

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran  
Mohamed BOUDIAF

Faculté d'Architecture et de Génie Civil  
Département de Génie Civil  
Laboratoire Matériaux Sol et Thermique  
LMST

.....||| *Polycopié* |||.....

# MANUEL DE TRAVAUX PRATIQUES DE MÉCANIQUE DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE ROUTIÈRE



Élaboré par :

**Mme BOUROKBA MRABENT Souad Amal**  
**Mme BENGRA Lahouaria**

Année Universitaire 2021-2022

## DÉDICACES

**E**n guise de reconnaissance, les auteurs dédient ce polycopié à Messieurs Boudia M. et Hachichi A. ; enseignants au département de Génie Civil qui leur ont inculqué leur premiers cours de mécanique des sols à l'Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf.

## AVANT-PROPOS

**L**a géotechnique joue un rôle essentiel dans l'acte de construire pour tous les travaux de génie civil. On peut citer : les fondations des ouvrages des bâtiments, ponts, usines, silos ; les ouvrages de soutènement ; la stabilité des pentes naturelles et des talus ; les terrassements : routes, autoroutes, voies ferrées ; les V.R.D et chaussées ; les tunnels et travaux souterrains ; les barrages et notamment digues et barrages en terre ; les ouvrages fluviaux, portuaires et maritimes ; l'hydrogéologie et la protection de l'environnement

**I**dentifier un sol c'est connaître sa nature, sa composition et son comportement vis-à-vis de certains phénomènes. Autrement dit c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides appelés essais d'identification.

**L**a géotechnique routière a pour objectif de définir les caractéristiques des sols qui serviront d'assise pour la structure de chaussée. Elle étudie les problèmes d'équilibre et de formation des masses de terre de différentes natures soumises à l'effet des efforts extérieurs, appliquées, aussi bien au sol que l'on rencontre dans la nature et qui supporte la construction d'une route et aux massifs de terres artificielles (remblai). Cette étude doit d'abord permettre de localiser les différentes couches et de donner les caractéristiques mécaniques et physiques de ce sol. Pour cela, on fait des essais en laboratoire pour permettre de déterminer les caractéristiques in situ.

**C**e document est constitué de deux parties : la première est consacrée aux différents essais d'identification physiques, chimiques et mécaniques. La seconde partie traite du domaine de la géotechnique routière.

**C**e polycopié est adressé aux étudiants de plusieurs spécialités telles que le génie civil, le bâtiment et les travaux publics, et se propose de présenter à travers deux parties les essais de mécanique des sols et de géotechnique routière en estimant pouvoir contribuer modestement à l'introduction de cette discipline aux ingénieurs.

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	3
PRÉSENTATION D'UN RAPPORT DE TRAVAUX PRATIQUES.....	6
PARTIE I : MÉCANIQUE DES SOLS .....	7
1. Essais physiques :.....	7
1.1 La teneur en eau d'un sol :(NF P94-050).....	7
1.2 Les poids spécifiques d'un sol: (NF P94-053 et NF P94-054 ).....	9
A- Détermination du poids spécifique humide $\gamma$ et sec $\gamma_d$ : (NF P94-053) .....	9
B- Détermination du poids spécifique des grains solides $\gamma_s$ : (NF P94-054).....	10
1.3 Détermination de la masse volumique d'un matériau en place Méthode du densitomètre à membrane : (NF P94-06-2).....	14
1.4 Les limites d'Atterberg : (NF P94-051).....	17
A- La limite de liquidité $W_L$ :.....	17
B- La limite de plasticité $W_p$ :.....	18
1.5 Analyse granulométrique d'un sol : (NF P94-056 et NF P94-057 ).....	20
A. Analyse granulométrique par tamisage(NF P94-056) : .....	20
B. Analyse granulométrique par sédimentométrie :(NF P94-057): .....	21
1.6 Essai de l'équivalent de sable : (NFP 18-598).....	31
1.7 Essai de perméabilité : (NF x30-442) .....	34
2 Essais chimiques : .....	38
2.1 Évaluation de la teneur en Carbonate ( $CaCO_3$ ) (NF P 94-048).....	38
2.2 Essai de bleu de méthylène (NF P 94-048) (ASTM C.131.55).....	40
3 Essais mécaniques .....	45
3.1 Essai Proctor : (NF P94-093).....	45
3.2 Essai CBR (California Bearing Ratio test ) :(NF P94-078).....	50

3.3 Essai de compressibilité et de consolidation à l'œdomètre(NF P94-090-1).....	55
3.4 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte: (NF P94-71-1).....	63
3.5 Essai de compression triaxiale :( NF P94-074).....	67
3.6 Essai de compression simple :(NF P94-077).....	71
PARTIE II : GÉOTECHNIQUEROUTIÈRE .....	73
2.1 Essai Proctor.....	73
2.2 Essai CBR.....	73
2.3 Essai au bleu de méthylène.....	73
2.4 Mesure de la résistance à la fragmentation par choc Essai Los Angeles( NF P18-573).....	74
2.5. Mesure de la résistance à l'attrition Essai Deval (NF P 18.577).....	78
2.6. Mesure de la résistance à l'attrition et à l'usure. Essai Micro Deval (NF P 18.572).....	82
2.7 Essai de fragmentabilité (NF P 94-066).....	87
2.8 Essai de dégradabilité( NF P 94-067).....	90
CONCLUSION .....	93
RÉFÉRENCES.....	94
ANNEXE A : CARACTÉRISTIQUES DES SOLS TYPES ORDRES DE GRANDEURS (Léreau, 2006).....	96

# **PRÉSENTATION D'UN RAPPORT DE TRAVAUX PRATIQUES**

Le compte rendu de chaque T.P devra comporter les parties suivantes :

1. Un sommaire
2. Une description succincte du matériel et des matériaux utilisés.
3. Le mode opératoire des essais.
4. Fiche technique détaillée des résultats.
5. Les problèmes rencontrés et les observations constatées durant les essais.
6. L'exploitation des mesures (tableaux de résultats, détails de calculs et courbes avec échelle adaptée (*l'utilisation d'un tableur est conseillée*)).
7. Analyse des résultats, commentaires et conclusion.

## **REMARQUE :**

Le système utilisé dans ce polycopié est le système CGS (Centimètre, Gramme, Seconde)

## **NOTA :**

Il est demandé à chaque groupe de nettoyer le matériel d'essai et l'espace du travail à la fin de chaque manipulation

# PARTIE I : MÉCANIQUE DES SOLS

## 1. Essais physiques :

### 1.1 La teneur en eau d'un sol :(NF P94-050)

#### 1 -Définition :

La teneur en eau d'un sol est le rapport du poids de l'eau libre présente dans un certain volume de sol, au poids des éléments solides compris dans ce volume

$$\omega (\%) = (\text{Poids d'eau libre} / \text{Poids des éléments solides}) \times 100$$

C'est une caractéristique essentielle, l'eau jouant un rôle déterminant sur les propriétés mécaniques d'un sol.

#### 2-Mode opératoire :

Par convention, la teneur en eau d'un sol se détermine par l'étuvage d'un échantillon de sol maintenu à 105 °C pendant 24 heures, cependant, si le sol contient de la matière organique, cette température est abaissée à 60°C durant 48 heures, un temps suffisant pour que son poids demeure constant. Cette dessiccation entraîne une évaporation totale de l'eau interstitielle (libre et capillaire), et partielle de l'eau absorbée.

#### 3-Expression des résultats :

La teneur en eau, exprimée en pourcentage s'écrit :

$$\omega(\%) = \frac{W_W}{W_S} * 100$$

$W_w$  : Poids de la phase liquide de l'échantillon.

$W_s$ : Poids de la phase solide de l'échantillon.

Ci-après , un modèle de fiche technique de cet essai.

**TP N° 1**

**TENEUR EN EAU**

Groupe :  
 Echantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

N° Tare			
Poids de la tare $P_t$ (g)			
Poids total humide $P_{th}$ (g)			
Poids total sec $P_{ts}$ (g)			
Poids d'eau $P_w = P_{th} - P_{ts}(g)$			
Poids du sol sec $P_s = P_{ts} - P_t$ (g)			
Teneur en eau $\omega = (P_w / P_s) \times 100$ (%)			



## 1.2 Les poids spécifiques d'un sol: (NF P94-053 et NF P94-054 )

### Définition :

Plusieurs poids spécifiques existent, à savoir :

- Le poids spécifique du sol humide est le poids de matériaux (phase liquide + phase solide) contenu dans une unité de volume d'échantillon, c'est le poids spécifique (naturel ou en place) du matériau. On le représente par le symbole  $\gamma$ , ou mieux par  $\gamma_h$ , lorsque le sol est saturé, on écrit aussi ( $\gamma_{sat}$ ).
- Le poids spécifique du sol sec est le poids de matériaux pris en compte dans le volume unitaire, d'échantillon est uniquement le poids de la phase solide, la phase liquide étant supposée éliminée. On le représente par le symbole  $\gamma_d$ .
- Le poids spécifique des grains solides, c'est celui des matériaux constituant le squelette solide du sol, on le représente par le symbole  $\gamma_s$ .

### A- Détermination du poids spécifique humide $\gamma$ et sec $\gamma_d$ : (NF P94-053)

#### 1- Méthodes de mesures:

Il s'agit de mesurer, soit le volume d'un échantillon connaissant son poids, soit inversement, le poids d'un échantillon connaissant son volume, d'où deux méthodes de mesures.

#### 2- Appareillage utilisé :

- Boîtes à pétri
- Balance de précision 0,001g
- Etuve régulée et ventilée
- Dessiccateur
- Spatule
- Anneau volumétrique
- Paraffine

#### 3- Réalisation de l'essai :

Mesure du poids d'un volume déterminé d'échantillon, on prélève l'échantillon de sol à l'aide d'un carottier dont on connaît les dimensions et le poids après pesée, on peut calculer le poids spécifique du sol humide ( $\gamma_h$ ), l'échantillon est ensuite placé en étuve, ce qui permet de mesurer sa teneur en eau et d'en déduire le poids spécifique du sol sec  $\gamma_d$ .

Mesure du volume d'un échantillon après immersion on procède généralement à la mesure de la poussée hydrostatique au moyen d'une balance équipée à cet effet, l'échantillon est préalablement enrobé de paraffine afin d'empêcher toute imbibition d'eau.

On tient compte, bien entendu du volume et du poids de la paraffine.

#### 4- Critique des méthodes :

En ce qui concerne la première, les erreurs proviennent souvent d'un compactage de l'échantillon provoqué par le carottier. Pour un sol relativement plastique.

Ces erreurs peuvent être importantes, il faut par ailleurs remarquer que cette méthode n'est pas applicable à un sol granuleux peu cohérent.

#### 5- Expressions des résultats:

Le poids spécifique humide vaut:

$$\gamma_h = \frac{W}{V}$$

Où W et V représentent respectivement le poids et le volume de l'échantillon prélevé, donc avant toute modification de la teneur en eau naturelle.

Le poids spécifique sec vaut:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

Où  $W_s$  et V représentent respectivement le poids du sol sec et le volume de l'échantillon prélevé.

### ***B- Détermination du poids spécifique des grains solides $\gamma_s$ : (NF P94-054)***

#### 1- Principe de la mesure :

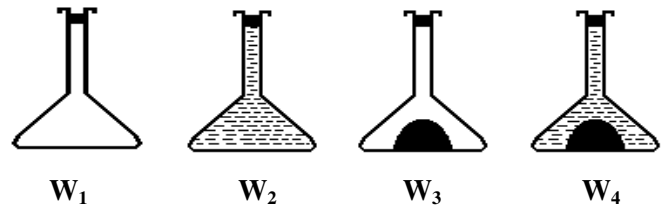
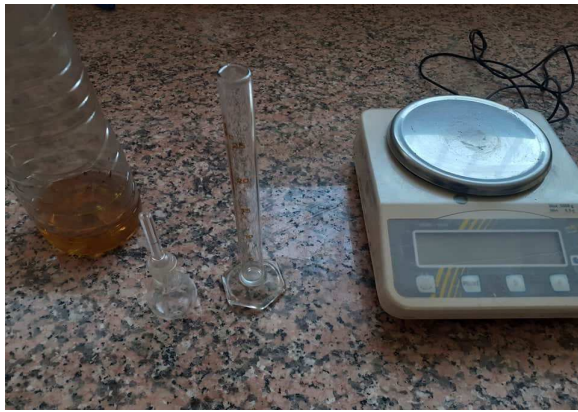
La mesure s'effectue par pesée hydrostatique, c'est à dire par immersion et déplacement du liquide.

#### 2- Appareillage utilisé :

- Balance de précision
- Thermomètre
- Etuve régulée
- Bain de sable
- Mortier et pilon en porcelaine
- Pipette jaugée
- Pycnomètre : capacité 25, 50 et 100 cm<sup>3</sup> à 20°C

#### 3- Réalisation de l'essai :

L'échantillon est séché en étuve suivant les dispositions décrites, puis il est broyé afin d'obtenir des éléments inférieurs à 0,4 mm. Ensuite, un poids déterminé de cet échantillon est introduit dans un flacon à col étroit (pycnomètre) qui permet la mesure du volume du liquide déplacé, soit par différence de poids, soit par mesure directe du volume déplacé.



