un temps **t**.                      **h** : Charge hydraulique. **h=1.56m**

➤ **Essai : perméamètre à charge variable**

Calcul des débits et de la perméabilité

$L = 1.56(m)$                        $S = \dots\dots\dots (m^2)$                        $a = \dots\dots\dots (m^2)$   
 $d_{\text{tube}} = 1.5 \text{ cm}$

Opération (i)	Charge initiale $h_i$	Perte de charge $\Delta h$	Gradient hydraulique $i = \Delta h/L$	Temps t(s)	Coefficient de perméabilité (K)	Débit ( $m^3/s$ )
0	0			0		
1	16			1		
2	32			5		
3	48			8		
4	64			14		

La perméabilité est calculée par :  $K = \frac{L}{t} \cdot \frac{a}{S} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$

**Avec :**

**K** : Coefficient de perméabilité. - **Q** : Volume d'eau recueilli. - **t** : Temps nécessaire pour la charge passe de **h<sub>1</sub>** à **h<sub>2</sub>**. - **L** : Hauteur de l'échantillon. **L=11.5cm**. - **S** : Section de l'échantillon. **d<sub>moule</sub> = 10.5cm** –  
- **a** : Section du tube. **d<sub>tube</sub> = 1.5 cm** - **h<sub>1</sub>** : Charge hydraulique initiale. - **h<sub>2</sub>** : Charge hydraulique final





*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique*  
*Faculté des Sciences et de la Technologie et Sciences de la Matière*  
*Département des Génie Civil*



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

**1- Problématique :** Identifier un sol afin de le classer selon les normes.

**2- Documents à consulter :**

- ✓ EN NF 94-090-1 : Sol : Reconnaissances et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des sols- Méthode par étuvage. Norme Française, 1997.
- ✓ EN NF XP 94-090-1 : Détermination au laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau : essais de perméabilité à l'oedomètre, à charge hydraulique constante ou variable. Norme Française, 1998.
- ✓ Classification des sols L.C.P.C.

**3- Introduction :**

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.

Lorsque des couches de sols sont soumises à des sollicitations de grande étendue (dallages, Remblais...) on peut considérer que la compression est unidimensionnelle. La déformation verticale qui en résulte est appelée tassement. Pour simuler en laboratoire ces chargements unidimensionnels, on comprime des échantillons intacts de sol dans un appareil appelé **oedomètre**. Cet essai permet d'établir, pour un échantillon donné, deux types de courbes :

- **la courbe de compressibilité**, qui indique le tassement total en fonction de logarithme de la contrainte appliquée,
- **les courbes de consolidation**, qui donnent le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous application d'une contrainte constante.

**4- But de l'essai :**

L'essai oedométrique a pour but :

- La détermination des caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol soumis à une augmentation de contrainte verticale. Ceci permet de déterminer les courbes de compressibilités



et ainsi en déduire le tassement d'un massif de sol sous l'effet d'une charge quelconque.

- La Détermination des propriétés physiques et mécaniques d'un échantillon d'un sol.
- Savoir-faire d'utiliser le matériel d'un laboratoire.
- L'étude de la consolidation des sols intacts ou remaniés. Soumis à des charges verticales, drainés suivant cette direction et maintenus latéralement par une enceinte rigide.
- La détermination des courbes de compressibilités et de la consolidation et ainsi en déduire le tassement d'un massif de sol sous l'effet d'une charge quelconque.
- Le savoir-faire d'utiliser le matériel d'un laboratoire.
- La détermination des caractéristiques qui permettent de prévoir l'importance et la durée des tassements d'un sol :
  - L'indice de compression
  - La pression de préconsolidation
  - Le coefficient de consolidation
- L'essai fournit en outre des renseignements sur l'histoire du chargement du sol.

### **5- Intérêt en Génie Civil**

Pour assurer la stabilité d'une construction, il est nécessaire et après avoir déterminé les contraintes qui peuvent exister dans les matériaux et vérifié qu'elles sont inférieures aux valeurs admissibles, de contrôler que les déformations qui en résultent n'entraînent aucun désordre pour la construction en étudiant le phénomène consolidation.

- La consolidation est le phénomène de réduction du volume d'une couche d'un sol saturé soumis à des charges verticales qui sont souvent des constructions, ce phénomène de consolidation engendre forcément avec lui à un tassement.

### **6- Définitions :**

- **Œdomètre** : Appareil permettant de charger axialement une éprouvette de forme cylindrique placée dans un cylindre rigide (à déformation transversale nulle) et de mesurer sa variation  $\Delta H$  de hauteur  $H$ . Les faces supérieure et inférieure de l'éprouvette, qui est généralement submergée, sont en contact avec des disques drainants.
- **Contrainte de chargement  $\sigma$**  : Contrainte moyenne totale a obtenue en divisant l'effort axial  $N$  par l'aire de la section transversale de l'éprouvette cylindrique, identique à celle intérieure de l'œdomètre.
- **Déformation axiale  $\Delta H/H$**  : Déformation qui se produit lorsqu'une contrainte axiale a est appliquée à une éprouvette de matériau fretté latéralement.
- **Courbe œdométrique** : Représentation du diagramme donnant l'indice des vides ( $e$ ) de l'éprouvette soumise à essai à la fin de chaque palier de consolidation, en fonction de la contrainte effective ( $\sigma'$ ), égale à la contrainte totale ( $\sigma_v$ ) qui lui est appliquée en début d'essai. La durée du palier est telle que la pression interstitielle est nulle dans l'éprouvette à la fin de la consolidation. Une représentation dans un système de coordonnées semi-logarithmique est généralement choisie :  

$$e = f(\lg \sigma'_v) \quad e = f(\log \sigma)$$

La contrainte normale :  $\sigma = N/S$

$$\sum M/(O) = 0 \Rightarrow P \cdot (a + b) + N \cdot a = 0$$

$$\Rightarrow N = P \cdot (a + b)/a$$

$$S = \pi \cdot D^2/4$$

D : diamètre de l'échantillon

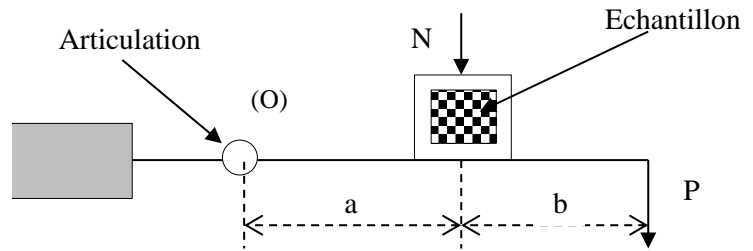


Figure 1 : Schéma statique

- \* **Le poids de l'échantillon  $w_s$**  :  $w_s = w_{cellule+échantillon} - w_{cellule}$
- \* **Le poids volumique sec de l'échantillon  $\gamma_d$**  :  $\gamma_d = w_s/V_T$  ou  $V_T = S \cdot H_0$
- \*  **$H_0$** : La hauteur initiale de l'échantillon.
- \* **L'indice du vide  $e$**  :

$$e_0 = (\gamma_s/\gamma_d) - 1$$

**Avec** :  $e_0$ : indice du vide initial.

On a :  $\Delta H/H_0 =$

$$\Delta e/(1 + e_0) =$$

$$(e - e_0)/(1 + e_0)$$

$$\Rightarrow e = e_0 - (1 + e_0) \cdot (\Delta H/H_0)$$

Détermination de  $C_c, C_s, \sigma_p$  :

- \* **L'indice de gonflement  $C_s$**  : est la pente de la droite AB.
- \* **L'indice de compression  $C_c$**  : est la pente de la droite MN.
- \* **La contrainte de pré-consolidation  $\sigma_p$**  : Correspond au point C résultant de l'intersection des droites DL et MN.

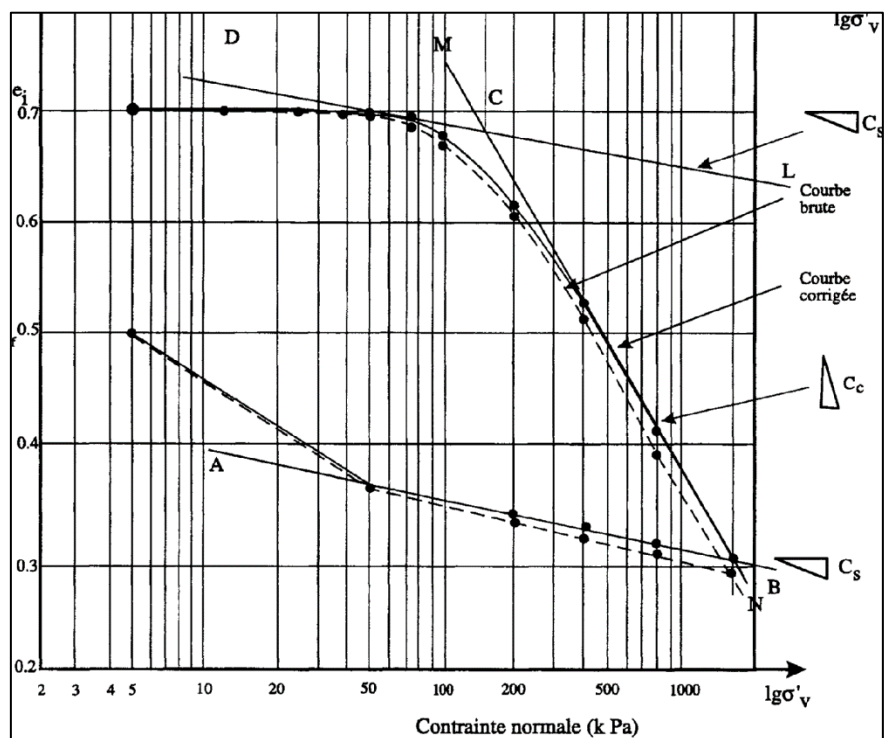


Figure 4 : représentation dans un système de Coordonnées semi-logarithmique

- \* **Courbe de consolidation** : Variation de hauteur (**tassement**)  $s$  de l'éprouvette en fonction du **temps  $t$**  sous l'effet d'une contrainte appliquée au début de l'essai  $\sigma_{v,}$ , et maintenue constante. Les représentations choisies sont soit  $s$  en fonction du logarithme du **temps** soit  $s$  en fonction de la racine carrée du **temps**.
- \* **Convention de signe** : Une diminution de hauteur de l'éprouvette est comptée positivement. Les contraintes de compression sont positives.

**7- Principe :**

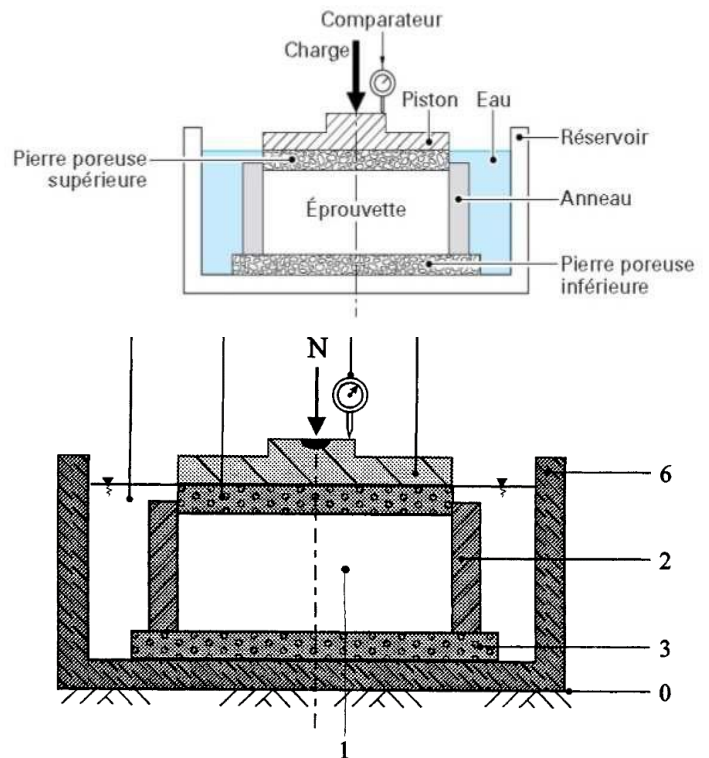
- L'essai oedométrique consiste à soumettre un échantillon d'un sol fin et saturé à une série de surcharges verticales et de suivre l'évolution des déformations verticales en empêchant toute déformation latérale. L'échantillon de sol est placé entre deux pierres poreuses qui permettent de drainer le sol, dans une

Le moule oedométrique qui empêche les déformations latérales, on applique une série de pression verticale et on suit l'évolution des déformations verticales du matériau en fonction de temps, à l'aide des comparateurs.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de matériau placée dans une enceinte cylindrique rigide (œdomètre). Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai (**voir figure 5**). La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge. Les paliers de chargement et de déchargement sont maintenus au moins 24 heures et prolongés si nécessaire dans les conditions fixées par la norme.

**0- Bâti**

- 1- Éprouvette de matériau
- 2- Enceinte œdométrique
- 3- Disque drainant inférieur
- 4- Disque drainant supérieur
- 5- Dispositif de chargement
- 6- Réservoir
- 7- Liquide d'imbibition
- 8- Mesurage du déplacement
- 9- Effort N sur l'éprouvette



**Figure 5** : Principe de l'œdomètre.

**8- Appareillage :**

L'appareil spécifique à l'essai (œdomètre) comprend (**Figure.6**) :

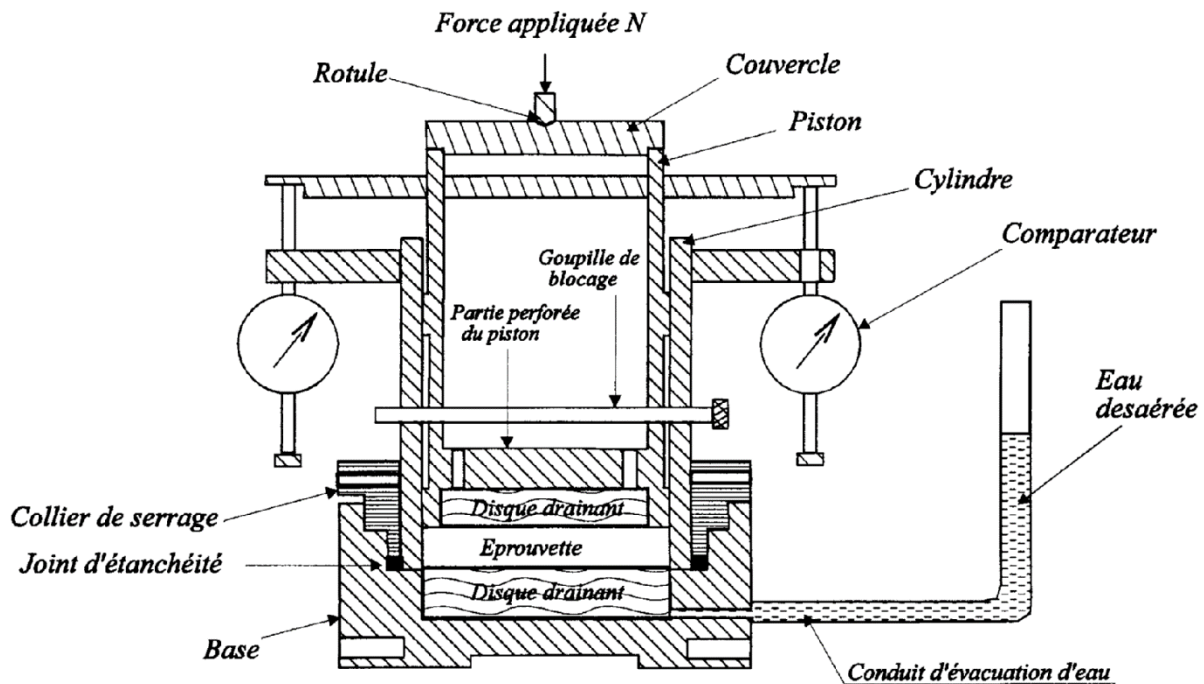
- le bâti permettant d'appliquer les contraintes de chargement sur l'éprouvette.
- La cellule œdométrique.
- le dispositif d'application de la charge.
- le système de mesurage.

La réalisation de l'essai nécessite en outre l'appareillage courant pour l'extraction des échantillons de leur conteneur,



**Figure 6** : œdomètre

la préparation des éprouvettes et la détermination des teneurs en eau et des masses volumiques des échantillons de sol.



**Figure è7 :** Cellule œdométrique type Terzaghi (Exemple).

### 8.1 Bâti :

Le bâti, quasi indéformable sous l'effet des efforts appliqués, supporte la cellule œdométrique et maintient sa base horizontale.

### 8.2 Cellule œdométrique :

La cellule œdométrique, en matériaux inertes chimiquement vis-à-vis de l'éprouvette et des fluides quelle contient, comporte les éléments suivants :

- Une bague œdométrique terminée par une trousse coupante ou une enceinte cylindrique rigide qui reçoit l'éprouvette de matériau. Le diamètre intérieur **D** de la bague doit être supérieur ou égal à **60 mm** et sa hauteur telle que la hauteur initiale de l'éprouvette (**Hi**), exprimée en millimètres, satisfasse à la condition suivante

$$10 \leq H_i \leq 0,4D$$

- Un réservoir servant de bac d'imbibition muni d'un logement recevant la bague œdométrique ;
- Un dispositif permettant de répartir l'effort appliqué sur l'éprouvette de matériau par l'intermédiaire d'un cylindre rigide de diamètre très légèrement inférieur à celui de l'éprouvette afin de coulisser librement. Dans le cas d'utilisation d'un piston, ce dernier doit posséder en son centre, à sa partie supérieure, un logement pour la rotule transmettant l'effort axial

- Deux disques drainants rigides (pierres poreuses,) plans et éventuellement reliés à des orifices pour la circulation des fluides.

**NOTE :** Pour les matériaux raides à très raides, le diamètre de l'éprouvette pourra être réduit, sans être inférieur à **35 mm**, afin d'atteindre des contraintes supérieures à **1,6 MPa**. Le bâti doit être adapté en conséquence.

### **8.3 Dispositif d'application de l'effort :**

Le dispositif d'application d'effort vertical doit être capable d'appliquer une force suivant la direction axiale, avec une incertitude de **2 %** et de la maintenir constante. Le matériel doit être conçu pour transmettre à l'éprouvette une contrainte verticale moyenne pouvant atteindre au moins **1,6 MPa** à charge maximale et une contrainte inférieure à **10 kPa** sous son poids propre.

### **8.4 Système de mesurage :**

#### **8.4.1 Force verticale :**

L'intensité de la force verticale **N** est déterminée avec une incertitude qui est la plus grande des deux valeurs :

- **2 %** de la valeur mesurée de la force.
- **0,2 A**, en newtons, avec **A** l'aire de la section transversale de l'éprouvette, exprimée en centimètres carrés.

#### **8.4.2 Déplacement vertical :**

Le déplacement vertical  $\Delta H$  du dispositif d'application de la charge placé à la partie supérieure de l'éprouvette est mesuré suivant son axe par rapport à un repère fixe (bâti) avec une incertitude inférieure à **10  $\mu\text{m}$** .

#### **8.4.3 Caractéristiques géométriques de la bague ou de l'enceinte recevant l'éprouvette**

Le diamètre intérieur et la hauteur de la bague ou de l'enceinte sont mesurés avec une incertitude de **0,1 mm**. L'aire de la section transversale de la bague ou de l'enceinte est déterminée par calcul.

#### **8.4.4 Horizontalité du bâti support de la cellule œdométrique :**

La mesure doit être adaptée pour montrer que la rotation de la base support de la cellule par rapport à l'horizontale reste inférieure à **2/100** au cours de l'essai.

### **8.5 Matériel complémentaire :**

- Une balance de portées maximale et minimale compatibles avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de **1/1000** de la valeur mesurée.
- Une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable de **50 °C** à **105 °C**, de classe d'exactitude **C** comme défini à l'annexe **A** de la norme **NF X 15-016** pour ce qui concerne uniquement la température.
- Les outils nécessaires au découpage et à la préparation des éprouvettes.
- Un chronomètre donnant la seconde.

- Un dessiccateur.

### **8.6 Local d'essai :**

La température de la salle d'essai est maintenue constante à  $\pm 5$  °C pendant la durée de chaque essai. L'appareillage est protégé des courants d'air et de l'ensoleillement direct.

## **9- Mode opératoire :**

### **9.1 Déformation de la cellule œdométrique sur son bâti de chargement :**

Une mesure de déformation de la cellule est effectuée avec un éprouvette témoin métallique placé entre les deux disques drainants, éventuellement recouverts de papier-filtre, en passant par les mêmes paliers de chargement que pour l'essai, afin de déterminer amplitude des corrections à prendre en compte. Suivant les cas, cette mesure est effectuée avant ou après l'essai lui-même.

Elle reste utilisable pendant un délai maximal de six mois sans modification de matériel.

Cette mesure de déformation de l'appareillage est nécessaire en présence de sols gonflants et lors d'essais sous des contraintes supérieures à **1,6 MPa**.

### **9.2 Préparation de l'éprouvette :**

L'intérieur de la bague, de diamètre **D**, ou de l'enceinte œdométrique recevant l'éprouvette, est légèrement enduit de graisse non dégradable par l'eau.

L'éprouvette est carottée au moyen de la bague œdométrique, ou taillée avec soin aux dimensions de l'enceinte œdométrique dans laquelle elle est introduite. Elle est arasée sur les deux faces parallèles de la bague ou de l'enceinte puis pesée.

Compte tenu de la dimension  $d_{max}$  des particules solides qui constituent l'éprouvette, cette dernière a, une fois confectionnée, une hauteur **H<sub>i</sub>** d'au moins **10 mm** et telle que

$$6 \cdot d_{max} \leq H_i \leq 0,4 D$$

Selon l'objectif pour suivi et l'état de l'éprouvette soumise à l'essai, des procédures différentes sont suivies.

#### **9.3.1 Procédure générale**

Deux cas sont à distinguer selon que les sols gonflent ou non en présence d'eau.

##### **a) Préparation des disques drainants :**

Pour les éprouvettes de sols non gonflants, les disques drainants sont saturés avec de l'eau. Tout surplus d'eau en surface est éliminé juste avant leur mise en place. Les disques sont choisis de telle façon qu'ils ne puissent pas être pollués au cours de l'essai par des éléments fins provenant de l'éprouvette, sinon ils sont protégés par un papier-filtre.

Lorsque le sol des éprouvettes est connu par ailleurs comme étant gonflant, les disques drainants sont utilisés secs.

##### **b) Mise en place de l'éprouvette :**



Selon le mode de préparation, l'éprouvette, ou l'éprouvette et sa bague de découpage, de caractéristiques géométriques connues, est pesée puis introduite dans la cellule œdométrique entre les deux disques drainants. Le dispositif de répartition de l'effort sur l'éprouvette est placé au contact de l'éprouvette et le système de mesurage de la variation de hauteur de l'éprouvette est mis en place.

Alors que l'éprouvette n'est soumise qu'à la contrainte due uniquement au dispositif d'application de la charge  $\sigma_{v(1)}$ , le réservoir de saturation est rempli d'eau à la température ambiante et l'observation de la variation de hauteur de l'éprouvette commence.

Dès lors, la loi de chargement à adopter pour l'essai est fonction du comportement de l'éprouvette en présence d'eau.

#### **9.4.2 Paliers de déchargement**

Les paliers de déchargement sont maintenus au moins **24 h**. Le passage d'un palier au suivant ne se fait que si la déformation relative ( $\Delta H/H_i$ ) est inférieure à  $5.10^{-4}$  pour une durée de **8 h**.

#### **9.5 Mesurage du déplacement vertical en fonction du temps :**

Les relevés de mesure de déplacement vertical sont faits en respectant le mieux possible les intervalles de temps suivants entre l'instant de l'application de la charge et la mesure

**0 - 15s - 30s - 1 min - 2 min - 4 min - 8 min - 15 min - 30 min - 60 min - 2 h - 4 h - 8 h - 24 h ... (si besoin)**

La date et l'heure de la première mesure de chaque palier sont notées.

Lors de tous les paliers de chargement-déchargement, le déplacement vertical est en plus noté immédiatement avant l'application ou l'enlèvement de la charge du palier suivant.

#### **9.6 Identification de l'éprouvette de sol :**

Peser l'éprouvette de sol immédiatement après enlèvement du dispositif de chargement et de mesurage et démontage de la cellule œdométrique.

La teneur en eau de l'éprouvette de sol avant et après essai est déterminée suivant la norme **NE P 94-050**.