*Figure I.1 : Réalisation et principe de l'essai du pycnomètre*

#### 4- Expression des résultats:

Le poids spécifique des grains solides est déterminé à partir de la formule suivante :

$$\gamma_s = \gamma_w \frac{(w_2 - w_1)}{(w_4 + w_2 - w_1 - w_3)}$$

Avec:

$w_1$ : poids du pycnomètre vide,

$w_2$ : poids du pycnomètre rempli d'eau distillé jusqu'au repère,

$w_3$ : poids du pycnomètre, avec l'échantillon,

$w_4$ : poids du pycnomètre+ matériau + liquide (eau ou gaz oil) jusqu'au repère,

$\gamma_w$ : poids volumique de l'eau conventionnellement pris égale à  $1\text{g/cm}^3$ .

**TP N° 2**

**POIDS SPECIFIQUE APPARENT ET SEC**

$\gamma, \gamma_d$

Groupe :  
 Echantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

N° Tare			
Poids de la tare $P_t$ (g)			
Poids total humide $P_{th}$ (g)			
Poids total sec $P_{ts}$ (g)			
Poids d'eau $P_w = P_{th} - P_{ts}$ (g)			
Poids de sol sec $P_s = P_{ts} - P_t$ (g)			
Teneur en eau $\omega = P_w / P_s \times 100$ (%)			
Volume apparent $V_a$ (cm <sup>3</sup> )			
Poids humide $P_h = P_{th} - P_t$ (g)			
$\gamma = P_h / V_a$ (g/cm <sup>3</sup> )			
$\gamma_d = \gamma / 1 + \omega$ (g/cm <sup>3</sup> )			

$\gamma_{dmoy} =$

**TP N° 3**

**POIDS SPÉCIFIQUE DES GRAINS SOLIDES**

$$\gamma_s$$

Groupe :  
 Échantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

N° d'essais		1	2	3
Poids du pycnomètre vide	$W_1$ (g)			
Poids du pycnomètre remplie d'eau distillé jusqu'au repère	$W_2$ (g)			
Température	$T^\circ \text{C}$			
Poids du pycnomètre + sol	$W_3$ (g)			
Poids du pycnomètre + sol + liquide (gaz oil)	$W_4$ (g)			
Poids du sol	$W_s$ (g)			
Volume du gaz oil	$V_{\text{gaz}} = (W_3 - W_2) / \rho_{\text{gaz}}$ (cm <sup>3</sup> )			
Volume du pycnomètre	$V_P$ (cm <sup>3</sup> )			
Volume des grains solide	$V_{Gs}$ (cm <sup>3</sup> )			
Poids Spécifique des grains solides	$\gamma_s = W_s / V_{Gs}$ (g/cm <sup>3</sup> )			

$$\gamma_{\text{smoy}} =$$

### 1.3 Détermination de la masse volumique d'un matériau en place Méthode du densitomètre à membrane : (NF P94-06-2)

#### 1- Principe de l'essai :

Cette méthode consiste à déterminer le poids volumique d'un sol in situ. Cependant cette méthode n'est pas applicable dans le cas des sols très mous, susceptibles de se déformer sous de faibles pressions.

L'essai consiste à creuser une cavité à l'aide d'un densitomètre à membranes. L'appareil est doté d'un piston qui, sous l'action de l'opérateur, refoule un volume d'eau dans une membrane souple étanche qui épouse la forme de la cavité. Une tige graduée permet de lire directement le volume (Figure I. 2).

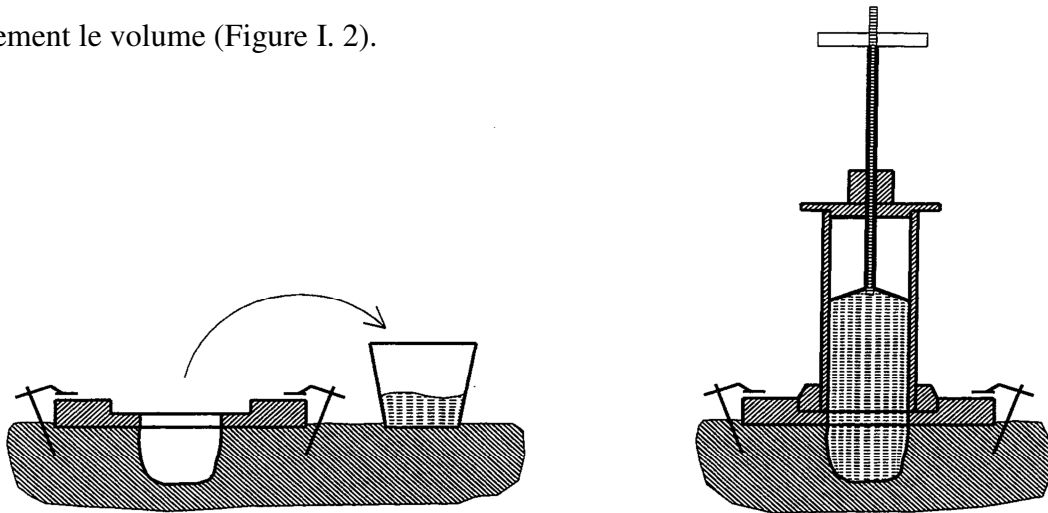
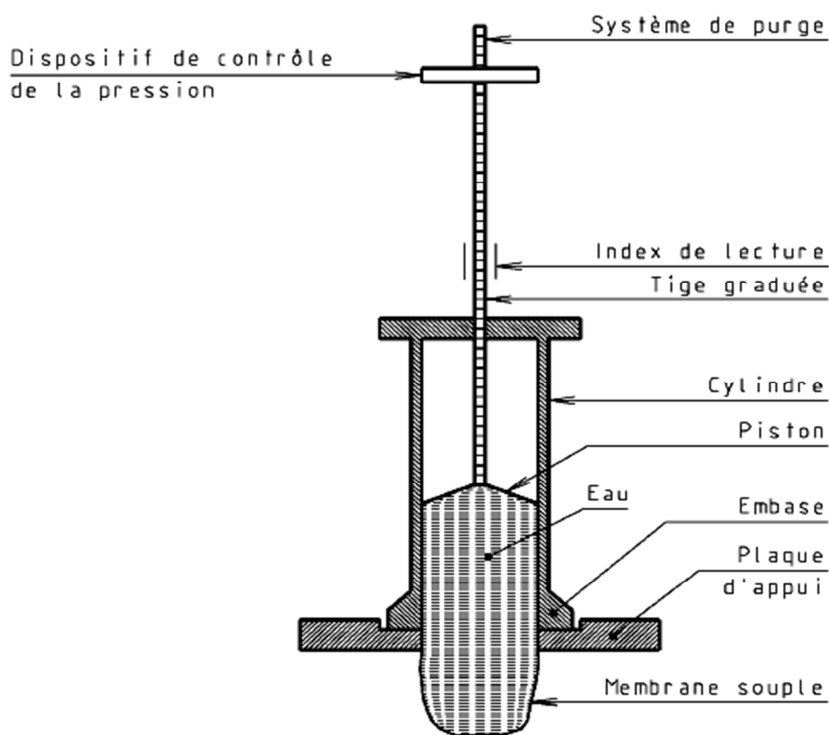


Figure 1 : Schéma de principe de l'essai

Figure I.2 : Schéma de principe de l'essai

#### 2- Appareillage utilisé :

- Densitomètre à membrane (Figure I.3)
- Boite à pétrie
- Balance de précision 1/100 de gramme
- Balance de précision 1/10 de gramme
- Etuve régulée et ventilée
- Dessiccateur
- Spatule
- Container



*Figure I.3 : Détails du densitomètre*

### 3- Mode opératoire :

- Bien aplanir la surface du sol
- Mettre l'appareil en place et lire le volume initial  $V_0$  et relever la pression exercée sur le piston
- Creuser un trou dans le sol d'une capacité minimale déterminée par le tableau ci-dessous).
- Prélever la totalité du sol contenu dans le trou afin de déterminer le poids de l'échantillon humide et sa teneur en eau.
- Faire la lecture du volume final  $V_1$

*Tableau 1.1 Quantité minimale de l'échantillon pour la détermination de  $w\%$  ( Hachichi et Benaïssa , 1984)*

Dimension maximale des grains	Volume minimum du trou ( $\text{dm}^3$ )	Quantité minimale de l'échantillon (g) pour déterminer $w\%$
4.75	0.7	100
12.5	1.4	250
25.0	2.1	500
50.0	2.8	1000

**TP N° 4**  
**DÉTERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE D'UN MATÉRIAU**  
**EN PLACE**  
**MÉTHODE DU DENSITOMÈTRE À MEMBRANE**

Groupe :  
 Lieu de prélèvement  
 Couleur :  
 Nature :  
 Date de l'essai :

<b>Poids spécifique apparent</b>	N° de l'essai			
	Volume initiale $V_0$ (cm <sup>3</sup> )			
	Volume final $V_1$ (cm <sup>3</sup> )			
	Volume du trou $V_a = V_1 - V_0$ (cm <sup>3</sup> )			
	Poids total humide $W_h$ (g)			
	$\gamma_h = \frac{w_h}{V_a}$ (g/cm <sup>3</sup> )			
<b>Teneur en eau <math>\omega</math> %</b>	N° Tare			
	Poids de la tare T (g)			
	Tare+ échantillon humide T+ $W_h$ (g)			
	échantillon humide $W_h$ (g)			
	échantillon sec $W_s$ (g)			
	$\omega\% = \frac{W'_h - W'_s}{W'_s}$			
	(g/cm <sup>3</sup> ) $\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \omega}$			

$\gamma_{dmoy} =$



## 1.4 Les limites d'Atterberg : (NF P94-051)

### 1-Definition

Les limites d'Atterberg sont des essais qui permettent de définir des indicateurs qualifiants la plasticité d'un sol, et plus précisément de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Notons que cet essai se fait uniquement sur les éléments fins du sol et il consiste à faire une classification du sol.

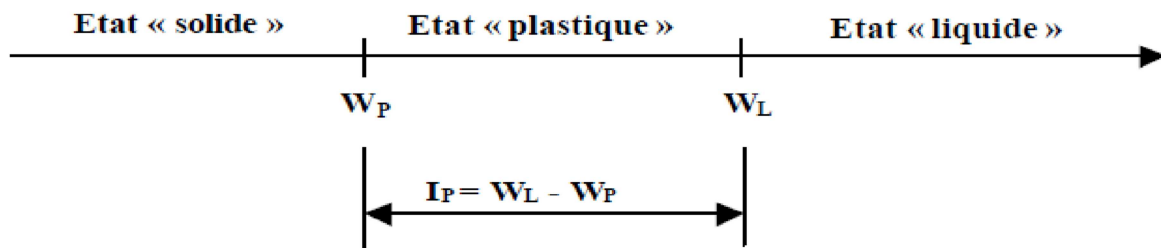


Figure I.4 : Différents états de consistance.

$W_L$ : Limite de liquidité qui sépare les états liquides et plastiques.

$W_P$ : Limite de plasticité qui sépare l'état plastique et semi-solide.

$W_R$ : Limite de retrait qui sépare l'état semi-solide et l'état solide.

$I_P$ : indice de plasticité

$$I_p = W_L - W_p$$

$I_C$ : indice de consistance

$$I_c = \frac{W_L - \omega}{I_p} \quad \text{avec : } \omega \text{ teneur en eau naturelle}$$

$I_L$ : indice de Liquidité

$$I_L = 1 - I_c$$

$I_R$ : indice de retrait

$$I_R = W_R - W_p$$

### 2- Appareillage :

- Boite de Casagrande.
- Boite à pétri.
- Table lisse pour malaxage des mortiers et confections de rouleaux.
- Spatule.
- Balance de précision 0,001g.
- Étuve régulée et ventilée.

### 3- Mode opératoire :

#### A- La limite de liquidité $W_L$ :

- Prendre un échantillon de 60 g environ (fraction de sol qui passe au tamis de 0.4mm) dans une coupelle lisse, à l'aide de la spatule on répartie au 2/3 la pate dans la coupelle.
- Tracer une rainure avec l'outil à rainurer en prenant soin de la maintenir perpendiculairement à la surface.

- Soumettre la coupelle à des chocs réguliers (boite de Casagrande , Figure I.5) au rythme de 2 coups par seconde, la hauteur étant réglée à une hauteur de 1.0 cm à l'aide d'une calle.
- Noter le nombre de coups nécessaire pour avoir une fermeture de la rainure sur une longueur de 1 cm.
- Prélever un échantillon de chaque coté de la rainure et au voisinage du lieu où les deux lèvres sont fermées.
- Placer les échantillons prélevés dans une boîte à pétrir et les mettre dans une étuve pour déterminer la teneur en eau.

**B- La limite de plasticité  $W_p$  :**

- Étaler le reste de l'échantillon ayant servi pour la détermination de  $W_L$  sur une plaque de marbre.
- Former à l'aide de la paume de la main des rouleaux de 3 mm de diamètre et de 10 à 15 mm de longueur. La limite de plasticité est la teneur en eau atteinte lorsque le rouleau, soulevé par le milieu de 1 à 2 cm, se fissure.