À défaut de valeur mesurée pour la masse volumique des particules solides du sol soumis à l'essai, adopter une valeur estimée.

### **10- Expression des résultats :**

#### **10.1 Graphiques :**

Tracer :

- La courbe œdométrique [ $e, 1g(\sigma_v)$ ] donnant les variations de l'indice des vides du sol en fonction de la contrainte effective verticale appliquée à l'éprouvette.
- Éventuellement les courbes de consolidation donnant la variation de hauteur de l'éprouvette  $\Delta H_c$  en fonction du temps, tracées avec des échelles adaptées à la méthode utilisée pour la détermination du coefficient de consolidation  $C_v$  au moins pour chacun des paliers de

chargement correspondant à des contraintes appliquées  $\sigma_v$ , supérieures à la contrainte de pré consolidation.

**10.2 Détermination des paramètres de compressibilité**

Déterminer :

- L'indice des vides du sol en place  $e_0$ .
- L'indice de compression **Cc**. Où :  $C_c = \Delta e / \Delta(\log \sigma'_v)$
- La contrainte de pré consolidation  $\sigma_p'$ .
- Les coefficients de consolidation  $C_v$ , en indiquant la méthode de calcul choisie.

**Méthode de Taylor :**

➤ **Construction graphique :**

Tracer, pour un palier de chargement donné, la courbe de variation de hauteur de l'éprouvette  $s$  (figure 1) en fonction de la racine carrée du temps écoulé exprimé en minutes et compté à partir du début du palier.

Tracer la droite **D1** correspondant à la partie linéaire du début de cette courbe. Cette droite recoupe l'axe des ordonnées en un point  $s$  (zéro corrigé).

À partir de ce point, tracer une droite D2 de pente 1,15 fois celle de la droite D1. La droite D2 recoupe la courbe de consolidation en un point correspondant conventionnellement à 90 % de la consolidation primaire (**s90**).

Vérifier que la fin de la partie linéaire de la courbe de tassement est proche de 60 % de la consolidation primaire (**s60**)

➤ **Calcul du coefficient de consolidation  $C_v$  :**

Le coefficient de consolidation d'une éprouvette saturée est déterminé pour un degré de consolidation de **50%** à partir de :

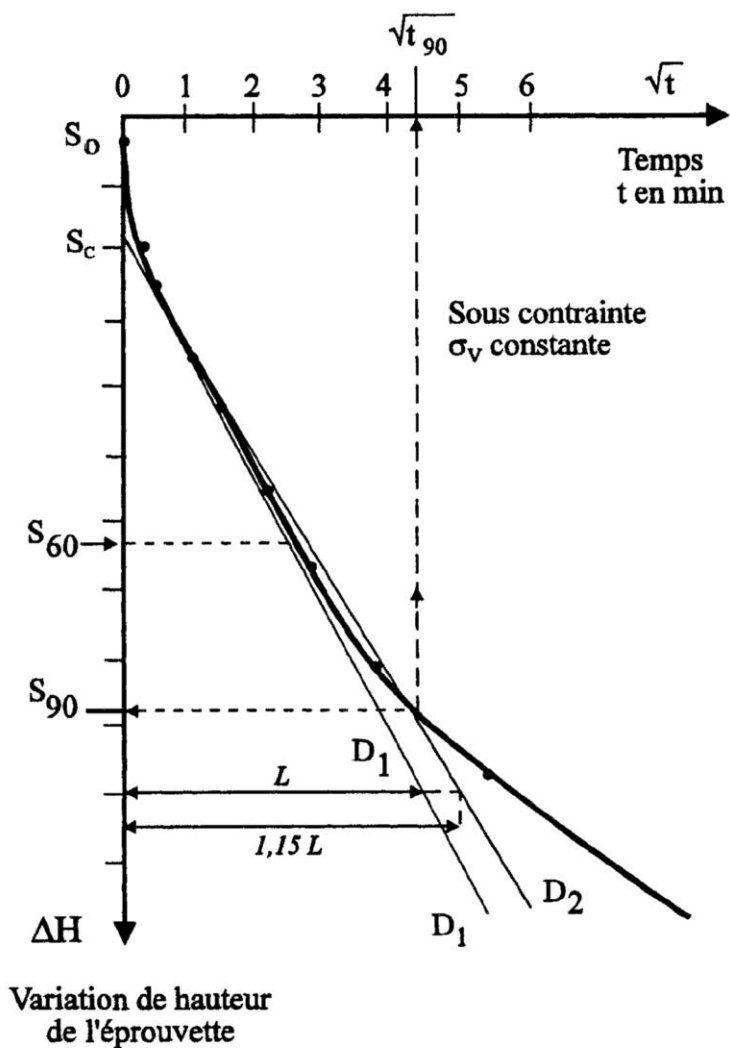
$$C_v = T_v \cdot h^2 / t$$

Où :

Pour un degré de consolidation de **90 %** ( $t = t_{90}$ ),  $T_v = 0,848$ .

$h$  : est la distance de drainage égale à la demi-épaisseur de l'éprouvette au moment où  $t = t_{90}$ , sous la contrainte  $c$  considérée, lorsque le drainage se produit par les deux faces.





**Figure 8** : Exemple d'une courbe de variation de hauteur de l'éprouvette en fonction de la racine carrée du temps — **Méthode de Taylor** —

Poids des disques [N]	La force N [N]	$\sigma = N/S$ [KPa]	$\Delta H$					
			$t = 0$	$t = 15 s$	$t = 30 s$	$t = 45 s$	$t = 60 s$	$t = 120 s$
20								
40								
80								
40								
20								
0								

**11- Compte rendu :**

Il vous est demandé de :

1. Réaliser les essais.
2. Dresser le tableau des résultats. Compléter le tableau des calculs en vous aidant du document réponse N°1.
3. Tracer la courbe de consolidation ( $\Delta H=f(\sqrt{t})$ ), donnant la variation de hauteur de l'éprouvette en fonction de temps, tracées avec des échelles adaptées à la méthode utilisée : Méthode de Taylor ( $\Delta H=f(\sqrt{t})$ ), en vous aidant du document réponse N°2.
4. Déterminer le coefficient de consolidation  $C_V$  .
5. Commenter vos résultats

**Document réponse N°1****I - Calcul du coefficient de consolidation  $C_v$ :**

Compléter le tableau des calculs suivant :

**Essai de consolidation de sol**

t (min)	$\Delta H \times (10^{-2})$ (mm)	$\sqrt{t}$
0	144.5	
0.25	163	
0.5	168.5	
1.0	175.5	
2.0	185	
4.0	198	
8.0	215.2	
15	234	
30	252.2	
60	271	
120	285	
240	297	
480	305	
1440	317	

**Document réponse N°2****II - Tracé de la courbe de consolidation :**

Porter les différentes valeurs des hauteurs de l'éprouvette et le temps correspondant du tableau du document réponse N°1 en le quadrillage semi-logarithmique du document réponse N°2 ci-dessous. Méthode de Taylor ( $\Delta H = f(\sqrt{t})$ )

- en abscisse : les temps  $\sqrt{t}$ , échelle logarithmique
- En ordonnée : la variation de hauteur de l'éprouvette sur une échelle arithmétique.
- La courbe doit être tracée de manière continue.

Tracer la courbe de consolidation ( $\Delta H = f(\sqrt{t})$ ), et déterminer le coefficient de consolidation  $C_v$

$$C_v = T_v \cdot h^2 / t$$

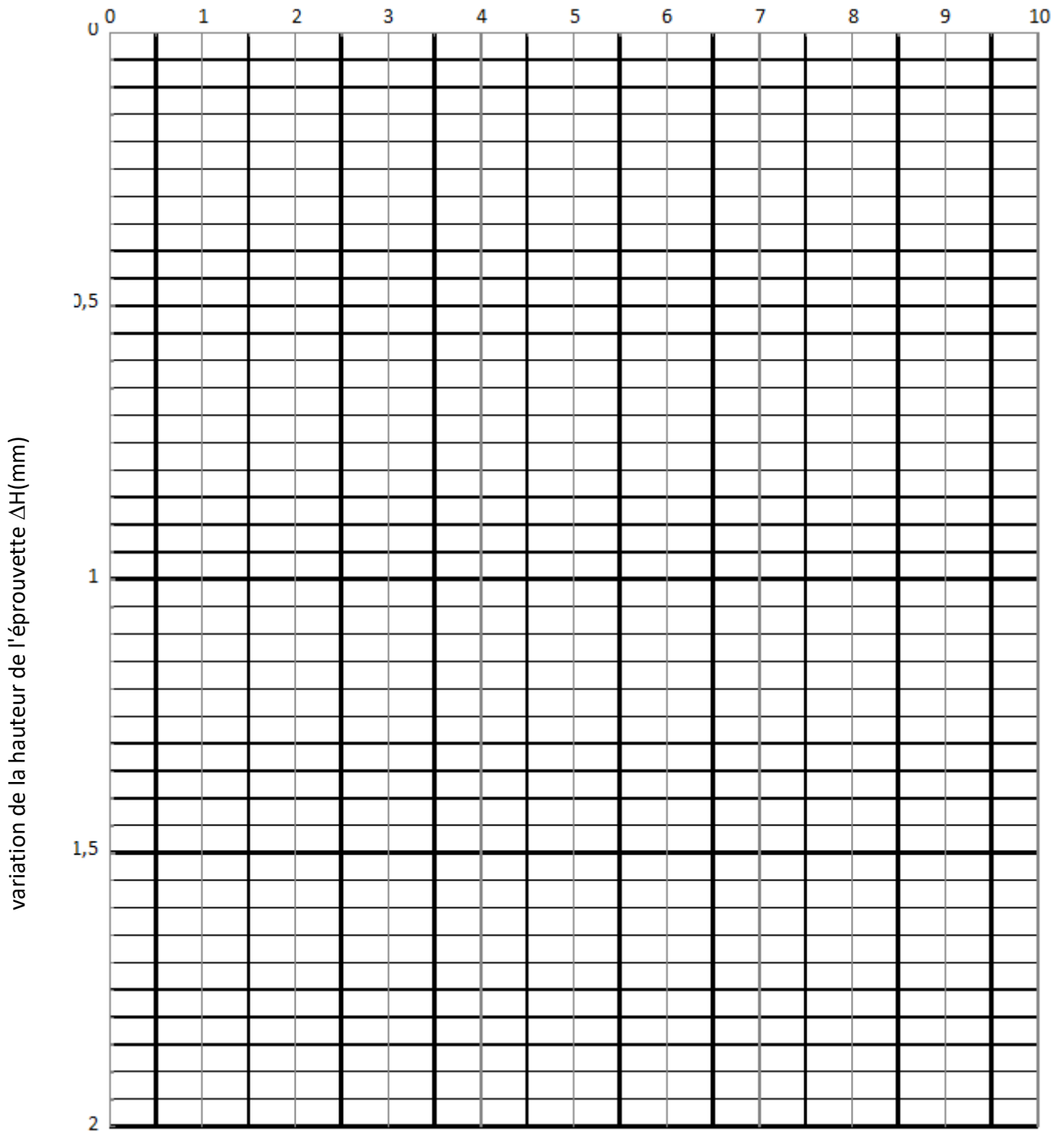
Où :

Pour un degré de consolidation de 90 % ( $t = t_{90}$ ),  $T_v = 0,848$ .

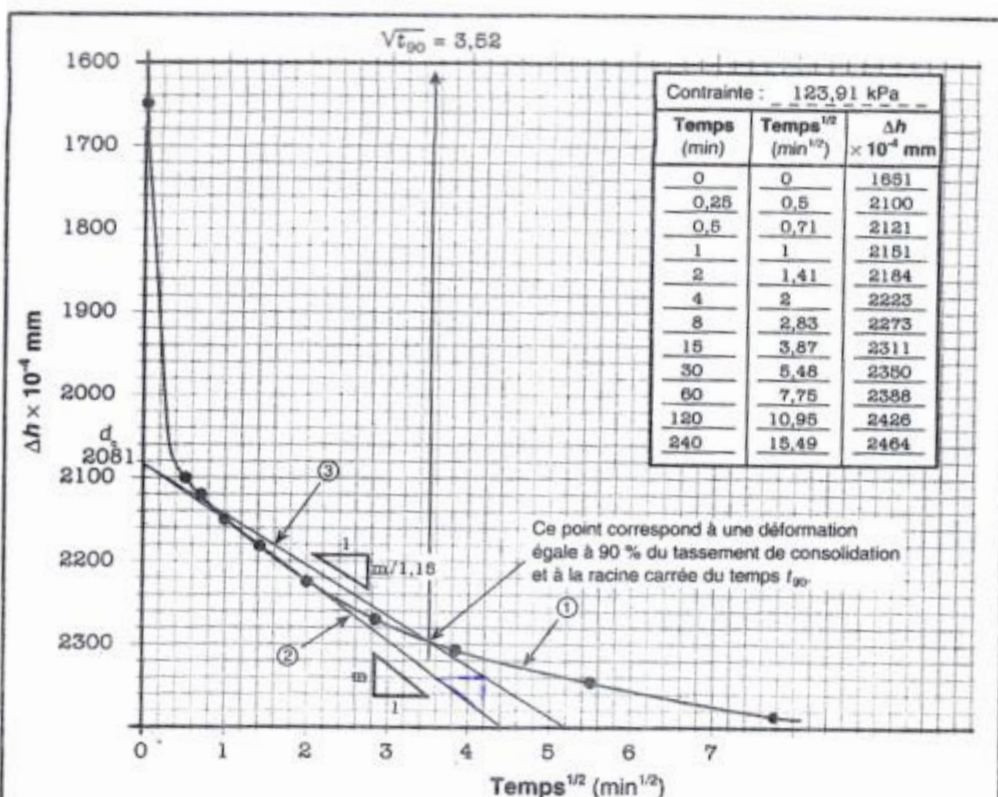
h : est la distance de drainage égale à la demi-épaisseur de l'éprouvette :  $h = 2.7/2$  cm

**Document réponse N°2**

$\sqrt{t}$  (t en min)



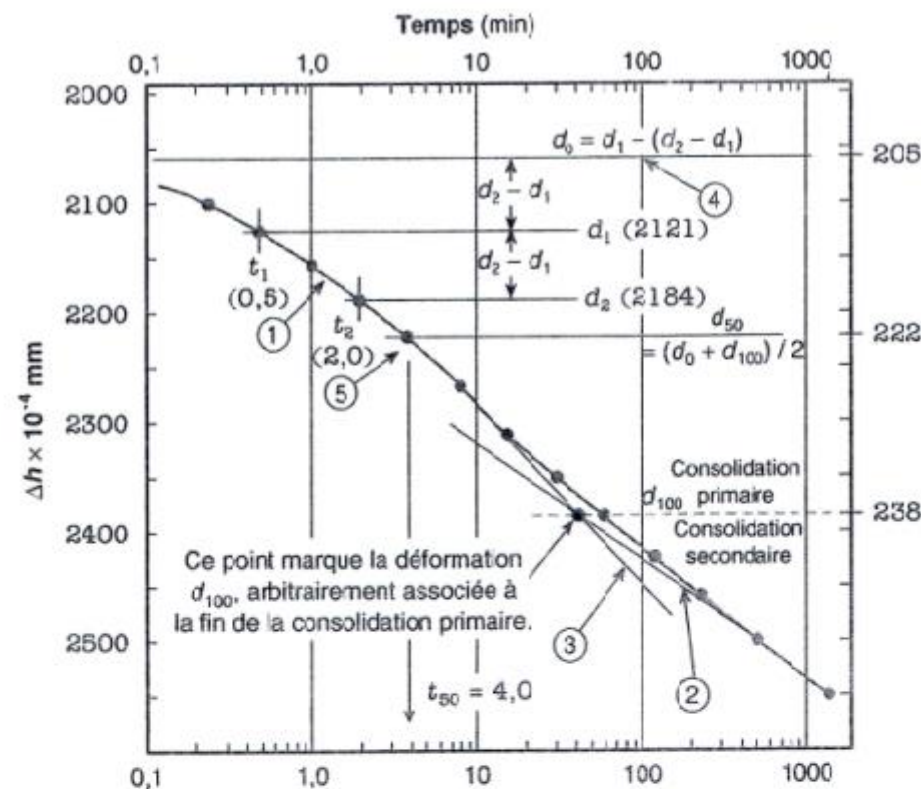
Courbe de consolidation ( $\Delta H=f(\sqrt{t})$ ) Méthode de Taylor



- On choisit les échelles, qui doivent convenir au tracé de la courbe. (Pour éviter que la pente du segment linéaire ne soit trop raide, il est parfois utile de laisser tomber quelques lectures parmi les dernières de l'essai, là où le tassement ne progresse plus que très lentement.) On trace la courbe en plaçant les déformations en ordonnée et la racine carrée du temps en abscisse.
- On prolonge le segment linéaire de la courbe sur l'axe des déformations, l'ordonnée à l'origine correspondant alors à la **déformation cumulative corrigée** ( $d_0$ ) au temps  $t = 0$  minute. On constate que cette déformation corrigée est sensiblement différente de la lecture initiale de déformation, juste avant l'accroissement de charge à  $t = 0$  minute. Cet écart peut être dû, entre autres, à la compression élastique du sol et des composantes de l'appareillage, à l'expansion latérale de l'échantillon s'il a été taillé à un diamètre un peu inférieur à celui de l'anneau ou à l'expulsion très rapide de l'air dans un sol partiellement saturé. (Dans ce cas-ci, l'écart entre la déformation correspondant à  $t = 0$  et la déformation cumulative corrigée n'est que de 0,04 mm, même s'il paraît plus grand sur le graphique.)

- En partant de l'ordonnée à l'origine ( $d_0$ ), on trace une droite dont la pente s'écarte de 15 % de celle du segment linéaire de la courbe. La racine carrée de  $t_{90}$  étant 3,52, le temps, pour atteindre 90 % du tassement de consolidation lorsque la contrainte est de 123,91 kPa, est égal à :

$$t_{90} = (\sqrt{t_{90}})^2 = 3,52^2 = 12,39 \text{ minutes}$$



- On trace la courbe en plaçant les lectures des déformations en ordonnée et le log du temps en abscisse.
- On prolonge, vers l'intérieur et le haut du graphique, la partie inférieure de la courbe.
- On prolonge vers le bas le segment linéaire médian de la courbe, situé entre les segments de concavité inverse.
- On détermine la déformation  $d_0$ , associée à la déformation initiale corrigée au début du palier de chargement. Pour ce faire, on sélectionne deux points de la courbe,  $(t_1, d_1)$  et  $(t_2, d_2)$ . (La valeur de  $t_2$  est quatre fois celle de  $t_1$ , et la valeur de  $d_2$  devrait se situer en quart et la demie du tassement total produit lors du palier de chargement.) La déformation  $d_0$  correspond à la valeur  $d_1$  moins l'écart entre les déformations  $d_1$  et  $d_2$  :

$$d_0 = d_1 - (d_2 - d_1)$$

- On calcule la déformation  $d_{50}$  correspondant à 50 % du tassement de consolidation primaire en faisant la moyenne entre les valeurs de  $d_0$  et  $d_{100}$ . Sur la courbe, la déformation  $d_{50}$  associée à la coordonnée de temps  $t_{50}$ . Le temps correspondant à 50 % du tassement de consolidation lorsque la pression d'essai est de 123,91 kPa est donc de 4,0 minutes.

Figure 11.8 Méthode du logarithme du temps.





*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique*  
*Faculté des Sciences et de la Technologie et Sciences de la Matière*  
*Département des Génie Civil*



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

**1- Problématique :** Identifier un sol afin de le classer selon les normes.

**2- Documents à consulter :**

- ✓ EN NF LML % 94-071-1 : Sol : Reconnaissances et essais. Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande (Détermination des caractéristiques de rupture d'un sol pulvérulent) soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante. Norme Française, 1998.
- ✓ Classification des sols L.C.P.C.

**3- Introduction :**

L'élaboration et l'exécution des projets -tel que les structures (bâtiment) ou l'infrastructure (tracer routier) - en site neuf nécessitent une bonne connaissance des terrains traversés. Pour cela, la connaissance géotechnique constitue une source d'information indispensable.

- L'étude de sa capacité portante.
- L'étude des différents types de fondations que l'on peut préconiser...

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (études de fondation, ouvrages de soulèvement, remblais, talus ...), il est nécessaire de connaître la « résistance » du sol. Mais cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent.

Sous l'effet des surcharges provenant de l'ouvrage et transmises par les fondations au sol, une augmentation des contraintes se manifeste en tout point du sol. Cette augmentation des contraintes s'ajoute aux contraintes dues au poids des terres, et le sol subit ainsi un nouvel état de contraintes auquel il doit résister. C'est-à-dire, en tout point du sol, la contrainte résultante ne doit pas dépasser la contrainte maximale que le sol peut supporter.

Ces caractéristiques se traduisent en général par deux paramètres très importants qui sont :

- L'angle de frottement interne des grains "  $\varphi$  ".
- La cohésion du sol "C".

Afin de déterminer ces deux paramètres, nous avons recours à un **essai en laboratoire** très sollicités par les ingénieurs qui est "**L'essai de cisaillement rectiligne**" ou "**L'essai de cisaillement à la boîte**" proposé par Mr. Alexandre COLLIN (1846) et mise au point par le Pr. CASAGRANDE.

Les essais de cisaillement rectiligne réalisés à la boîte, dans des conditions consolidées drainées (CD) sur tous les types de sols naturels, reconstitués ou artificiels dont la dimension maximale des grains varie entre 5 et 8 mm. Elle permet la détermination des paramètres de résistance au cisaillement effectifs des sols. La méthode d'essai consiste à placer l'éprouvette dans l'appareil de cisaillement direct, puis à la soumettre à une phase de consolidation sous une contrainte normale. Les boîtes horizontales qui contiennent l'éprouvette sont ensuite désolidarisées et un déplacement à vitesse de déformation constante est imposé à l'une des deux demi-boîtes. Le déplacement horizontal et l'effort de cisaillement engendrés sont mesurés pendant le cisaillement de l'éprouvette.

#### **4- But de l'essai :**

L'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande a pour but :

- La détermination des caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante.
- De mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol saturé soumis à un cisaillement direct selon un plan imposé, à une vitesse constante. En vitesse lente et conditions drainées peuvent être déduites les valeurs de l'angle de frottement effectif et la cohésion effective, paramètres utilisés pour le dimensionnement de fondations, les calculs de vérification des coefficients de sécurité à la rupture de talus et pour la détermination des actions de poussée et de butée sur les ouvrages de soutènement.
- Savoir-faire d'utiliser le matériel d'un laboratoire.
- Déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante.
- Tracer la courbe intrinsèque du sol étudié,
- Déterminer les caractéristiques qui se traduisent en général par deux paramètres très importants qui sont :
  - **L'angle de frottement interne des grains "  $\varphi$  "**
  - **La cohésion du sol "C"**

#### **5- Intérêt en Génie Civil**

Pour assurer la stabilité d'une construction, il est nécessaire et après avoir déterminé les contraintes qui peuvent exister dans les matériaux et vérifié qu'elles sont inférieures aux valeurs admissibles, de contrôler que les déformations qui en résultent n'entraînent aucun désordre pour la construction en étudiant le phénomène de cisaillement.

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (études de fondation, ouvrages de soulèvement, remblais, talus ...), il est nécessaire de connaître la « résistance » du sol. Mais cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent.

L'élaboration et l'exécution des projets -tel que les structures (bâtiment) ou l'infrastructure (tracer routier) - en site neuf nécessitent une bonne connaissance des terrains traversés. Pour cela, la connaissance géotechnique constitue une source d'information indispensable.

- L'étude de sa capacité portante.
- L'étude des différents types de fondations que l'on peut préconiser.

Ces caractéristiques se traduisent en général par deux paramètres très important qui sont:

- L'angle de frottement interne des grains "  $\varphi$  ".
- La cohésion du sol "C".

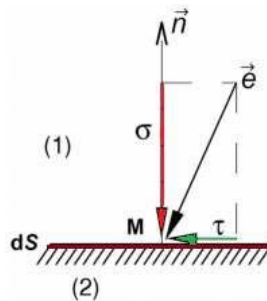
#### **6- Définitions :**

- \* **Contrainte normale et contrainte de cisaillement** : En un point M d'un milieu continu (Soit ici notre échantillon de sol) on considère une facette d'aire infiniment petite et de normale  $\vec{n}$  qui sépare le milieu en deux parties notées (1) et (2).