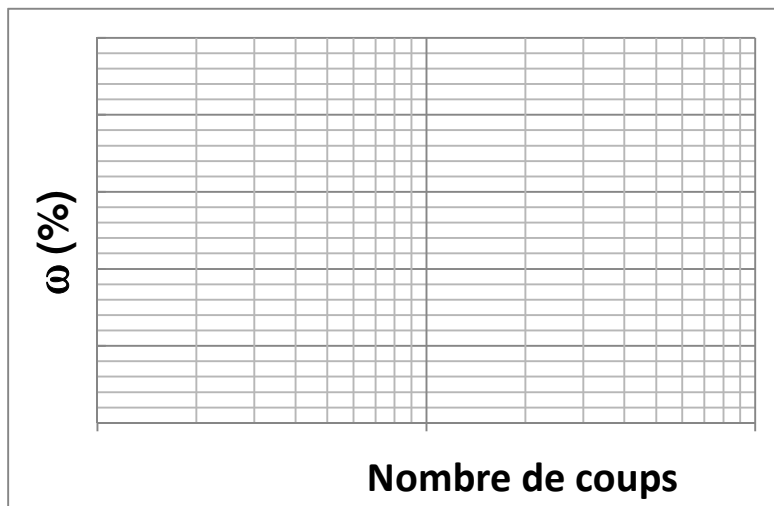


*Figure I.5 : Matériel utilisé et préparation de l'échantillon.*

**TP N° 5**  
**LIMITES D'ATTERBERG**

Groupe :  
 Lieu de prélèvement  
 Couleur :  
 Nature :  
 Date de l'essai :  
 Teneur en eau naturelle  $\omega_{nat} =$       %

	LIQUIDITÉ					PLASTICITÉ			
N° tare									
Poids de la tare $P_t$ (g)									
Poids total humide $P_{th}$ (g)									
Poids total sec $P_{ts}$ (g)									
Poids d'eau $P_w = P_{th} - P_{ts}$ (g)									
Poids de sol sec $P_s = P_{ts} - P_t$ (g)									
Teneur en eau $\omega = P_w / P_s$ (%)									
Nombre de Coups									



**RESULTATS :**  
 $W_L =$   
 $W_p =$   
**Indice de plasticité**  
 $I_p = W_L - W_p$   
**Indice de liquidité**  
 $I_L = \frac{W_L - W_p}{I_p}$

## **1.5 Analyse granulométrique d'un sol : (NF P94-056 et NF P94-057 )**

### **1- Définition :**

L'analyse granulométrique se propose de définir la répartition des grains constitutifs d'un sol par classes de taille, elle est réalisée:

- Par un tamisage mécanique pour les grains supérieurs à 0,08mm.
- Par un essai de sédimentation pour les particules inférieures à 0,08mm.

La granularité se définit comme la répartition de la dimension moyenne des particules du sol, exprimée en pourcentage de la masse totale du matériau.

L'analyse granulométrique s'effectue jusqu'à 80 µm par tamisage du matériau par voie sèche ou par voie humide, les dimensions des mailles des tamis les plus couramment utilisés sont les suivants: 80mm, 50 mm, 32mm, 20m, 10mm, 5mm, 2mm, 1mm, 0.4mm, 0.1mm, 0.08mm.

L'analyse granulométrique se poursuit par la sédimentométrie.

### **A. Analyse granulométrique par tamisage(NF P94-056) :**

#### **2-Appareillage:**

- Colonne de tamis (80,50,20,10,5,2,1,0.5,0.2,0.1,0.08mm de diamètre) ;
- Vibro-tamis;
- Pinceau;
- Balance de précision;
- Étuve ventilée et réglée.

#### **3-Mode opératoire:**

L'essai portera sur un échantillon de sable ou sur un échantillon de gravier

Le poids de l'échantillon représentatif est fonction de la dimension du grain le plus gros , il est recommandé de prendre cette quantité définie par les limites :

$$200 \text{ D} < \text{P} < 600 \text{ D}$$

**P** : Poids de l'échantillon exprimé en grammes

**D** : Diamètre équivalent maximale du plus gros grain exprimé en millimètres

#### **1- Étapes de l'essai**

- Constituer la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de haut vers le bas après avoir pesé chacun d'eux à vide;
- Mettre l'échantillon dans le tamis supérieur;
- Faire soumettre la colonne à la vibration mécanique ;
- Reprendre un à un les tamis pour compléter le tamisage à l'aide d'un pinceau et les peser ;
- Récupérer les particules se trouvant dans le fond qui ferme la colonne et les pesés. Si ce poids dépasse 15% du poids initial; l'analyse granulométrique doit être complétée par la sédimentométrie.

## ***B. Analyse granulométrique par sédimentométrie : (NF P94-057):***

### **1- Appareillage:**

- Deux éprouvettes de verre de 1 litre de contenance;
- Densimètre gradué de 0.850 à 1.100g/cm<sup>3</sup>;
- Thermomètre;
- Agitateur;
- Etuve;
- Balance de précision 0.01 g;
- Chronomètre;
- Dé Flocculant. : Solution de 5% d'hexametaphosphate de sodium;
- Eau distillée.

### **2- Mode opératoire:**

- Désagréger le tamisât à 0.080mm (ou 0.100mm) obtenu par voie humide;
- Prélever 40 g de matériau sec homogénéisé;
- préparer une solution constituée par 250 cm<sup>3</sup> d'eau distillée et 30cm<sup>3</sup> d'une solution d'hexametaphosphate de sodium;
- Imbiber l'échantillon prélevé dans la solution ainsi préparée pendant 12 heures;
- Procéder à l'agitation mécanique et manuelle pendant 5 minutes afin de séparer les grains;
- Compléter l'éprouvette avec de l'eau distillée jusqu'à 1000 cm<sup>3</sup> et remuer la solution avec un agitateur manuel afin de répartir uniformément les grains;
- Retirer l'agitateur et mettre en marche simultanément le chronomètre, puis plonger lentement le densimètre;
- Faire les lectures du densimètre au bout de 30 secondes, 1, 2, 5, 10, 20, 40, 80 minutes, 4h, 16h, 24h. Le densimètre ne pourra être retiré de la solution qu'après avoir relevé la lecture à 2 minutes. Pour le reste des lectures sur le densimètre et le thermomètre, retirer le densimètre.
- une deuxième éprouvette remplie de la solution précédemment préparée et ramenée à la température ambiante pour servir à la lecture des températures.

### **3- Précautions de la manipulation :**

- La tige du densimètre doit être parfaitement propre.
- Ne saisir le densimètre que par son extrémité supérieure.



**Figure 1.6 :** Essai d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie

#### 4- Calculs :

##### *A/ Notation :*

Ct : correction due à la variation de température au cours de l'essai.

Cm : correction due au ménisque.

Cd : correction due au dé flocculant.

R : lecture du densimètre au sommet du ménisque.

R' : lecture du densimètre à la base du ménisque. :

$$R' = n + C_m$$

N : nombre de graduation x 5 (5 étant la valeur d'une graduation).

R<sub>1</sub> : lecture corrigée  $R_1 = n + C_t + C_m - C_d$

H<sub>r</sub> : profondeur effective du centre de poussée :

$$H_r = H_0 - R' d$$

H<sub>0</sub> : Distance du centre de poussée à la graduation 1000.

D : distance entre 2 graduations successives  $d = 2 \text{ mm}$

##### *B/ Correction due à la température :*

En fonction de la valeur de la température de l'essai, le nomogramme de la Figure I.8 donne la valeur de Ct.

##### *C/ coefficient de Correction Cm :*

La correction est évaluée à une graduation soit  $C_m = +5$ .

**D/ coefficient de Correction Cd :**

La correction est évaluée à 1/2 graduation soit Cd= 2,5.

**E/ coefficient de Correction Cd :**

**Notation supplémentaire :**

V : volume de la suspension=1000 cm<sup>3</sup>

Ws : poids du sol sec (g).

Γs : poids spécifiques (g/cm<sup>3</sup>).

Γw : poids spécifiques de l'eau.

P : pourcentage des particules de diamètres <D.

D : diamètre équivalent.

Le poids spécifiques γs de suspension à la profondeur Hr est :

$$R = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} d \text{ où } : \gamma_s = R \cdot \gamma_w$$
$$\gamma_s = \frac{W_{susp}}{V_{susp}} = \frac{W_1 + W_2}{V_{susp}} = \frac{W_1 + W_{eau}}{V_{susp}}$$

Les particules de  $\phi < D$  représentent un certain pourcentage du poids solide initial (W), donc le poids de cette fraction p est  $W_1 = p \cdot W$ . avec dans ce qui suit :  $\Gamma_s = 2,65$

D'où :

$$p = \frac{V}{W} \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \frac{R1}{1000}$$
$$p = \frac{1000}{40} \frac{2.65}{2.65 - 1} \frac{R1}{1000}$$

D'où  $p = 0.04 R1 \Rightarrow p(\%) = 4 R1$

**F/ Diamètre équivalent :**

A l'instant, les particules qui ont parcouru la distance Hr ont une vitesse de sédimentation v, tel que :

$$V = \frac{Hr}{t} = \frac{H_0 - R'd}{t}$$

Donc :  $\frac{Hr}{t} = g \frac{\gamma_s - 1}{18\zeta} D^2$  loi de stockes

En exprimant t en minutes et D en millimètres (mm) on a :

$$\frac{Hr}{60t} = g \frac{\gamma_s - 1}{18\zeta} D^2$$

$$D = \sqrt{\frac{30}{g(\gamma_s - 1)} \frac{Hr}{t}}$$

$\zeta = \text{poises}$

$G: (\text{cm/s}^2)$

$\gamma_s: (\text{g/cm}^3)$

$T: (\text{mn})$

$D: (\text{mm})$

L'abaque représenté sur la Figure I.8 donne la valeur de F en fonctions de  $T^\circ = C$  et de  $\gamma_s$ .

$T^\circ C$  : température en degré Celsius de la solution

$$D : F \sqrt{\frac{Hr}{t}} \text{ avec } F = \sqrt{\frac{30\zeta}{g(\gamma_s - 1)}}$$

Les grains solides occupent un volume de  $P.W. \frac{1}{\gamma_s}$

Le volume occupé par l'eau correspondant est :

$$V_{\text{suspension}} \cdot \frac{P.W.}{\gamma_s}$$

Le poids de cette eau sera :  $\frac{\gamma_w}{\gamma_s} \left[ V_{\text{susp}} - \frac{P.W.}{\gamma_s} \right]$

Finalement :  $\delta_s = \frac{1}{V_{\text{susp}}} \left[ P.W. \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \left( V_{\text{susp}} - \frac{P.W.}{\gamma_s} \right) \right]$

$$\delta_s = \frac{P.W.}{V_{\text{susp}}} + \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \left( 1 - \frac{P.W.}{\gamma_s \cdot V_{\text{susp}}} \right) = R \cdot \gamma_w$$

Avec :  $\gamma_w = 1 \text{g/cm}^3$

$$\delta_s = \frac{P.W.}{V_{\text{susp}}} + 1 - \frac{P.W.}{\gamma_s \cdot V_{\text{susp}}} = R$$

D'où

$$\delta_s = p \left[ \frac{W}{V_{\text{susp}}} - \frac{W}{\gamma_s \cdot V_{\text{susp}}} \right] + 1 = R$$

D'où

$$p = \frac{R - 1}{\frac{W}{V_{\text{susp}}} \left( 1 - \frac{1}{\gamma_s} \right)} = \frac{R - 1}{\frac{W}{V_{\text{susp}}} \left( \frac{\gamma_s - 1}{\gamma_s} \right)}$$

$$p = \frac{(R - 1) \cdot V_{\text{susp}} \cdot \gamma_s}{W(1 - \gamma_s)} = \frac{V_{\text{susp}}}{W} \cdot \frac{\gamma_s}{1 - \gamma_s} (R - 1)$$



Avec :  $R=1+(n/100)$

$$p = \frac{(R - 1) \cdot V_{susp} \cdot \gamma_s}{W(1 - \gamma_s)} = \frac{V_{susp}}{W} \cdot \frac{\gamma_s}{1 - \gamma_s} \cdot \frac{n}{1000}$$

La lecture corrigée est donnée par l'expression

$$R1 = n \pm Ct + Cm - Cd$$

### ***Coefficients de correction Ct, Cm, Cd.***

#### ***A. Détermination du coefficient de correction due au défloculant Cd :***

- Prendre 1000 cm<sup>3</sup> d'eau dans une éprouvette et mesurer la densité.
- Mettre dans une éprouvette 30cm<sup>3</sup> de de flocculant et compléter avec de l'eau distillé jusqu'à 1 litre. Faire la lecture au densimètre.

La différence des deux lectures représente Cd, car la présence de la solution d'héxa Meta phosphate de sodium (5%) modifié la densité de la suspension.

#### ***B. Détermination du coefficient de correction due au ménisque Cm :***

- Prolonger le densimètre dans une éprouvette d'eau et faire les lectures au sommet et à la base du ménisque.

La différence des ces deux mesures représente Cm. Cette correction est à apporter car, la solution de l'essai de sédimentométrie étant opaque, la lecture ne peut se faire qu'au sommet du ménisque.