On admet que l'action de la partie (1) sur (2) se traduit au point, sur la facette ds, par une contrainte notée  $\vec{e}$ . Le vecteur contraint  $\vec{e}$  se décompose, par rapport au repère lié à la facette ds, en une composante normale  $\sigma$  (suivant  $\vec{n}$ ) et une composante tangentielle  $\tau$  (comprise dans le plan de la

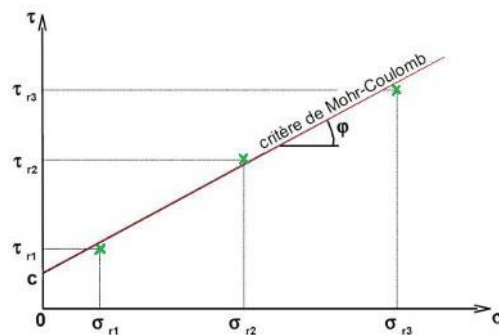
facette) ou contrainte de cisaillement.

Il y a rupture d'un sol par cisaillement lorsque la contrainte de cisaillement devient trop importante. La contrainte de cisaillement maximum que peut supporter un sol (correspondant donc à la rupture) n'est pas unique mais dépend de l'intensité de la contrainte normale.



**Figure 1** : Représentation de  $\sigma$  et  $\tau$  pour une facette.

- \* **Critère de Mohr-Coulomb** : Le plan de Mohr est une représentation plane de l'état de contrainte dans des axes liés à la facette. L'axe des abscisses ( $\sigma$ ) est confondu avec la normale à la facette, l'axe des ordonnées est ( $\tau$ ). Chacun des états de rupture dans un sol peut être caractérisé par un couple  $\sigma_r$  et  $\tau_r$  représenté par un point sur le plan de Mohr.



**Figure 2** : Etats de rupture et critère de Mohr-Coulomb.

Cette courbe est correctement approximée par une droite appelée critère de rupture de Mohr Coulomb et définie par l'équation :

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

$\varphi$  : est appelé l'angle de frottement, il représente la pente de la droite et s'exprime en degré.

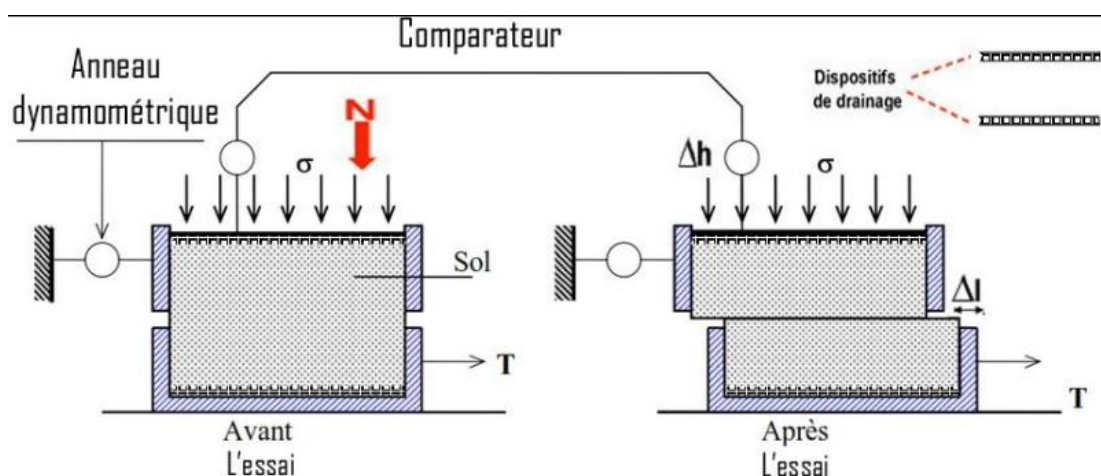
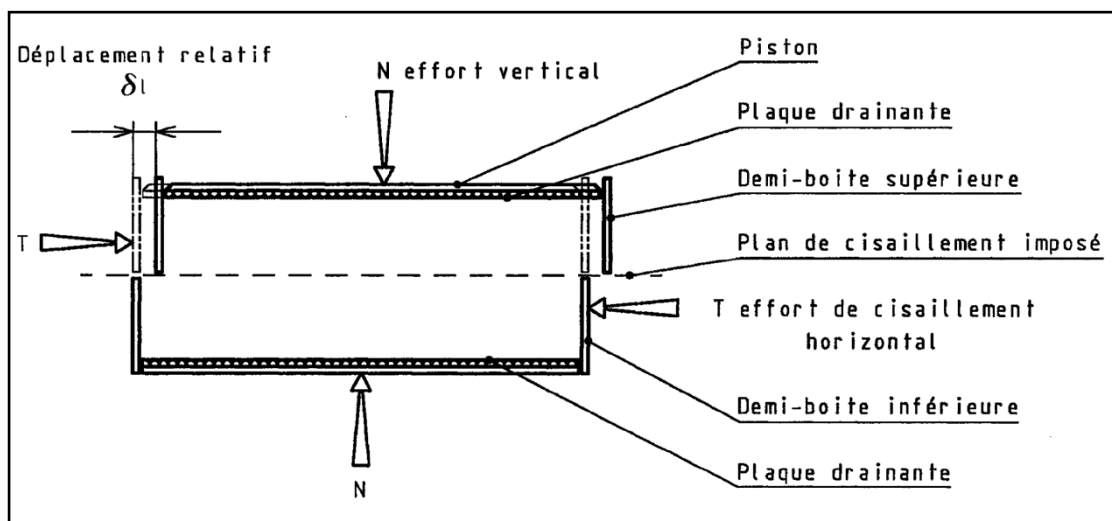
$c$  : est appelée la cohésion. La cohésion traduit l'effet de colle que l'on observe dans des argiles ou des sables partiellement saturés, elle est nulle pour un sable sec.



**7- Principe :**

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette, Il consiste à

- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (**N**) maintenu constant pendant toute la durée de l'essai, c-à-d : consolider l'éprouvette de section  $s$  dans une première phase en appliquant sur la face supérieure un effort vertical constant maintenu pendant tout l'essai (Contrainte  $\sigma = N/Ac$ ).
- Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (**N**) un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi boîtes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif  $l$  à vitesse constante, c-à-d : cisailier ensuite le long du plan de séparation des 2 demi-boîtes en leur imposant un déplacement relatif  $\Delta l$  à vitesse constante.
- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (**T**) correspondant. C-à-d : l'effort de cisaillement horizontal ( $T$ ) est mesuré et la contrainte  $\tau = T/Ac$  est calculée. Où  $Ac$  est la section corrigée de l'éprouvette (cette section variant en fonction du déplacement relatif  $\Delta l$ ).

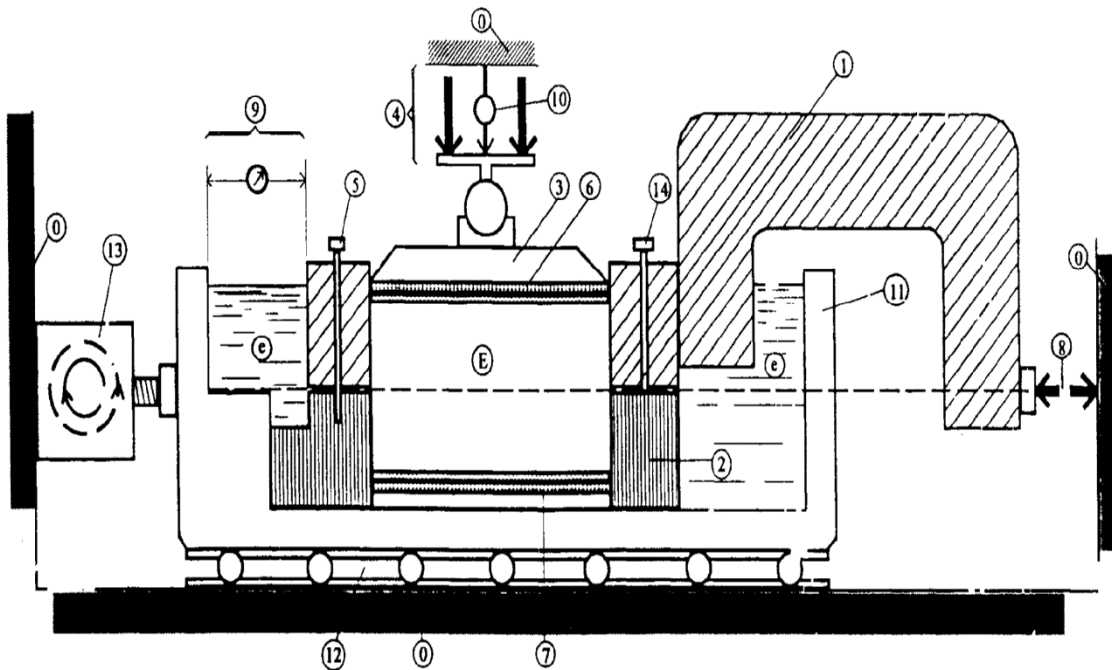


**Figure 3 :** Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boîte.

## 8- Appareillage :

L'appareillage spécifique à l'essai comprend (voir figure 4) :

- Le bâti.
- La boîte de cisaillement.
- Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette.
- Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi boîtes.
- Le système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps.



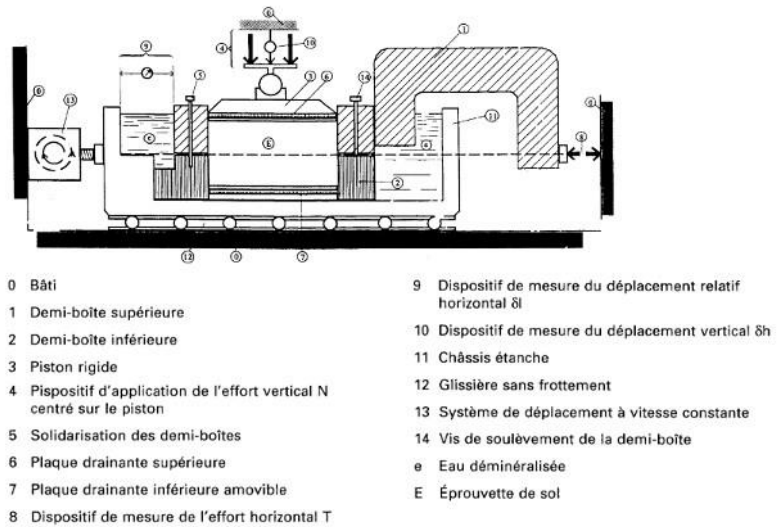
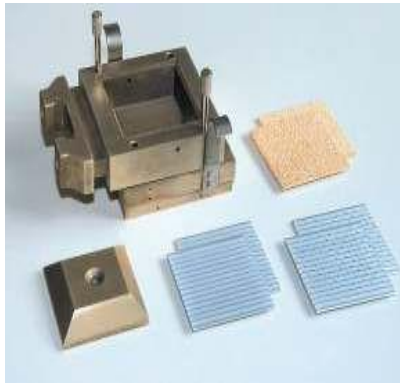
**Figure 4** : Schéma de la boîte de cisaillement (Exemple avec la demi-boîte inférieure mobile)

0. Bâti.
1. Demi-boîte supérieure.
2. Demi-boîte inférieure.
3. Piston rigide.
4. Dispositif d'application de l'effort vertical  $N$  centré sur le piston.
5. Solidarisation des demi-boîtes.
6. Plaque drainante supérieure.
7. Plaque drainante inférieure amovible.
8. Dispositif de mesure de l'effort horizontal  $T$ .
9. Dispositif de mesure du déplacement relatif horizontal  $|\delta|$ .
10. Dispositif de mesure du déplacement vertical  $\delta h$
11. Châssis étanche.
12. Glissière sans frottement.
13. Système de déplacement à vitesse constante.

14. Vis de soulèvement de la demi-boîte.

e : Eau déminéralisée.

E : Éprouvette de sol.



**Figure 5 :** schéma de la boîte de cisaillement.

**8.1. Le bâti :**

Le bâti indéformable sous l'effet des efforts appliqués supporte la boîte de cisaillement et son châssis et les maintient horizontalement avec une tolérance  $\pm 1^\circ$ .

**8.2. La boîte de cisaillement :**

Une boîte de cisaillement comporte les éléments suivants :

- Deux demi boîtes (l'une inférieure, l'autre supérieure), cylindriques intérieurement, de même section droite, carrée ou circulaire ( $L = 60 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  ou  $100 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ ).
- La demi-boîte supérieure est équipée de vis permettant un léger soulèvement ;
- Un blocage ou une solidarisation des deux demi boîtes de telle façon qu'elles aient le même axe de symétrie intérieur ;
- Un châssis étanche support de la demi-boîte inférieure.
- Une plaque drainante à la base de la demi-boîte inférieure.
- Un piston rigide muni à sa base d'une plaque drainante, l'ensemble glissant librement dans la demi-boîte supérieure. Ce piston possède en son centre, à sa partie supérieure, un logement pour la rotule transmettant l'effort vertical.

Les plaques drainantes (pierres poreuses...) sont planes et reliées à des orifices pour la circulation des fluides.

Les matériaux utilisés sont inertes chimiquement vis-à-vis du sol et des fluides qu'il contient.

La surface de contact entre les deux demi boîtes est plane et lisse.

### **8.3. Dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette :**

Le dispositif permet d'appliquer une force suivant une direction verticale, avec une tolérance de  $\pm 2^\circ$ , et de la maintenir constante.

Le matériel est conçu pour transmettre à l'éprouvette une contrainte verticale moyenne d'au moins **0,5 MPa**.

### **8.4. Dispositif de production du déplacement :**

Le déplacement possible des deux demi-boîtes, l'une par rapport à l'autre, est d'au moins **5 mm** à une vitesse compatible avec la vitesse maximale. Cette vitesse est maintenue constante pendant l'essai avec une incertitude qui est la plus grande des deux valeurs suivantes :

- **10%** de la valeur lue, ou
- **0,5  $\mu\text{m}/\text{min}$** .

### **8.5. Système de mesure :**

#### **8.5.1. Force verticale :**

L'intensité de la force verticale constante (**N**) est connue avec une incertitude de **1/100** de sa valeur.

#### **8.5.2. Effort de cisaillement :**

La mesure de l'effort horizontal (**T**) s'effectue au moyen d'un capteur avec une incertitude de **1/100** de la valeur maximale lue au cours de l'essai.

#### **8.5.3. Déplacements :**

- a) Le déplacement vertical  **$\delta h$** , dans l'axe du piston placé à la partie supérieure de l'éprouvette, est mesuré par rapport à un repère fixe avec une incertitude de **0,05 mm**.
- b) Le déplacement horizontal  **$|\delta|$**  des deux demi boîtes l'une par rapport à l'autre est mesurée au moyen d'un capteur avec une incertitude de **0,05 mm**.

### **8.6. Matériel complémentaire :**

Il comprend :

- Une balance de portées maximale et minimale compatible avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de **1/1000** de la valeur mesurée.
- une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à **50 °C** et à **105°C**.
- Les outils nécessaires au découpage et à la préparation des éprouvettes.
- Un chronomètre donnant la seconde.

### **8.7. Local d'essai :**

Un thermomètre de contrôle est placé dans la salle d'essai. La température de la salle d'essai est maintenue à  $\pm 5$  °C pendant la durée de chaque essai. L'appareillage est en plus protégé du rayonnement solaire direct.

## **9- Mode opératoire :**

### **9.1. Préparation des plaques drainantes :**

Les plaques sont saturées avec de l'eau désaérée et tout surplus d'eau en surface est éliminé juste avant leur mise en place. Elles sont recouvertes d'un papier-filtre lorsque des particules de sol risquent de migrer vers les pores des plaques drainantes.

### **9.2. Préparation des éprouvettes :**

La hauteur des éprouvettes, une fois confectionnées, est telle que :

$$6 \cdot d_{max} \leq h \leq \frac{L}{2}$$

Dans ces conditions, le matériau essayé a des éléments dont la dimension maximale est:

- $d_{max} \leq 5 \text{ mm}$  Dans le cas de la boîte de **60 mm** de côté, et
- $d_{max} \leq 8 \text{ mm}$  Dans le cas de la boîte de **100 mm** de côté.

#### **9.2.1. Sols cohérents ou reconstitués après compactage :**

- Tailler les éprouvettes de telle sorte que les dimensions de la section droite de l'éprouvette soient ajustées au mieux à celles de la boîte et que la hauteur (**h**) en millimètres soit telle que :

$$20 \leq h \leq \frac{L}{2}$$

- Peser l'échantillon et mesurer sa hauteur.
- Placer une plaque drainante dans le fond de la demi-boîte inférieure.
- Introduire l'éprouvette dans les deux demi boîtes solidarisiées au préalable.
- L'éprouvette est calée dans la boîte de telle sorte que le plan de glissement la partage en deux parties sensiblement égales.

#### **9.2.2. Sols pulvérulents :**

Après solidarisation des deux demi boîtes et après avoir mis en place une plaque drainante dans le fond de la demi-boîte inférieure, le matériau est compacté directement dans la boîte qui servira au cisaillement.

La masse de sol à introduire dans la boîte est déterminée pour obtenir, après compactage, une éprouvette de masse volumique choisie et pour que le plan de cisaillement se trouve sensiblement à mi-hauteur de l'éprouvette.

**9.3. Réalisation de l'essai :**

L'essai comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes de mêmes dimensions, préparées dans les mêmes conditions, cisillées à la même vitesse mais soumises à des efforts verticaux différents.

**9.3.1. Choix de l'effort vertical à appliquer :**

L'effort vertical (N) est déterminé pour chaque éprouvette en fonction des contraintes normales a fixées par le géotechnicien responsable.

La contrainte verticale maximale appliquée à la série d'éprouvettes doit être supérieure à la contrainte effective verticale induite dans le sol après la réalisation de l'ouvrage.

Si aucune spécification n'est fournie, choisir les valeurs à partir des indications données dans **le tableau 1 et en respectant la condition précédente.**

$\sigma'_{v0}$	< 100 [KPa]	$\geq 100$ [KPa]
$\frac{N}{A}$	50	$0.5 \sigma'_{v0}$
	100	$\sigma'_{v0}$
	200	$2 \sigma'_{v0}$

**Tableau 1 : Effort vertical à appliquer aux éprouvettes de sol (Exemple).**

**9.3.2. Essais sur sols cohérents :**

Dès que l'éprouvette a été mise en place, les opérations suivantes se déroulent sans interruption.

**9.3.2.1. Mise en place :**

La boîte de cisaillement contenant l'éprouvette est placée dans le châssis étanche fixé sur le bâti. Tout en maintenant la solidarisation des deux demi-boîtes

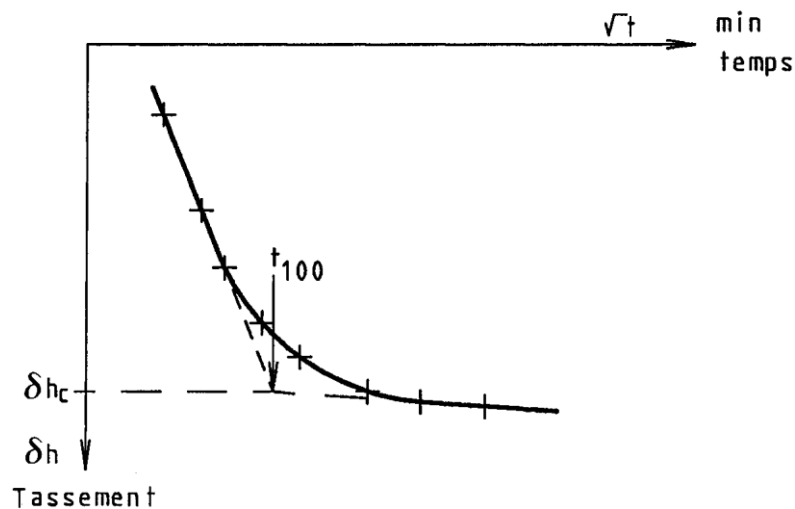
- Placer le piston muni de sa plaque drainante sur le sommet de l'éprouvette.
- Noter, après fixation du système de mesure de l'effort de cisaillement horizontal (**T**), et avant application de tout effort, la valeur d'origine du capteur de l'effort (**T**)
- Régler la position du capteur de mesure du déplacement relatif horizontal entre les deux demi boîtes et noter la valeur d'origine.
- Positionner le capteur de mesure du déplacement vertical du piston par rapport à un repère fixe et noter la valeur d'origine.
- Appliquer l'effort (**N**) sur la partie supérieure du piston.
  
- Mesurer le déplacement vertical du piston h en fonction du temps.

**9.3.2.2. Saturation et consolidation :**

Remplir le châssis contenant la boîte de cisaillement d'eau déminéralisée.

Mesurer le déplacement vertical  $\delta h$  du piston en fonction du temps pendant **1h** au moins et jusqu'à stabilisation.

La stabilisation est considérée comme obtenue dès que les mesures permettent de déterminer une direction asymptotique comme indiqué à **la figure 6**. Cette figure montre également la mode de détermination du déplacement vertical  $\delta h_c$  en fin de consolidation.



**Figure 6 :** Détermination de la fin de consolidation d'une éprouvette dans la boîte de cisaillement

### 9.3.2.3. Cisaillement :

a) Déterminer, à l'issue de la phase de consolidation, la vitesse maximale de cisaillement par la relation suivante exprimée en micromètres par minute :

$$V_{max} = \frac{125}{t_{100}} \quad \text{avec} \quad V_{max} \leq 25$$

Où :

$t_{100}$  : est le temps exprimé en minutes, déterminé par la construction indiquée à **la figure 3**.

- a) Libérer le système de solidarisation des deux demi-boîtes.
  - b) Agir sur les vis de la boîte supérieure afin de supprimer le contact entre les deux demi boîtes et ramener immédiatement les vis à leur position antérieure.
  - c) Imposer le déplacement relatif des deux demi boîtes à une vitesse constante  $V \leq V_{max}$ .
  - d) Arrêter le cisaillement.
- soit lorsque la variation de l'effort (**T**), pour un intervalle de mesure correspondant à un déplacement horizontal  $|\delta|$  de **0,5 mm**, est inférieure à **1/100** de l'effort maximal.
  - soit lorsque le déplacement horizontal  $|\delta|$  a atteint au moins **5 mm**.

### 9.3.2.4. Identification de l'éprouvette après essai :

- ✓ Peser l'éprouvette et noter les particularités (inclusion,...) du plan de rupture.



- ✓ Déterminer sa teneur en eau comme indiqué dans la norme NF P 94-050.

### **9.3.3. Essais sur sols pulvérulents :**

La masse volumique des éprouvettes soumises à essai et la vitesse de cisaillement sont fixées par le géotechnicien responsable de l'étude. En l'absence d'indication, la vitesse de cisaillement est au plus de **1 mm/min**.

La phase d'immersion et de consolidation sous la contrainte normale d'essai est effectuée dans les mêmes conditions qu'au **paragraphe 6.3.2.2** : sa durée est d'au moins **1h**.

Le cisaillement est réalisé et arrêté dans les mêmes conditions qu'au **paragraphe 6.3.2.3 e)**.

### **9.4. Mesurage :**

Les lectures de tous les appareils sont effectuées simultanément (**en moins de 2s**) à chaque augmentation du déplacement horizontal relatif des deux demi boîtes d'environ **0,2 mm** jusqu'à **2mm**, puis tous les **0,5 mm** au-delà.

## **10- Expression des résultats :**

### **10.1. Pour chaque éprouvette**

#### **10.1.1. Calculer :**

- a) La contrainte normale effective à partir de l'expression :

$$\sigma' = \frac{N}{A}$$

L'effort normal est éventuellement corrigé du poids du piston si sa valeur est supérieure à  $\frac{N}{100}$

Dans les conditions de l'essai, la contrainte normale  $\sigma$  est la contrainte effective en fin de consolidation.

- b) La contrainte de cisaillement  $\tau$ , par la relation :

$$\tau = \frac{T}{A}$$

Les corrections dues à la variation de l'aire de la section cisailée et au frottement du sol sur le métal de la boîte ne sont pas prises en compte dans la présentation des résultats.

- c) La teneur en eau du sol avant essai et en fin de cisaillement.  
d) La masse volumique sèche  $\rho_d$  de l'éprouvette avant essai, après stabilisation de l'évolution de son épaisseur  $\delta h_c$  sous l'effort appliqué N.

Le volume de l'éprouvette à une étape donnée est :  $V = A \cdot (h - \delta h)$

- e) L'indice des vides et le degré de saturation avant essai à partir de la masse volumique  $\rho_s$ .