#### ***Détermination de Hr :***

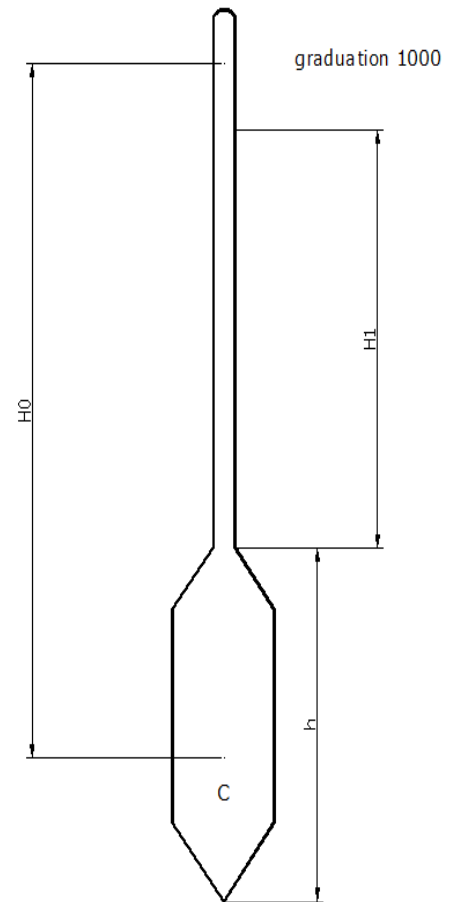
- Pour les trois premières lectures Hr est donnée par une relation suivante :

$$Hr = H1 + 1/2h$$

- Pour les lectures au-delà de 2 min, on prendra

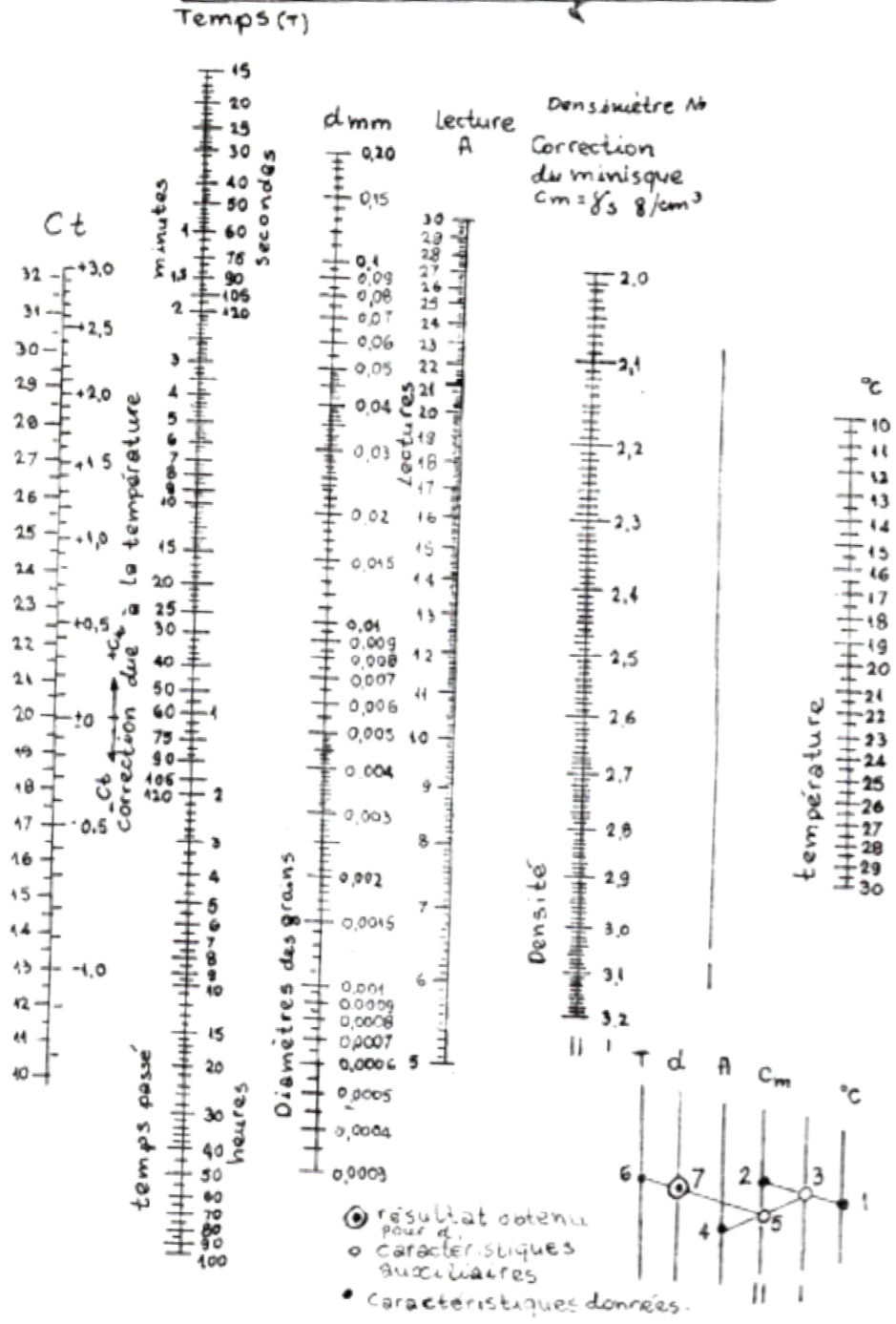
$$Hr = H_0 - d(n/5 + 1)$$

Avec H<sub>0</sub> et h (selon le type du densimètre)



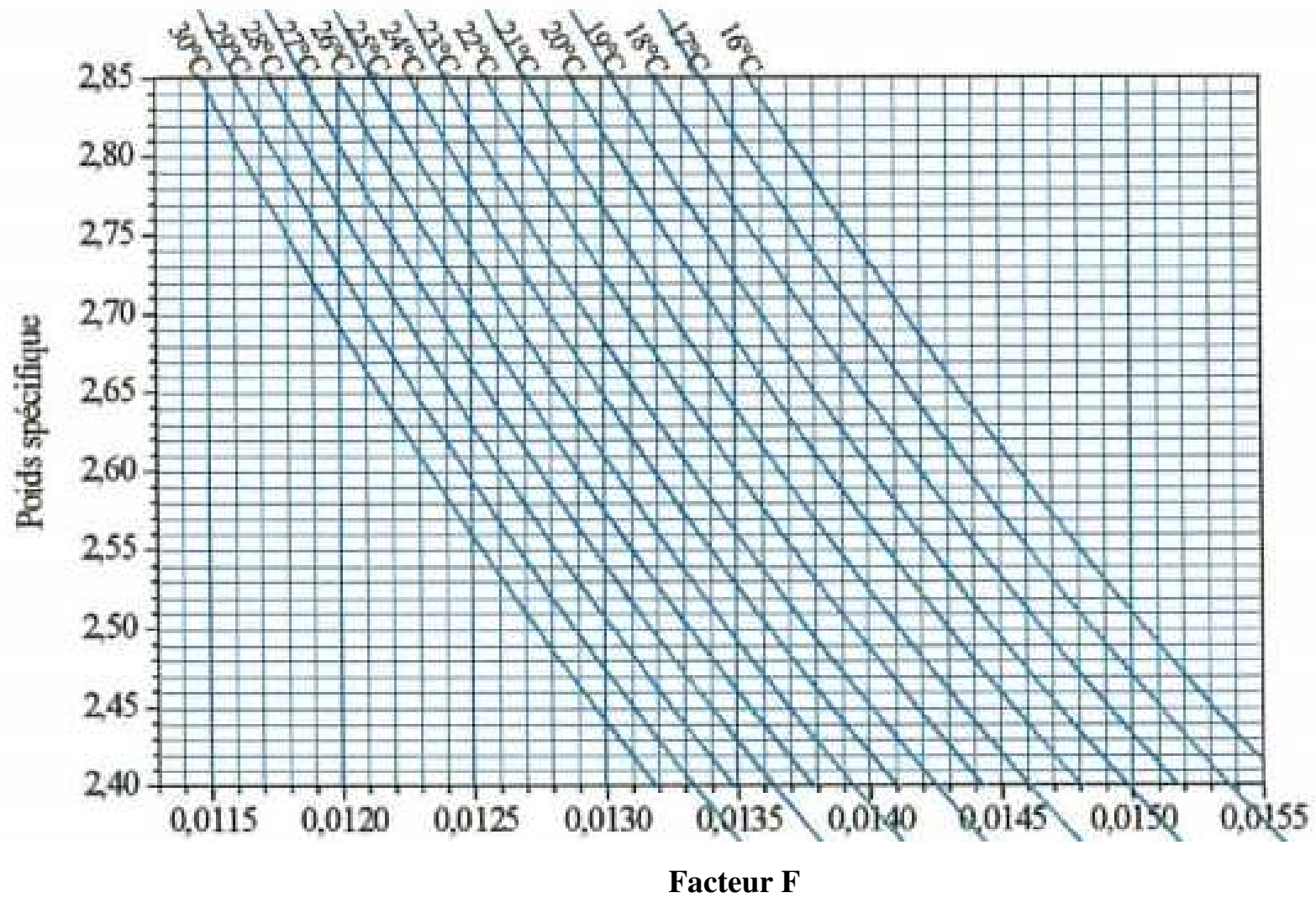
**Figure I.7** Schéma représentatif d'un densimètre

**MONOGRAMME POUR L'ANALYSE DENSIMETRIQUE**



ORAN 11-11-1991. PETKOV DIMITRE - BOUDIA MAAMAR

Figure 1.8 : Détermination du coefficient  $C_t$



*Figure I.9 : Détermination du coefficient F*



**TP N° 7**

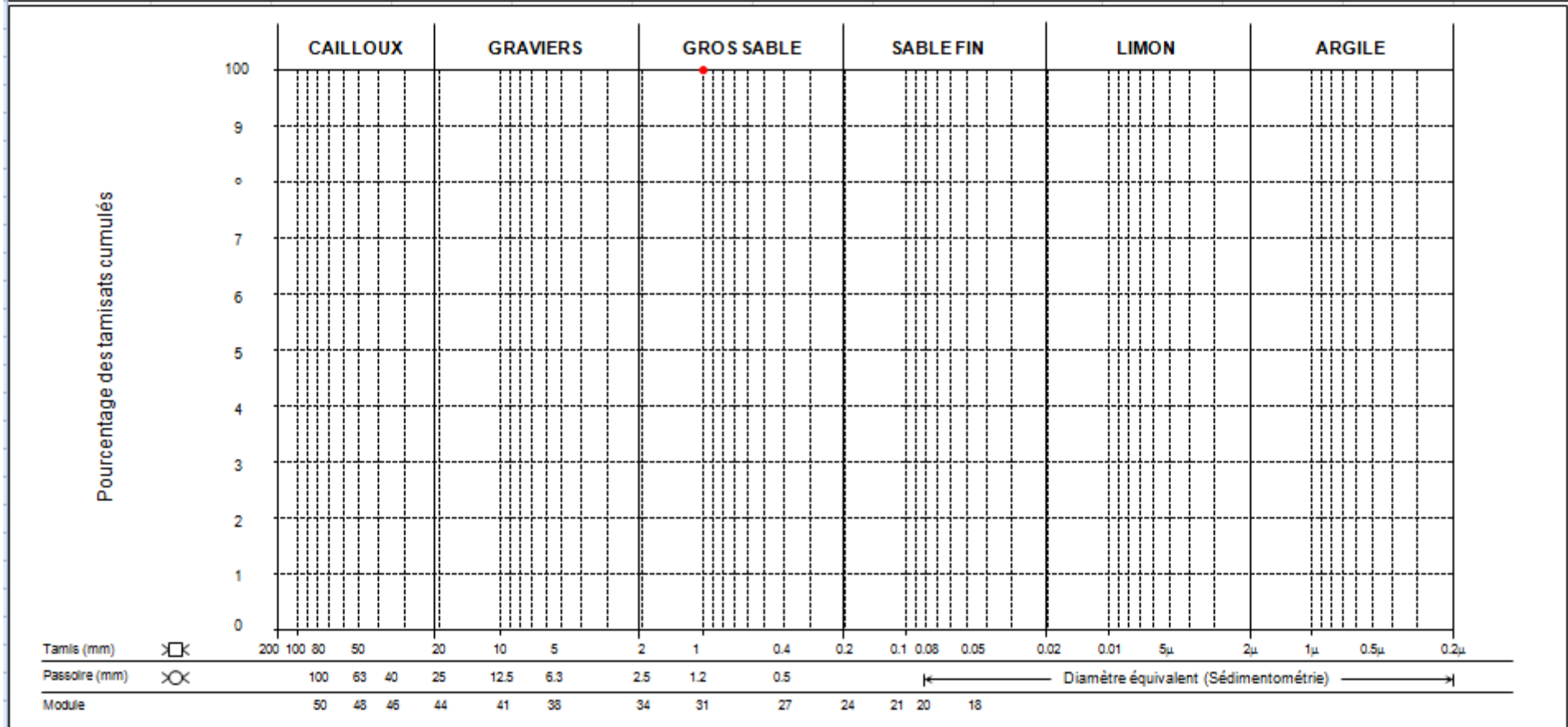
**ANALYSE GRANULOMETRIQUE**  
**PAR SEDIMENTOMETRIE**

Groupe :  
 Echantillon :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Sondage :  
 Profondeur :  
 Date de l'essai :

$p \% \phi < 0.080 \text{ ou } 0.100 \text{ mm}$

Temps de lecture	Lecture Nbre de graduation	$t^\circ$	F	$C_t$	$R_1$	$p \% < D$	$p \times P \% < D$	$H_r$	D (mm)
30 "									
1 "									
2 '									
5 '									
10 '									
20 '									
40 '									
80 '									
4 H									
16 H									
24 H									

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE - Normes NFP 94 056 et 94 057



## **1.6 Essai de l'équivalent de sable : (NFP 18-598)**

### **1- But de L'essai :**

Il permet de mesurer rapidement l'importance relative des éléments fins au sein d'un matériau sableux.

### **2- Principe de l'essai :**

Après un lavage énergétique, il s'agit de mettre en suspension les éléments fins de l'échantillon de sol au moyen d'un flocculant (solution de chlorure de calcium, de glycérine..) qui entraîne une coagulation des particules argileuse sous forme de flocons.

Cette opération étant réalisée dans une éprouvette transparente, on mesure d'une part la hauteur du flocculant, d'autre part celle du sable. Le rapport entre ces deux chiffres représente, par définition, l'équivalent de sable du matériau étudié.

### **3- Appareillage :**

- 3 éprouvettes cylindriques graduées (32mm de diamètre, 430mm de hauteur).
- Un réservoir de 5 litres contenant la solution flocculante.
- Un tube laveur relié au réservoir par un tuyau de caoutchouc.
- Un piston taré.
- Une boîte de mesure de 88 cm<sup>3</sup>.
- Eventuel, un agitateur mécanique.