Le calcul implique la connaissance de la masse volumique des particules solides  $\rho_s$ . Si celle-ci n'a pas été mesurée, sa valeur est estimée et indiquée sur le P.V.

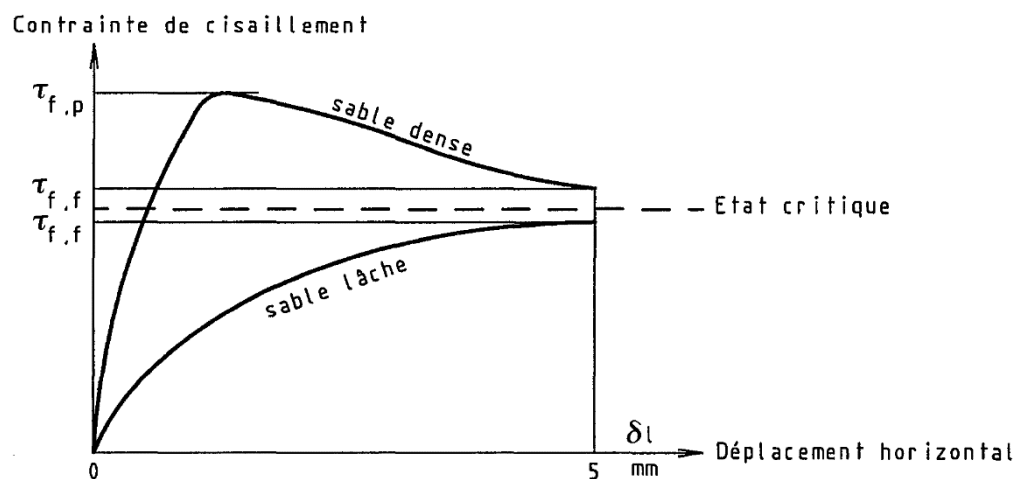
**10.1.2. Tracer les courbes suivantes en utilisant les mêmes échelles pour toutes les éprouvettes :**

- De la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du déplacement horizontal  $|\delta|$
- Du déplacement vertical  $\delta h$  du piston en fonction du déplacement horizontal  $|\delta|$ .

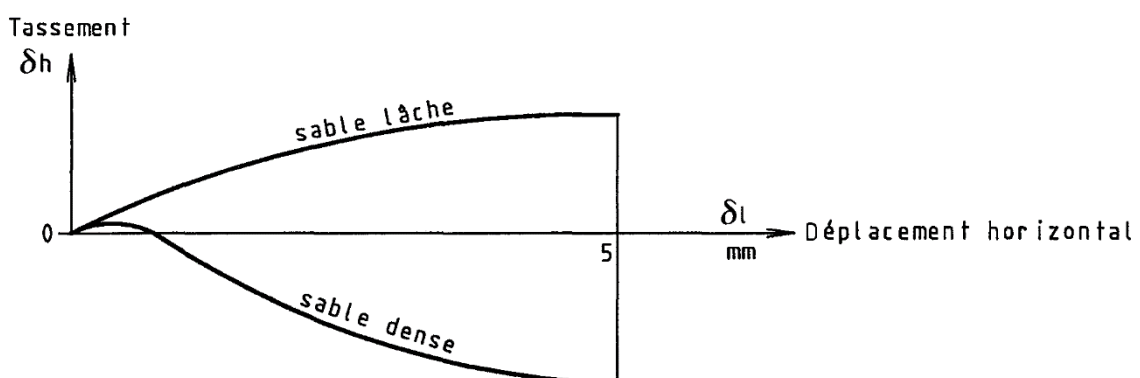
**10.1.3. Déterminer les paramètres de cisaillement :**

- $\tau_{f,p}$ : Valeur correspondant au critère de rupture : pic de la courbe  $\tau = f(|\delta|)$  lorsque cette courbe présente un pic,
- $\tau_{f,f}$ : Valeur correspondant au critère de rupture à l'état final de la courbe,
- $\tau = f(|\delta|)$  (Voir figure 7).

Si la courbe ne présente pas de palier,  $\tau_{f,f}$  est la valeur atteinte pour un déplacement horizontal  $|\delta|$  de 5 mm.



a) Courbe de contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal



b) Courbe de tassement en fonction du déplacement dans le plan de cisaillement

**Figure 7 :** Courbes d'essai sur des matériaux sableux.

**10.2. Pour l'ensemble des éprouvettes :**

Représenter sur un même graphique  $(\sigma' - \tau_f)$  (même échelle pour  $\sigma'$  et pour  $\tau$ , voir figure 8) les couples de points  $(\sigma' - \tau_{f,p})$  et  $(\sigma' - \tau_{f,f})$ .

Déterminer par un ajustement linéaire l'équation de la droite correspondant à chaque critère de rupture (**pic, état final**). Les paramètres de résistance au cisaillement rectiligne sont obtenus

- à partir de la pente des droites pour les angles  $\phi'_p$  et  $\phi'_f$ .
- à partir de l'ordonnée à l'origine des droites pour les cohésions  $c'_p$  et  $c'_f$ .

**NOTE :** Lorsque l'ordonnée à l'origine des droites est négative, reprendre le calcul en faisant un ajustement linéaire sur les couples de points et leurs symétriques par rapport à l'origine des axes de coordonnées.

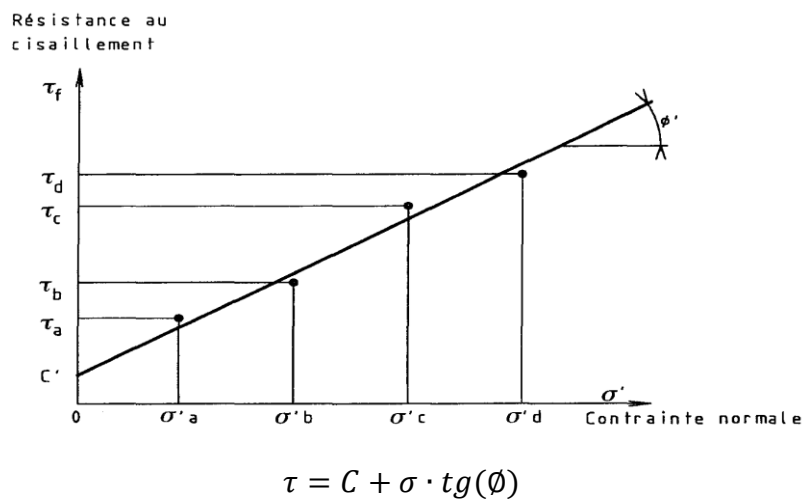
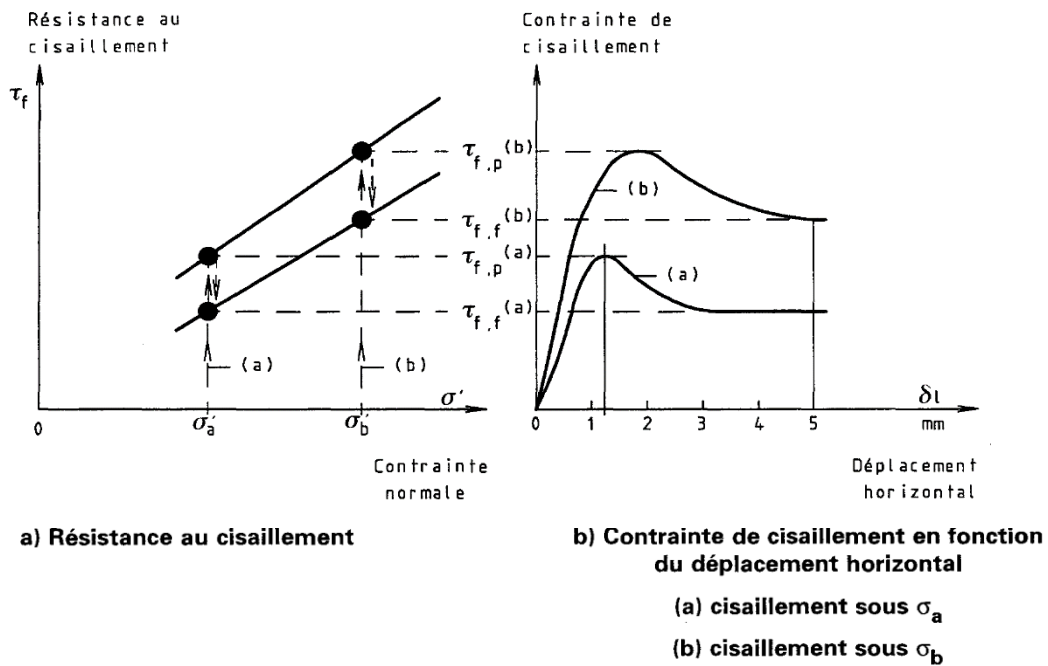


Figure 5 : Détermination des paramètres de résistance au cisaillement

**11- Compte rendu :**

Il vous est demandé de :

1. Réaliser les essais.
2. Dresser les tableaux des résultats. Compléter les tableaux des calculs en vous aidant du document réponse N°1.
3. Tracer les trois courbes des contraintes de cisaillement  $\tau$  en fonction des déplacements horizontaux  $\Delta l$  des deux demi-boîtes, sur un même graphique.  $\tau = f(\Delta l)$ , en vous aidant du document réponse N°2.
4. Déterminer les paramètres de cisaillement :
  - Déterminer les valeurs de la contrainte de cisaillement maximale  $\tau_{max}$ ,  $\tau_{f,p}$  : Valeur correspondant au critère de rupture : pic de la courbe  $\tau = f(\Delta l)$  lorsque cette courbe présente un pic.
5. Tracer les Courbes intrinsèques :
  - Placer les quatre (4) points représentant les quatre états de rupture du sol (pic,  $\tau_{max}$ ) sur le plan de Mohr, en vous aidant du document réponse N°3.
  - Après avoir déterminé les valeurs de la contrainte maximale  $\tau_{max}$  pour chaque essai, reporter ensuite chaque point sur un graphique ayant pour abscisse les contraintes normale  $\sigma$  et pour ordonnée les contraintes de cisaillement  $\tau$ , puis en trace la courbe intrinsèque du sol étudié, en vous aidant du document réponse N°3.
6. Déduire graphiquement les caractéristiques mécaniques à la rupture de ce sol ?
7. Déduire alors la valeur de la cohésion  $c$  et de l'angle de frottement  $\varphi$  du sol.
8. Déterminer l'équation de la droite de Mohr-Coulomb ?
9. Commenter vos résultats

## Document réponse N°1

### I - Calcul des contraintes de cisaillement $\tau$ :

Compléter et dresser les tableaux des résultats. Compléter les tableaux des calculs suivants :  
 $N = 98 \text{ kg} = 98 \times 9.81 = 961.38 \text{ N} = 0.96138 \text{ KN}$

$A$  : section de lechantillant :  $A = 6 \times 6 = 36 \text{ cm}^2$

$A'$  : surface de cisaillement :  $A' = 6 \times (6 - \Delta l)$  (m<sup>2</sup>)

### Essai 1 : N= 98 kg :

$\Delta l$ (mm)	$A'$ (m <sup>2</sup> ) $A' = 6(6 - \Delta l)$	N(KN)	$\sigma = \frac{N}{A'}$ (KN/m <sup>2</sup> )	T(N)	$\tau = \frac{T}{A'}$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\tau = \frac{T}{A'}$ (KPa)
0		0.96138		0		
0.12		0.96138		106.875		
0.21		0.96138		204.25		
0.43		0.96138		342		
0.68		0.96138		456		
0.94		0.96138		546.25		
1.21		0.96138		621.3		
1.5		0.96138		699.75		
1.8		0.96138		700.625		
2.1		0.96138		718.2		
2.42		0.96138		726.75		
2.74		0.96138		729.125		
3.06		0.96138		725.8		
3.36		0.96138		717.725		
3.7		0.96138		702.05		
4.02		0.96138		684		

Essai 2 : N= 138 kg :

$\Delta l$ (mm)	$A'$ (m <sup>2</sup> ) $A' = 6(6 - \Delta l)$	N(KN)	$\sigma = \frac{N}{A'}$ (KN/m <sup>2</sup> )	T(N)	$\tau = \frac{T}{A'}$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\tau = \frac{T}{A'}$ (KPa)
0		1.35378		0		
0.07		1.35378		147.25		
0.17		1.35378		256.5		
0.22		1.35378		346.75		
0.34		1.35378		465.5		
0.61		1.35378		574.75		
0.87		1.35378		684		
1.13		1.35378		731.5		
1.47		1.35378		650.75		
1.71		1.35378		890.625		
2.01		1.35378		921.5		
2.31		1.35378		935.75		
2.42		1.35378		940.5		
2.45		1.35378		894.9		
3.38		1.35378		921.5		
3.61		1.35378		908.2		

Essai 3 : N= 118 kg :

$\Delta l$ (mm)	$A'$ (m <sup>2</sup> ) $A' = 6(6 - \Delta l)$	N(KN)	$\sigma = \frac{N}{A'}$ (KN/m <sup>2</sup> )	T(N)	$\tau = \frac{T}{A'}$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\tau = \frac{T}{A'}$ (KPa)
0		1.15758		0		
0.02		1.15758		95		
0.05		1.15758		159.125		
0.21		1.15758		301.625		
0.26		1.15758		325.375		
0.39		1.15758		384.75		
0.63		1.15758		494		
0.89		1.15758		573.8		
1.05		1.15758		625.1		
1.43		1.15758		700.625		
1.74		1.15758		736.25		
2.01		1.15758		759.05		
2.33		1.15758		774.725		
2.63		1.15758		785.65		

2.95		1.15758		790.875		
3.27		1.15758		788.5		
3.67		1.15758		774.25		
3.93		1.15758		752.875		
4.27		1.15758		730.55		

Essai 4 : N= 158 kg :

$\Delta l$ (mm)	$A'$ (m <sup>2</sup> ) $A' = 6(6 - \Delta l)$	N(KN)	$\sigma = \frac{N}{A'}$ (KN/m <sup>2</sup> )	T(N)	$\tau = \frac{T}{A'}$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\tau = \frac{T}{A'}$ (KPa)
0		1.54998		0		
0.01		1.54998		118.75		
0.04		1.54998		180.5		
0.11		1.54998		306.375		
0.18		1.54998		408.5		
0.24		1.54998		622.25		
0.51		1.54998		655.5		
0.74		1.54998		871.625		
0.8		1.54998		921.5		
0.88		1.54998		957.125		
0.95		1.54998		1023.625		
1.83		1.54998		1070.175		
2.15		1.54998		1128.125		
2.45		1.54998		1131.925		
2.77		1.54998		1127.175		
3.8		1.54998		1117.675		
3.43		1.54998		1083		
3.77		1.54998		1052.125		
4.1		1.54998		1010.8		

## **Document réponse N°2**

### **II - Tracé des courbes $\tau = f(\Delta l)$ contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontal :**

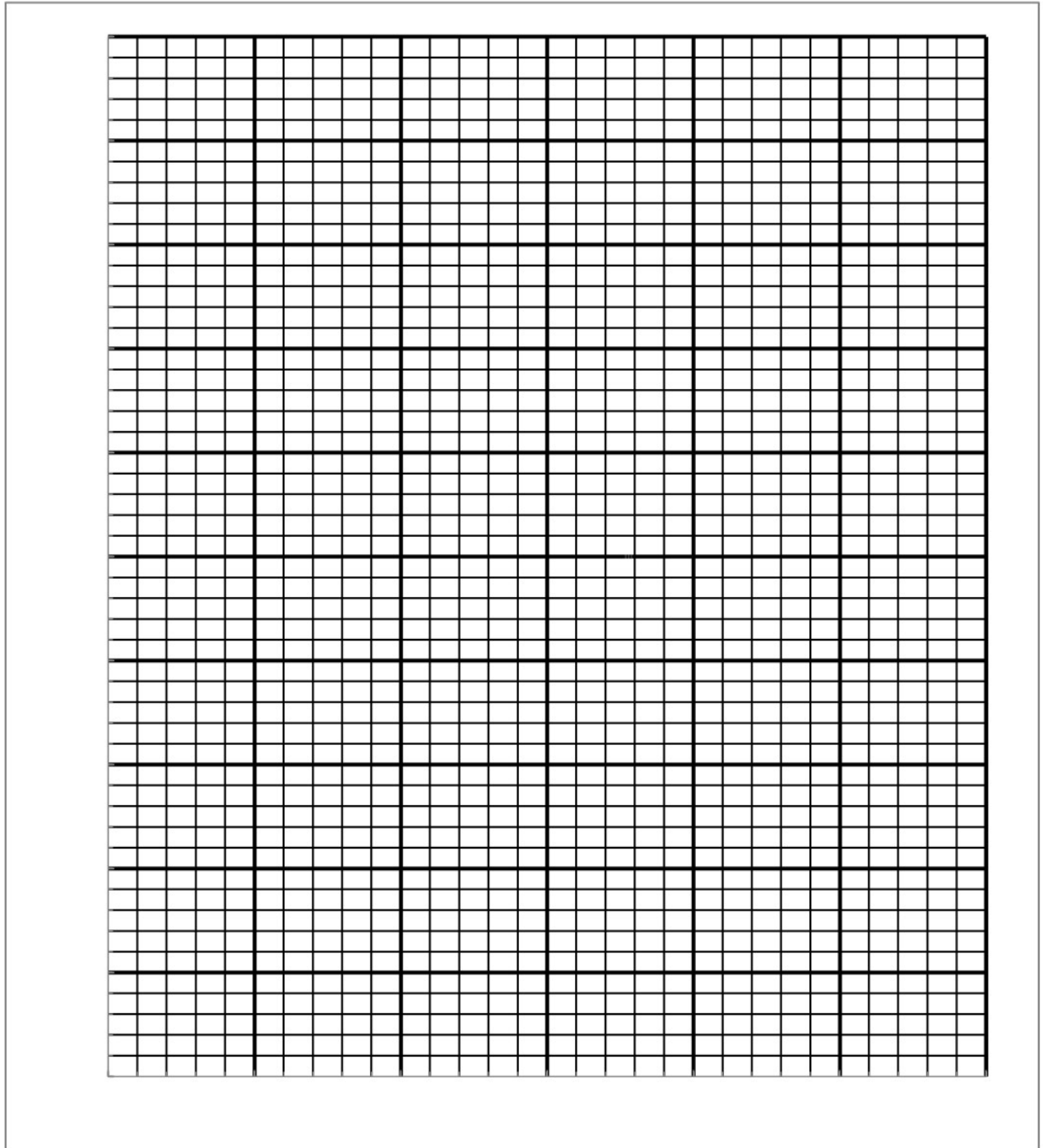
1. Porter les différentes valeurs des contraintes de cisaillement  $\tau$  en et les déplacements horizontaux  $\Delta l$  des deux demi-boîtes, correspondants des tableaux du document réponse N°1 en le quadrillage semi-logarithmique du document réponse N°2 ci-dessous. Tracer les trois courbes  $\tau = f(\Delta l)$  sur le même graphique. .
  - en abscisse : les contraintes de cisaillement  $\tau$ , échelle logarithmique
  - En ordonnée : les déplacements horizontaux  $\Delta l$  sur une échelle arithmétique.
  - La courbe doit être tracée de manière continue.



## Document réponse N°2

II - Tracé des courbes  $\tau = f(\Delta l)$  contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontal :

Contrainte de cisaillement (KPa)



Déplacement horizontal  $\Delta l$ (mm)

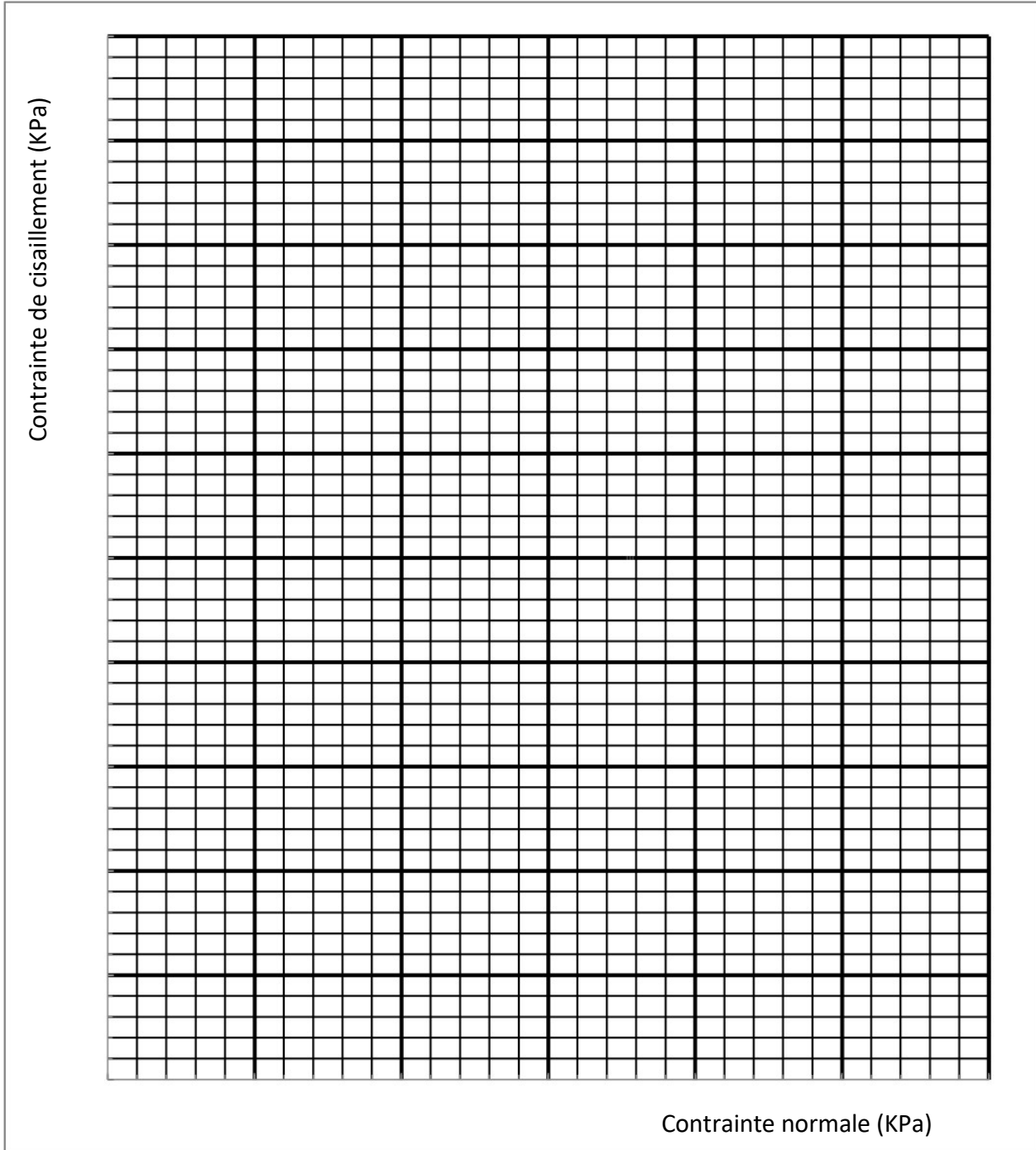
Courbe ( $\tau = f(\Delta l)$ ).

**Document réponse N°3**

**III - Tracé des courbes intrinsèques :**

Après avoir déterminé les valeurs de la contrainte maximale  $\tau_{max}$  pour chaque essai, reporter ensuite chaque point sur le graphique ci-dessous, ayant pour abscisse les contraintes normale  $\sigma$  et pour ordonnée les contraintes de cisaillement  $\tau$ , puis en trace la courbe intrinsèque du sol étudié.

Essai	1	2	3	4
$\tau_{max}$				
$\sigma$				



Courbe (  $\tau = f(\sigma)$  ).

### Références Bibliographiques

1. Costet et Sanglerat, "Cours pratiques de mécanique des sols", Dunod – Paris.
2. Caquot et Kerisel, "Traité de mécanique des sols", Gauthier, Villars – Paris.
3. Norme NF EN 933-1 (Sols : reconnaissance et essais)
4. Norme NF P 94 051 (Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau).
5. Norme NF P 94-093.
6. NF P 94-093. 2014. Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié. Édition Afnor
7. LCPC, Sétra. 1992. Guide pour la réalisation des remblais et des couches de formes. Fasc.1 et 2. Ré-édition en 2000.
8. NF P11-300. 1992. Exécution des terrassements : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Édition Afnor.
9. Classification des sols L.C.P.C.