### **4- Mode opératoire:**

- Tamiser l'échantillon.
- Préparation des échantillons.
- Verser la solution lavante dans l'éprouvette.
- Laisser reposer 10min.
- Boucher l'éprouvette et fixer sur la machine.
- Faire subir à l'éprouvette 90cycles en 30s.
- Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table.

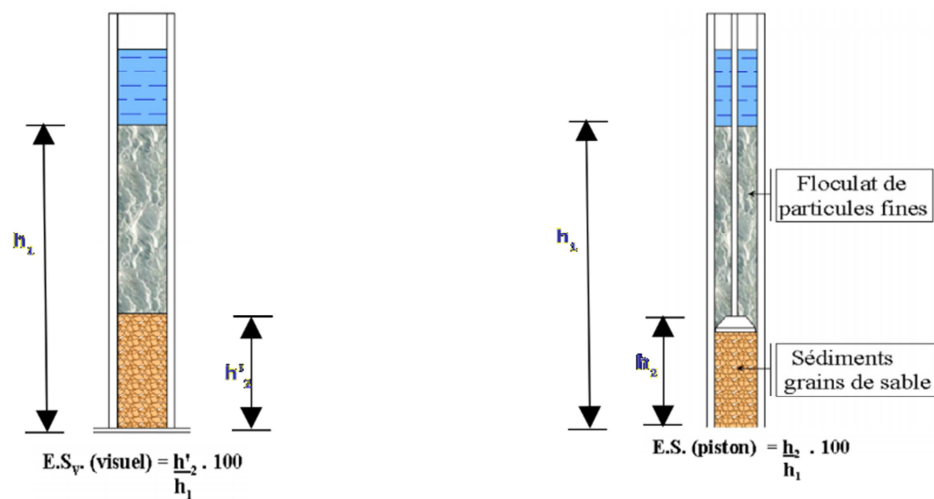
### **5- Résultats :**

L'équivalent de sable se calcul avec la formule suivante :

$$E_S = 100 * \frac{h_2}{h_1}$$

Avec :            h<sub>2</sub> : la hauteur du sable.  
                      h<sub>1</sub> : la hauteur du flocculant

**Remarque :** A noter qu'il y a lieu de calculer un équivalent de sable visuel et un autre au piston tel que indiqué sur la Figure I.10.



**Figure I.10 :** Détermination de *Es* par la méthode visuelle et la méthode du piston

Une classification est proposée par le tableau ci dessous :

**Tableau I.1 :** Qualité du sable en fonction de l'équivalent de sable

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
$ES < 65\%$	$ES < 60\%$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
$65\% \leq ES < 75\%$	$60\% \leq ES < 70\%$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
$75\% \leq ES < 85\%$	$70\% \leq ES < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$ES \geq 85\%$	$ES \geq 80\%$	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.



**TP N° 8**  
**ESSAI ÉQUIVALENT DE SABLE**

Groupe :  
 Lieu de prélèvement  
 Couleur :  
 Nature :  
 Date de l'essai :

**Équivalent de sable visuel**

<b>Essai</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>La hauteur <math>h_1</math> (cm)</b>				
<b>La hauteur <math>h_2</math> (cm)</b>				
<b>ESV</b>				
<b>ESVmoy</b>				

**Équivalent de sable par piston**

<b>Essai</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>La hauteur <math>h_1</math> (cm)</b>				
<b>La hauteur <math>h_2</math> (cm)</b>				
<b>ESP</b>				
<b>ESPmoy</b>				

## **1.7 Essai de perméabilité : (NF x30-442)**

### **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).

### **2- But et principe de l'essai :**

Le but est la détermination du coefficient de perméabilité  $K$ . Comme déjà cité, au laboratoire, deux méthodes qui sont des applications directes de la loi de DARCY sont largement utilisées, à savoir:

- 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).

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 (à charge constante) ou sous une pression d'injection variable (à charge variable).

### **3- Méthode du perméamètre à charge variable**

L'essai de perméabilité à charge variable montré sur la figure I.11, convient aux sols très perméables comme les sables. Cet essai doit satisfaire aux conditions suivantes:

- L'échantillon doit contenir des particules  $< 80$  mm au plus égal à 10% et des particules  $> 20$  mm = 0 %
- L'écoulement d'eau à travers l'échantillon de sol est laminaire et permanent, de telle sorte que la vitesse d'écoulement de l'eau reste proportionnelle au gradient hydraulique;
- L'échantillon de sol est saturé et ne subit pas de changement de volume durant l'essai - La perte de charge ( $\Delta h$ ) demeure constante. Une perte de charge constante  $\Delta h$  provoque l'écoulement de l'eau à travers l'échantillon de sol. On mesure le débit d'eau  $q$  en recueillant un volume d'eau  $V$  en un temps  $t$ . Connaissant la longueur de l'échantillon  $L$  et la surface  $S$  à travers laquelle l'eau s'écoule. On peut calculer le coefficient de perméabilité  $K$ .

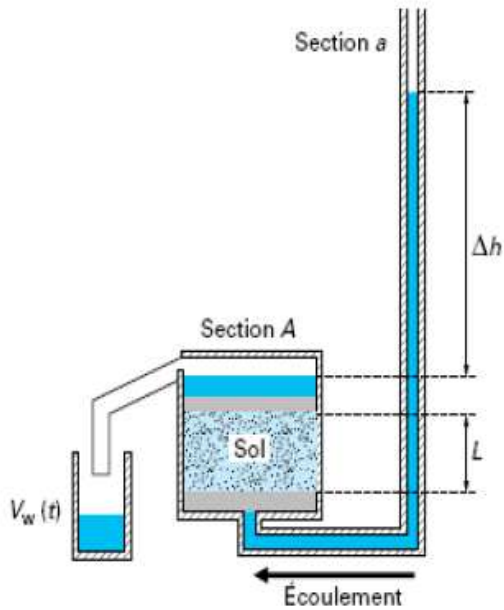


Figure I.11. Perméamètre à charge variable.

$$k = 2,3 \frac{a}{A} \frac{l}{T} \lg \frac{h_1}{h_2}$$

- A : Section de l'échantillon
- a : Section du tube
- T : Temps d'écoulement
- l : Hauteur de l'échantillon
- h<sub>1</sub> : Charge hydraulique à l'instant t<sub>1</sub>

**4- Méthode du perméamètre à charge constante:**

Pour les sols peu perméables comme les sols siliceux et argileux,

$$k = \frac{V \cdot L}{T \cdot H \cdot S}$$

- S : Section de l'échantillon
- T : Temps d'écoulement
- L : Hauteur de l'échantillon
- H :Perte de charge
- V :Volume d'eau écoulé

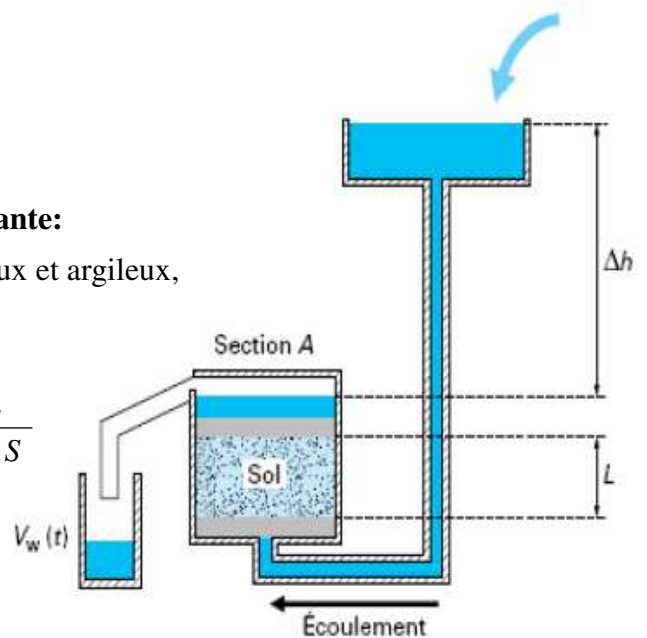


Figure I.12 :Perméamètre à charge constante

## **5- Matériel utilisé :**

- Un perméamètre de compactage avec accessoires : un tube de verre fermé en Bas avec un robinet, et des tubes.
- Un panneau de tubes Piézométriques à différents niveaux.
- Un support de perméamètre avec accessoires.
- Chronomètre : pour déterminer le temps d'écoulement.
- L'échantillon de sol.
- Un réservoir d'eau.
- Une éprouvette graduée.

## **6- Mode opératoire :**

### ***Pour un essai à charge variable :***

- Placer le perméamètre près du panneau: le niveau du couvercle supérieur du perméamètre doit correspondre au niveau 0 du réglet du panneau. (Ceci permet de déterminer facilement la charge hydraulique à laquelle est soumis l'échantillon de sol).
- Choisir le tube piézométrique adapté. Ce choix est fonction de la perméabilité du sol plus le sol perméable, plus on utilise un tube piézométrique de faible diamètre.
- Ouvrir les robinets du réservoir d'eau, du panneau et du perméamètre. L'eau s'écoule alors dans le tube piézométrique puis dans l'échantillon. Lorsqu'un régime permanent s'établit à la sortie du perméamètre, on peut considérer que l'échantillon est saturé.
- Fermer le robinet du réservoir d'eau, puis attendre que le niveau de l'eau dans le tube piézométrique soit proche de niveau 100 du réglet.
- Lorsque ce niveau est atteint. Fermer les robinets du panneau et du perméamètre. Le niveau de l'eau dans le tube piézométrique ne doit plus alors bouger et l'eau ne doit plus sortir du perméamètre.

### ***Pour un essai à charge constante :***

- Ouvrir les robinets du panneau et du perméamètre, déclencher aussitôt le chronomètre.
- Alimenter le perméamètre de manière à y maintenir la charge hydraulique constante (le niveau de l'eau).
- Après quelques minutes, stopper le chronomètre et mesurer le volume de l'eau ayant traversé l'échantillon.

**TP N° 9**

**ESSAI DE PERMÉABILITÉ**

- A Charge variable
- A Charge constante

Groupe :  
 Échantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

**Charge variable**

<b>Essai</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>t<sub>1</sub>(s)</b>				
<b>t<sub>2</sub>(s)</b>				
<b>h<sub>1</sub> (cm)</b>				
<b>h<sub>2</sub>(cm)</b>				
<b>K(cm/s)</b>				
<b>K moy(cm/s)</b>				

**Charge Constante**

<b>Essai</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>V( cm<sup>3</sup>)</b>				
<b>T (s)</b>				
<b>K(cm/s)</b>				
<b>K moy(cm/s)</b>				

## 2 Essais chimiques :

### 2.1 Évaluation de la teneur en Carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) (NF P 94-048)

#### 1- Définition :

La teneur en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  d'un sol est déterminée par attaque à l'acide chlorhydrique d'une certaine quantité du sol sec. La mesure de la quantité de gaz carbonique dégagé permet de calculer la masse de carbonate de calcium dissoute et donc la teneur en carbonates de calcium du sol  $\text{CaCO}_3$ , exprimée en pourcentage de la masse de la phase solide du sol.

#### 2-Appareillage utilisé :

- Calcimètre Dietrich-Fruhling,
- Hcl,
- Burette de  $10 \text{ cm}^3$
- Balance de précision 1/100g ,
- Tamis 0.2 mm.

#### 3- Mode opératoire:

- L'échantillon séché tamisé au 0.2 mm est versé dans un flacon auquel on introduit une burette contenant  $10 \text{ cm}^3$  de Hcl.
- On ferme l'ensemble grâce à un bouchon relié à un calcimètre et on prend la lecture initiale correspondant au volume d'air du flacon.
- Après agitation de l'ensemble (échantillon + acide), on prend la lecture finale.
- On procède de la même manière en remplaçant l'échantillon sec par 0.5g de carbonate de calcium.



Figure I.13 : Appareillage utilisé.

#### 4- Expression des résultats:

La teneur en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  est déterminée à partir de la formule suivante :

$$\text{CaCO}_3(\%) = \frac{\text{volume du CO}_2 \text{ dégagé par } 0,5\text{g d'échantillon}}{\text{volume du CO}_2 \text{ dégagé par } 0,5\text{g de CaCO}_3 \text{ pur}}$$

**TP N° 10**

**ESSAI DE DE LA TENEUR EN CARBONATE**



Groupe :  
 Echantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

<b>Echantillon</b>	<b>N° d'essai</b>	<b>Lecture initiale</b>	<b>Lecture finale</b>	<b>Différence</b>	<b>T°C</b>	<b>Teneur en <math>C_aCO_3</math></b>	<b>Moyenne</b>

## 2.2 Essai de bleu de méthylène (NF P 94-048) (ASTM C.131.55)

### 1- Définition :

La structure des argiles leur confère un ensemble de réactions lié à l'eau, ces réactions sont appelées ACTIVITÉS. Ces activités ont pour effet les phénomènes:

- de gonflement
- de plasticité
- de cohésion constaté sur ces sols.

L'essai au bleu de méthylène permet d'observer la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans un sol. Pour ce faire, on fixe, sur les grains d'argile des molécules de bleu de méthylène et par un test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur de bleu du sol, ou  $V_B$  ; qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés par les travaux de terrassement.

### 2- Principe :

Le principe de l'essai consiste à maintenir en permanence sous agitation un mélange [échantillon (O/d) + eau] puis à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène par doses successives, jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées, il apparaît alors un excès qui marque la fin de l'essai et qui est détecté par le test de la tâche. Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension sur du papier filtre normalisé, une tache qui est un dépôt de sol coloré en bleu, entouré d'une zone humide incolore. L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair. Le test est alors positif

L'essai au bleu permet une évaluation globale de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse :

$$V_B = \frac{\text{nombre de cm}^3 \text{ de solution}}{\text{Poids sec de la prise}}$$

$V_B$  : Valeur du bleu

Connaissant la valeur du bleu déterminée sur l'une des fractions les plus fines O/d, on peut calculer celle de la fraction globale O/d à partir de la courbe granulométrique du sol.

$$V_B = (O/d) = V_B (O/d) \times P/100$$

$P$  : proportion de la classe granulaire O/d dans le sol O/d.

Ensuite, on peut calculer la valeur du bleu pour les éléments inférieurs à  $< 2\mu\text{m}$  :

$$V_B (< 2\mu) = \frac{V_B(O/d)}{(<2\mu)}$$

Le tableau I.2 présente une classification des sols selon la valeur du bleu calculée



**Tableau I.2 : Valeur de bleu de quelques sols**

<b>VB (%)</b>	<b>Sols</b>
0,1	Sols insensibles à l'eau.
0,2	Apparition de la sensibilité à l'eau.
1,5	Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols argileux.
2,5	Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne.
6	Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.
>8	Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Un autre paramètre peut être déduit à travers cet essai, il s'agit de la surface spécifique totale qui est la surface des grains solides sur laquelle le bleu de méthylène se fixe. Elle est donnée par :

$$\text{S.S.T.} = (V_B / 100) \times (N / 373) \times 130 \cdot 10^{-20}$$

$$\Rightarrow \text{S.S.T.} = 21 V_B \text{ (m}^2\text{/g)}$$

$V_B / 100$  : fraction en % du bleu ( $< 2\mu$ )

$N$  : nombre d'Avogadro =  $6.023 \cdot 10^{+23}$

373 : masse moléculaire du bleu de méthylène en gramme

$130 \cdot 10^{-20}$  : surface en  $\text{cm}^2$  d'une molécule d'eau

**Tableau I.3 : SST de quelques argiles d'après Grim (cité par Lautrin 1987).**

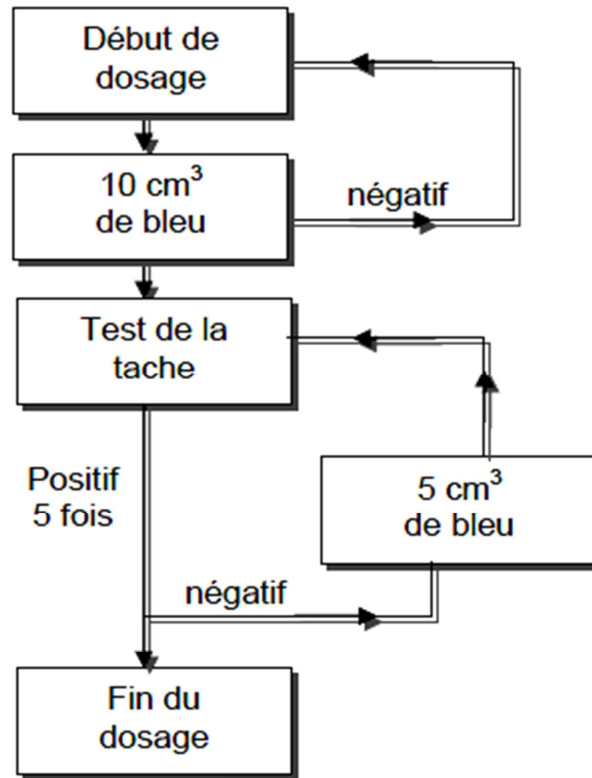
<b>Argile</b>	<b>Surface spécifique totale (m<sup>2</sup>/g)</b>
<b>Montmorillonites</b>	
Ca <sup>++</sup>	300
Na <sup>+</sup>	800
<b>Illite</b>	40-60
<b>Kaolinite</b>	5-20
<b>Eléments non argileux</b>	1-3

### 3- Matériels utilisés :

- Papier filtre.
- Burette.
- Agitateur mécanique à ailettes.
- Bécher.
- Chronomètre.
- Balance.
- Baguette en verre.
- Solution de 10% de bleu de méthylène.

#### 4- Mode opératoire :

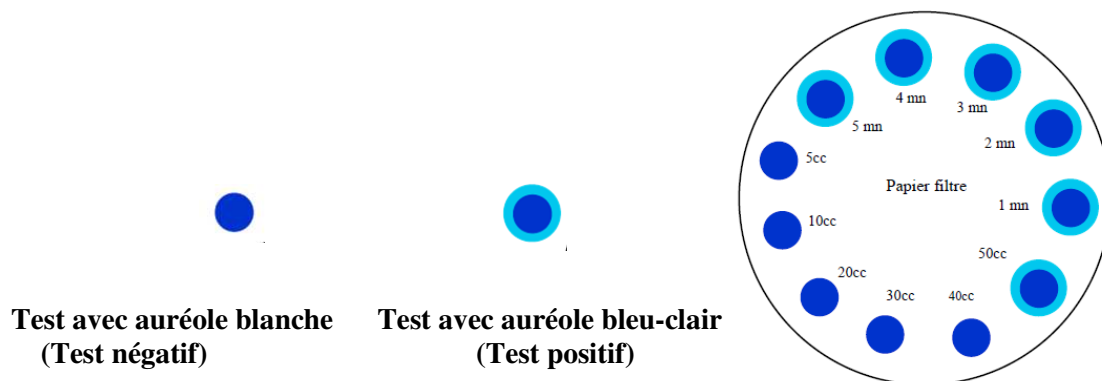
Le mode opératoire consiste à suivre les étapes illustrées sur l'organigramme suivant :



*Figure I.14 :Schéma de dosage de l'essai de bleu*



*Figure I.15: Appareillage utilisé pour l'essai au bleu*



*Figure I.16 : Test de la tache*

**TP N° 11**

**ESSAI DE BLEU DE MÉTHYLÈNE**

Groupe :  
Échantillon :  
Couleur :  
Nature :  
Provenance :  
Date de l'essai :

<b>Nature de l'échantillon</b>	<b>Masse du sol (g)</b>	<b>Volume du bleu de méthylène (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Valeur au bleu VB</b>	<b>Surface spécifique totale SST (m<sup>2</sup>/g)</b>
Grenu				
Fin				

### 3 Essais mécaniques

#### 3.1 Essai Proctor : (NF P94-093)

##### 1- Principe de la méthode :

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe ( $\gamma_d; w$ ) ; on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée est la densité sèche maximale.

L'ensemble de la surface doit être compactée pour chaque couche comme suit :

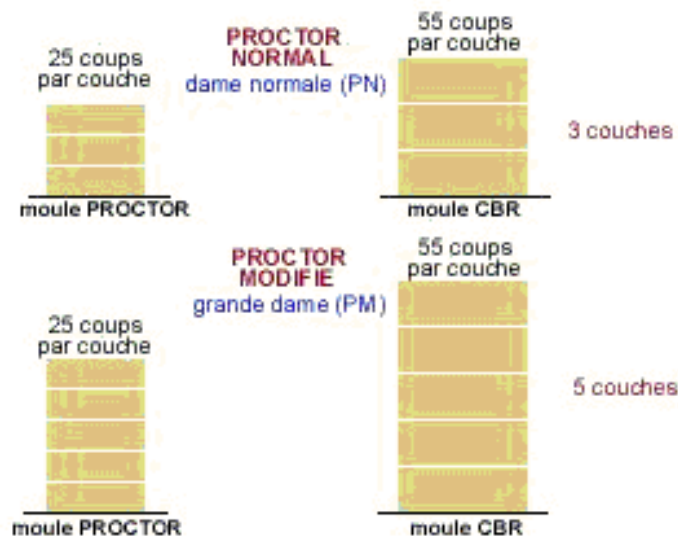


Figure I.17 : Modalité de compactage selon le type et les moules

##### 2- Mode opératoire:

1. Assembler moule + embase + disque d'espacement (si moule C.B.R.) + disque de papier au fond du moule (facilite le démoulage) ; puis :
  - Peser l'ensemble : soit  $P_1$ ,
  - Adapter la rehausse.
2. Introduire la 1ère couche et la compacter. Placer le moule sur un socle en béton d'au moins 100 kg , ou sur un plancher en béton de 25 cm d'épaisseur, pour que l'ensemble de l'énergie soit appliquée à l'échantillon. Astuces : faire des rayures sur la surface compactée (améliore la liaison avec la couche suivante),

- Recommencer l'opération pour chaque couche (3 pour énergie de compactage Normal ; 5 pour énergie Modifiée). La quantité de matériau à utiliser, pour chaque couche, est approximativement donnée par le tableau ci dessous:

**Tableau I.4 : Quantité du matériau à considérer pour chaque couche**

MOULE	ESSAI PROCTOR NORMAL	ESSAI PROCTOR MODIFIE
PROCTOR	400 g	650 g
C.B.R.	1 050 g	1 700 g

- Après compactage de la dernière couche, enlever la rehausse. Le sol compacté doit dépasser le moule de 1 cm environ. Sinon, recommencer l'essai,
- Araser soigneusement à partir du centre ; on veillera, au cours de l'arasement à ne pas créer de trous sur la surface arasée,
- Peser l'ensemble juste arasé : soit  $P_2$ ,
- Oter l'embase (et disque d'espacement si nécessaire) et prélever 2 prises sur l'échantillon, l'une en haut et l'autre en bas ; en déterminer la teneur en eau  $\omega$  ; on prendra la moyenne des deux valeurs obtenues,
- Augmenter de 2% la teneur en eau  $\omega$  de votre échantillon de départ et recommencer 5 à 6 fois l'essai, après avoir à chaque fois bien nettoyer votre moule.

\* A noter que pour le moule :

- Moule PROCTOR : 2%  $\Rightarrow$  environ 50 g d'eau pour 2 500 g de sol,
- Moule C.B.R. : 2%  $\Rightarrow$  environ 110 g d'eau pour 5 500 g de sol.

Pour ces essais on peut utiliser, selon la finesse des grains du sol, deux types de moules :

- Le moule Proctor  $\varnothing_{\text{moule intérieur}} = 101,6 \text{ mm} / H = 117 \text{ mm}$  (sans rehausse)  $\Rightarrow V_{\text{mouleproctor}} = 948 \text{ cm}^3$
- Le moule CBR  $\varnothing_{\text{moule}} = 152 \text{ mm} / H = 152 \text{ mm}$  (sans rehausse) dont disque d'espacement de 25,4 mm d'épaisseur, soit:  
une hauteur  $H_{\text{utile}} = 126,6 \text{ mm} \Rightarrow V_{\text{mouleCBR}} = 2\,296 \text{ cm}^3$

Avec chacun de ces moules, on peut effectuer deux types d'essai (choix par rapport à l'énergie de compactage) :

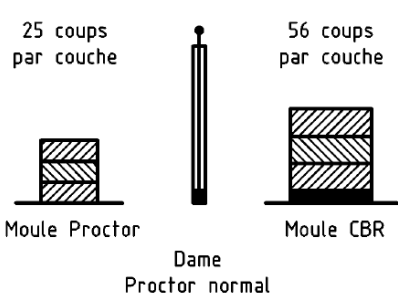
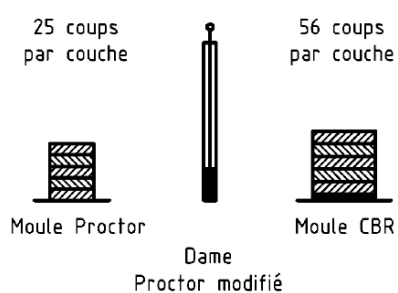
- L'essai PROCTOR NORMAL,
- L'essai PROCTOR MODIFIE.

Le choix de l'intensité de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie :

- Essai Proctor normal : Résistance souhaitée relativement faible, du type **remblai non ou peu chargé**,
- Essai Proctor modifié : Forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière.

Le tableau ci-dessous résume les conditions de chaque essai selon le moule retenu .

**Tableau I.5 : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié**

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p>3 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche      56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor      Dame Proctor normal      Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p>5 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche      56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor      Dame Proctor modifié      Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

### 3- Expression et exploitation des résultats:

Tracer la courbe  $\gamma_d = f(w)$ , La figure I.18 donne une courbe typique de compactage

En cas d'écraîtement à 20 cm, faire les corrections suivantes :

\* déterminer  $\gamma = (\text{Poids des gros éléments ( } D < 20 \text{ mm )}) / (\text{Poids total ( éléments fins et gros )})$ ,

$$* W_{\text{corrigée}} = W_{\text{mesurée}} * (1 - \gamma)$$

$$* \gamma_{d\text{corrigée}} = \gamma_{d\text{mesurée}} * 1 / K \quad \text{avec } K = 1 - \gamma * (\gamma_s - \gamma_{d\text{mesurée}}) / \gamma_{d\text{mesurée}}$$

### Courbes de saturation :

Les courbes de saturation sont presque asymptotiques aux courbes de compactage.  
L'équation de la courbe de saturation s'établit comme ci-dessous

$$\gamma_d = \frac{S_r \cdot \gamma_s}{S_r + \omega \cdot \gamma_s}$$

$$G_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$$

Avec :  $S_r$  : degré de saturation

$\gamma_s$  : poids spécifique des grains solides

$\omega$  : Teneur en eau

$G_d$  : densité sèche

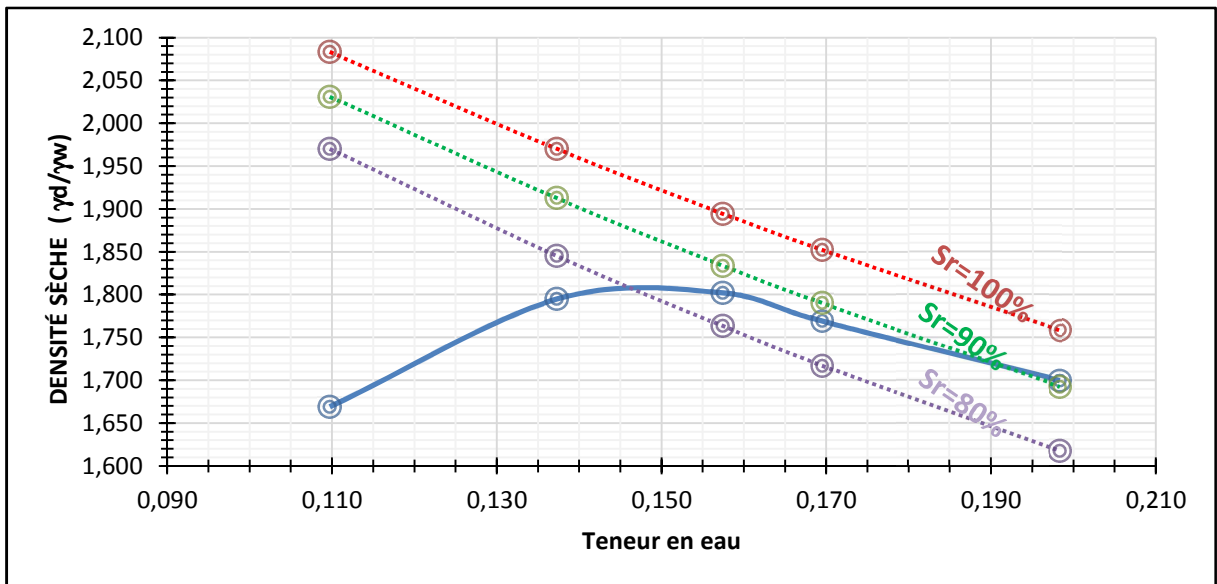


Figure I.18 : Courbe typique de compactage



**TP N° 12**

**ESSAI PROCTOR**

Groupe :  
 Échantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

Volume du moule =  $\text{cm}^3$

% d'eau à ajouter		%					
Poids d'eau ajoutée		g					
Poids total humide	$P_{th}$	g					
Poids du moule vide	$P_t$	g					
Poids du sol humide	$P_h = P_{th} - P_t$	g					
Poids Volumique humide	$\gamma_h = P_h / V$	$\text{g/cm}^3$					
Poids Volumique Sec	$\gamma_d = \gamma_h / (1 + \omega)$	$\text{g/cm}^3$					

**Teneur en Eau**

Boîte à pétri		N°					
Poids du moule vide	$P_t$	g					
Poids total humide	$P_{th}$	g					
Poids total sec	$P_{ts}$	g					
Poids d'eau	$P_w = P_{th} - P_{ts}$	g					
Poids du sol sec	$P_s = P_{ts} - P_t$	g					
Teneur en eau	$\omega = P_w / P_s$	%					

Teneur en eau Optimale $\omega_{opt} =$	%	Poids Volumique Sec max. $\gamma_d \text{ max.} =$
---	---	--

### 3.2 Essai CBR (California Bearing Ratio test) :(NF P94-078)

#### 1- But de l'essai :

L'essai CBR est un essai de portance (**aptitude des matériaux à supporter les charges**) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers.

Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants (IPI, CBR) qui permettent :

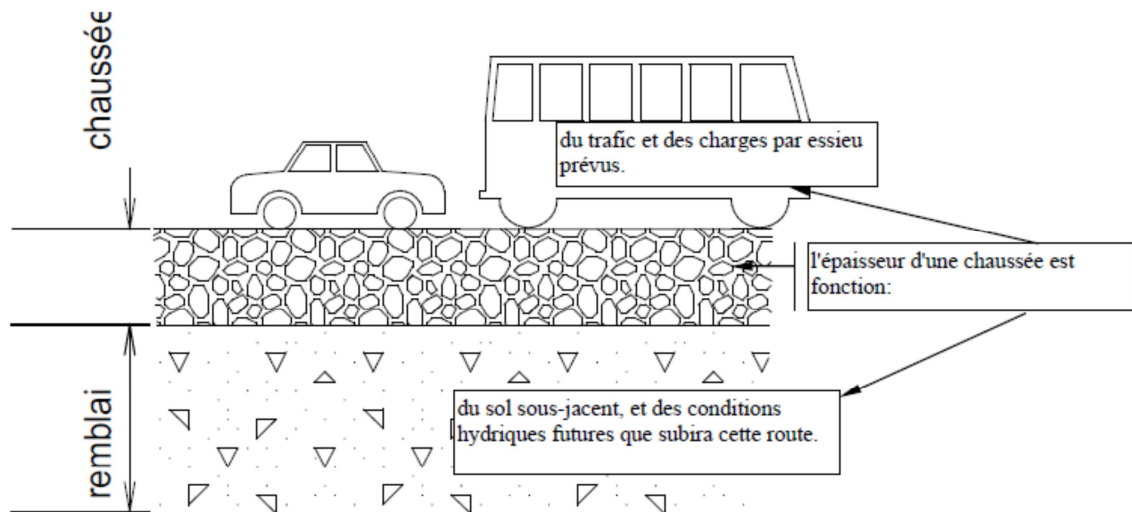
- d'établir une classification des sols (GTR).
- d'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI).
- déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente  $\Rightarrow$  épaisseur diminue)

#### 2- Principe :

La charge apportée par le pneu sur la chaussée poinçonne le sol de fondation. Ce poinçonnement est d'autant plus petit que l'épaisseur de la chaussée est grande.

**P**: pression appliquée par le pneumatique sur le sol de fondation.

**S**: surcharge simulant l'action de la chaussée qui s'oppose au déplacement vertical du sol de fondation lors de l'action du pneu.



*Figure I.19 : Chargement sur une chaussée*

On peut reproduire ce phénomène en compactant le matériau dans les conditions de l'essai **Proctor dans un moule CBR** puis en mesurant les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de ce matériau.

**Nota** : un essai Proctor sera effectué simultanément avec un essai CBR

On lui applique les conditions hydriques prévues pendant la vie de l'ouvrage:

\* **immersion** pendant 4 jours dans de l'eau.

\* pas d'immersion : essai **immédiat**.

On applique ensuite une charge voisine de ce que sera la charge de service et on **poinçonne** le matériau dans des conditions déterminées (vitesse constante et déterminée) tout en mesurant

les efforts (**F**) et les déplacements ( $\Delta h$ ) en résultant: On obtient la **courbe d'essai**(Figure I.22)

\*L'indice recherché est par convention la plus grande de ces deux valeurs.

$$\text{CBR} = \frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en kN)}}{13,35} \times 100$$

$$\text{CBR} = \frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN)}}{20} \times 100$$

On mesure 3 types d'indices en fonction des buts fixés :

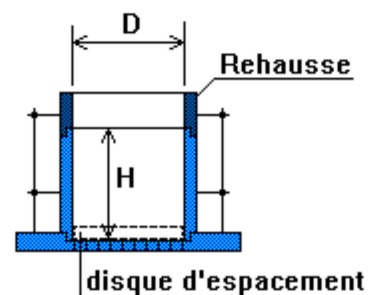
- **l'indice Portant immédiat (IPI):** Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux (**H = 0** ⇒ pas de surcharges S)
- **l'indice C.B.R. immédiat:** Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau .
- **l'indice C.B.R. après immersion:** Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique.

### 3- Préparation du moule :

#### Avant introduction du matériau dans le moule :

- Solidariser la plaque de base et le moule CBR.
- Placer une feuille de papier filtre au fond du moule
- Peser à vide l'ensemble « moule+ plaque de base».
- Déterminer le volume qui sera occupé par l'éprouvette de sol une fois compactée.
- Fixer la rehausse.

**Rappel :** dans le cas d'un essai IPI, le disque d'espacement n'est pas utilisé.



*Figure I.21 : Moule CBR*

### 4- Confection des éprouvettes :

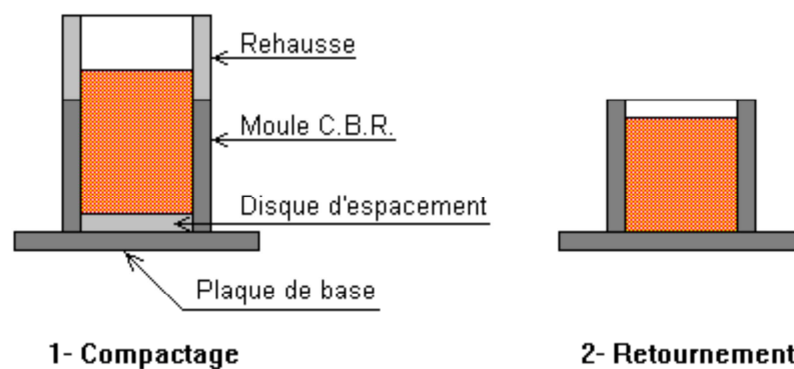
- Le matériau utilisé est un mélange séché à l'air ou dans une étuve. *Homogénéiser le mélange.*
- Diviser le mélange en parts égales de **7kg** environ
- Etaler puis humidifier chacune des parts de votre échantillon à la teneur en eau à laquelle on veut réaliser l'essai puis malaxer à la main pour rendre le mélange le plus homogène possible.

Les quantités approximatives de matériaux à introduire par couche sont représentées sur le tableau ci-dessous.

*Tableau I.6 :Quantité du matériau à considérer pour chaque moule*

Moule	Essai P.M ( 5 couches)
Proctor	400g
CBR	1400g

- Retirer le rehausse puis araser soigneusement l'éprouvette (du centre vers la périphérie)
- Peser au gramme près, l'ensemble « moule, plaque de base et éprouvette de sol ».
- Désolidariser la plaque de base, retourner le moule puis fixer à nouveau la plaque de base.
- Enlever la feuille de papier filtre.
- L'éprouvette est alors prête pour l'essai de poinçonnement.



*Figure I.22 : Eprouvette de sol dans le moule*

### 5- Mode opératoire :

#### **Détermination de l'indice portant immédiat (IPI) :**

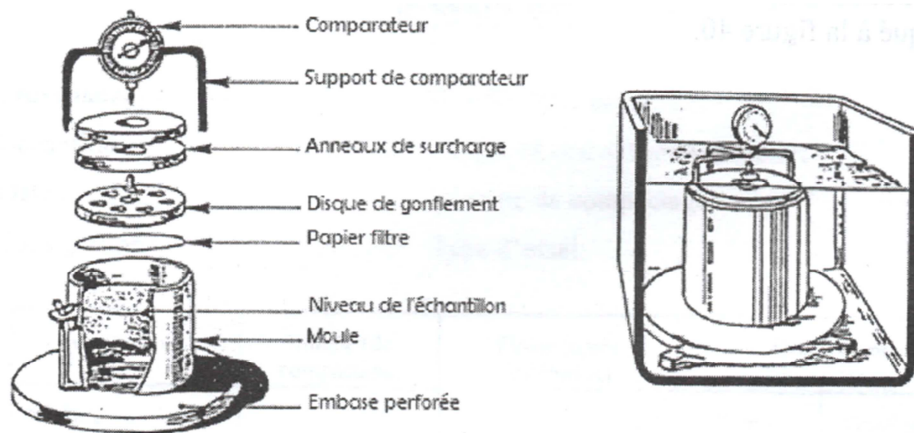
- Placer l'ensemble « plaque de base, moule CBR, éprouvette » sur la presse, en position centrée par rapport au piston.

#### **Détermination de l'indice portant immédiat (ICBR) :**

- Placer l'ensemble moule, plaque de base et deux surcharges (en une pièce au contact de l'échantillon et en deux parties au -dessus) dans le volume libéré par le disque d'espacement à poser sur la presse.

#### **Détermination de l'indice ICBR après immersion :**

- Placer l'ensemble moule, plaque de base, papier filtre disque de gonflement, trépied, support de comparateur fixé sur le bord du moule, le tout dans un bac d'immersion durant 4jours ; la valeur du gonflement est donnée par le comparateur (figure I.23).



**Figure I.23 : Immersion d'une éprouvette**

**- Exécution du poinçonnement :**

- Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston jusqu'à ce qu'il vienne affleurer le matériau (*stopper dès que l'aiguille de l'anneau accuse un léger déplacement*).
- Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon.
- Exécuter le poinçonnement à vitesse constante
- Noter les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements de **0,625 - 1,25 - 2 - 2,5 - 5 - 7,5** et **10 mm** et arrêter le poinçonnement à cette valeur.

- Faire une mesure de la teneur en eau au voisinage de la zone poinçonnée et immédiatement après l'essai (au moins 2 prélèvements à gauche et à droite).

- Reporter sur un graphe *effort -déformation* les valeurs de poinçonnement mesurées pour les enfoncements prévus.

**NOTA :** Si la courbe présente une concavité vers le haut au démarrage, il y a lieu de corriger l'origine de l'échelle des enfoncements.



**Figure I.25: Matériels de compactage et accessoires CBR et Presse CBR (poinçonnement en cours)**

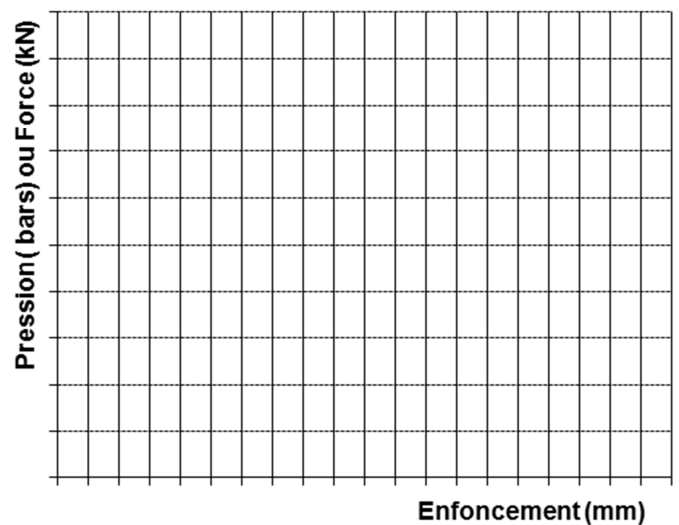
**TP N° 13**  
**ESSAI CBR**

Groupe :  
 Echantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

ETAT INITIAL				ETAT FINAL		
Moule	N°			IMBIBITION / NON	NORMALE	COMPLETE
Poids total humide	$P_{th}$	g		Date de mise en immersion ;		Durée
Poids du moule vide	$P_t$	g		Teneur en eau après imbibition : $\omega_f =$ %		
Poids du sol humide	$P_h = P_{th} - P_t$	g		Gonflement		Gonflement linéaire absolue
Poids Volumique humide	$\gamma_h = P_h / V$	$g/cm^3$		Date,		$\Delta f =$ mm
				Heure		
Poids Volumique Sec	$\gamma_d = \gamma_h / (1 + \omega)$	$g/cm^3$		Gonflement linéaire relatif : $\Delta f / l =$		

**POINCONNEMENT**

Temps approximatif		Enfoncement	Force F	Pression P
mn	s	mm	kN	bars
0'	30''	0,625		
1'		1,25		
1'	40''	2		
2'		2,5		
4		5		
6		7,5		
8		10		
10		12,5		

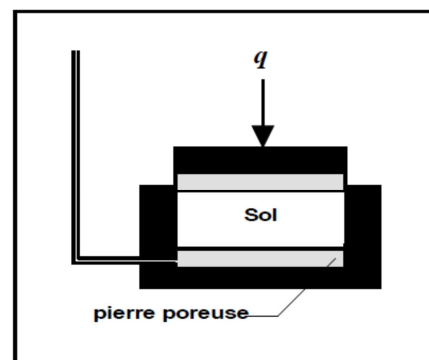


$$\frac{P(2,5)}{0,70} = \frac{P(5)}{1,05} = \frac{F(2,5)}{13,35} = \frac{F(5)}{20} = \text{INDICE PORTLAND CBR} = \%$$

### 3.3 Essai de compressibilité et de consolidation à l'œdomètre (NF P94-090-1)

#### 1- Principe de l'essai œdométrique :

Un petit échantillon de sol (intact ou remanié selon ce que l'on étudie) est soumis à une contrainte verticale  $q$ . Deux pierres poreuses permettent à l'eau d'être expulsée. Le principe de l'essai consiste à mesurer la variation de hauteur de l'éprouvette de sol pendant l'application de la charge (figure 1.26).



*Figure 1.26 : Schéma de la cellule et de l'appareil œdométrique*

#### 2- Etude théorique :

##### 1- Cas des sols grenus :

- Aux contraintes faibles, le comportement est irréversible (réarrangement des grains).
- Aux contraintes élevées, le comportement est élastique (compression des grains).
- Aux contraintes très élevées, les grains peuvent s'écraser.

Un sol grenu serré est donc très peu compressible. Le tassement d'un sol grenu est quasi simultané à l'application de la charge et ne dépend pas de sa teneur en eau.

##### 2- Cas des sols fins saturés:

L'essai œdométrique est interprété à l'aide de deux graphiques, présentés ci-après

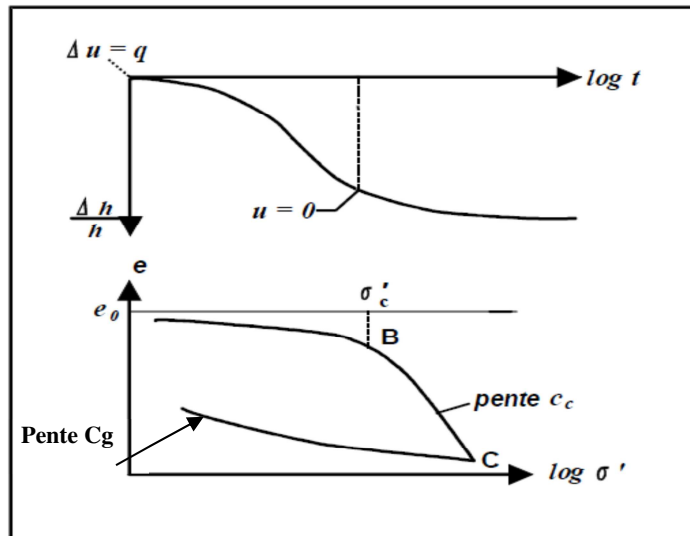


Figure I.27 : Interprétation de l'essai oedométrique

## 2.1 – La compressibilité (Evolution du tassement en fonction de la résistance) :

En pratique, une première contrainte est appliquée pendant 24 heures, puis augmentée progressivement toujours par paliers de 24 heures. Les points obtenus donnent la branche supérieure de la courbe ( $e - s'$ ). Au-delà d'une certaine contrainte, les contraintes appliquées à l'échantillon sont diminuées par paliers de 24 heures, permettant de représenter la branche inférieure de la courbe ( $e - s'$ ) (Voir figure 1.28, graphique du bas).

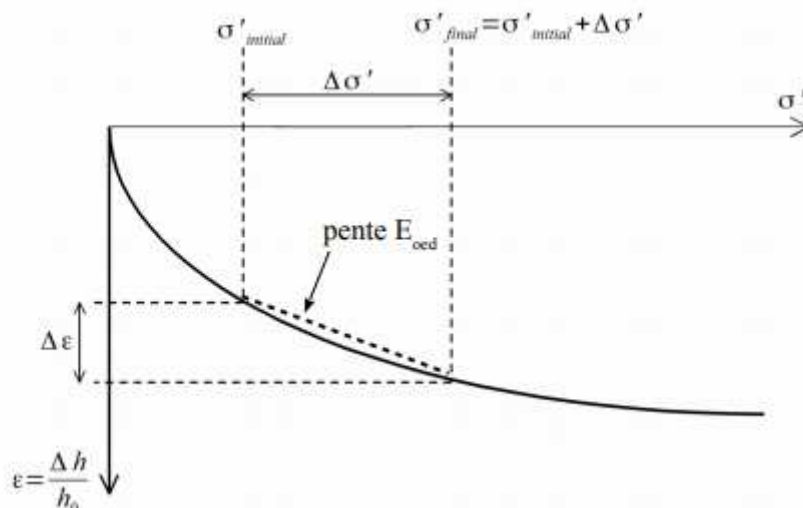


Figure I.28 : Courbe contrainte déformation

## 2.2 – La consolidation (Rôle du temps) :

Pour une contrainte  $s'$  donnée, inchangée pendant le palier considéré, on représente la courbe de consolidation donnant le tassement en fonction du temps (figure 1.28, graphique du haut). Lors de l'application de la charge  $q$  (à  $t = 0$ ), le volume ne varie pas et l'eau interstitielle reprend toute la surpression ( $\Delta u = q$ ,  $\Delta \sigma' = 0$ ), car la compressibilité de l'eau est très largement inférieure à celle de l'assemblage des grains. Il y a ensuite drainage c'est à dire



expulsion d'eau ; la contrainte effective augmente ( $\Delta\sigma' > 0$ ) et la pression interstitielle  $u$  diminue. L'eau en s'évacuant permet aux grains de se rapprocher ; *c'est le tassement*. Le drainage s'arrête lorsque  $u = 0$  (donc  $\Delta\sigma' = q$ ). Cette phase de dissipation des pressions interstitielles s'appelle *la consolidation*. Elle est d'autant plus lente que le sol est imperméable. Lorsque  $u=0$ , le sol est dit *consolidé*.

### 3-Paramètres obtenus à partir de l'essai oedométrique

#### 3.1 - Contrainte de consolidation $\sigma'_c$ (ou $\sigma'_{pc}$ , ou $\sigma'_p$ ) :

Elle correspond au changement de pente sur la branche supérieure du graphique de la figure I.29. Les sols dits *sous-consolidés* sont ceux pour lesquels la contrainte effective verticale est supérieure à  $\sigma'_c$  (exemple : vases récentes). Les sols dits *surconsolidés* sont ceux pour lesquels la contrainte effective verticale est inférieure à  $\sigma'_c$  (exemple : sols anciens érodés). Les sols *normalement consolidés* subissent une contrainte effective verticale de l'ordre de  $\sigma'_c$ .

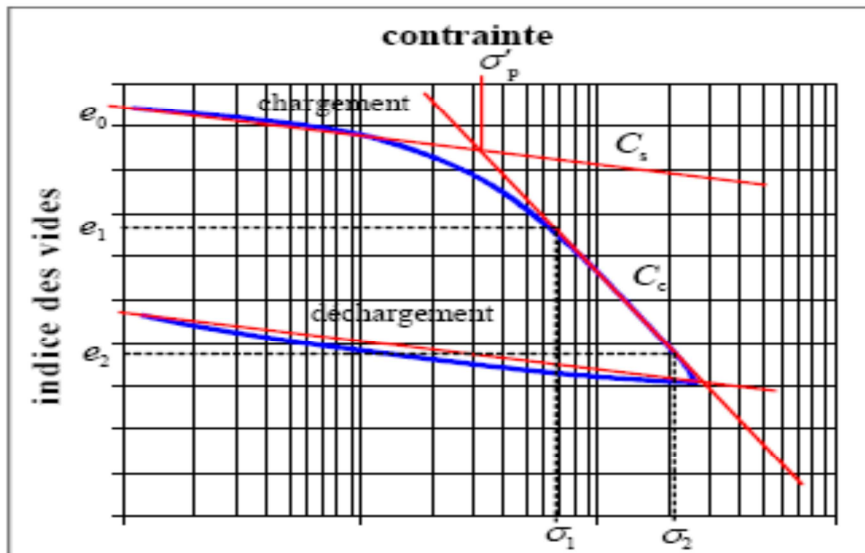


Figure I.29 : Courbe indice des vides en fonction des contraintes

#### 3.2 - Coefficient de compression

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'}$$

Ce coefficient  $c_c$  permet de calculer le tassement total à long terme sous un état de charge donné en considérant que pour des contraintes supérieures à la contrainte de consolidation, la variation  $(e, \log \sigma')$  est linéaire.

#### 3.3 - Coefficient de gonflement

$C_g$  Déterminée sur la branche ascendante de la figure I.29.

### 3.4 - Module oedométrique

$$E_{oed} = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta h/h_0} = (1 + e_0) \frac{\Delta\sigma'}{\Delta e} \text{ (en kPa)}$$

### 3.5 - Coefficient de consolidation

#### \* Méthode de Taylor (Figure I.30)

$$C_v = \frac{T_v.H^2}{t} \text{ (en m}^2\text{/s)}$$

Le coefficient  $c_v$  permet de calculer l'évolution du tassement au cours du temps.

Pour cela on définit comme ci-après le degré de consolidation  $U$ , puis on calcule le facteur temps  $T_v$ .

Avec  $T_v = 0.848$ ,  $U=90\%$  et  $H_{90}=h_{90}/2$ , donc on aura :

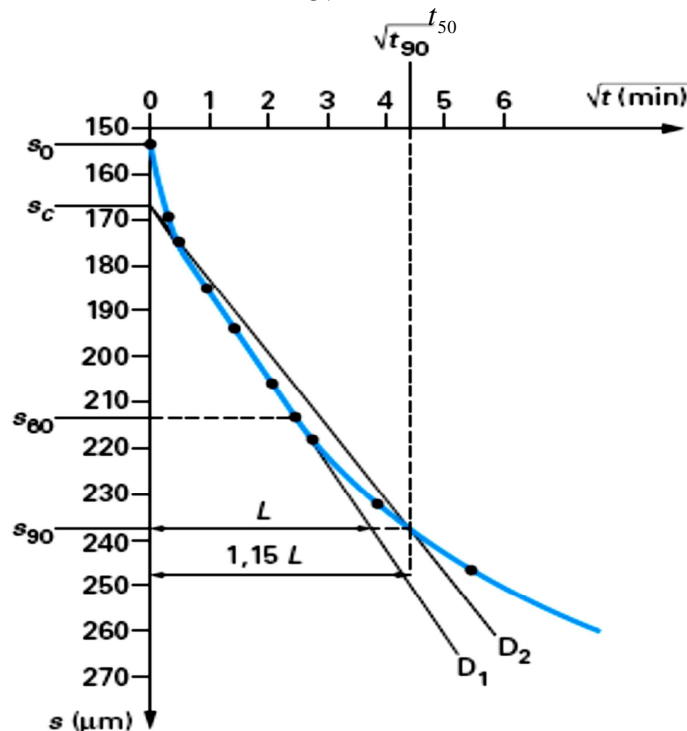
$$C_v = \frac{0,848.H_{90}^2}{t_{90}}$$

#### \* Méthode de Casagrande (Figure I.31) :

$$C_v = \frac{T_v.H^2}{t}$$

Avec  $T_v = 0.197$ ,  $U=50\%$ ,  $H_{50}=h_{50}/2$  et  $h_{50}=(h_0+h_{100})/2$  donc on aura :

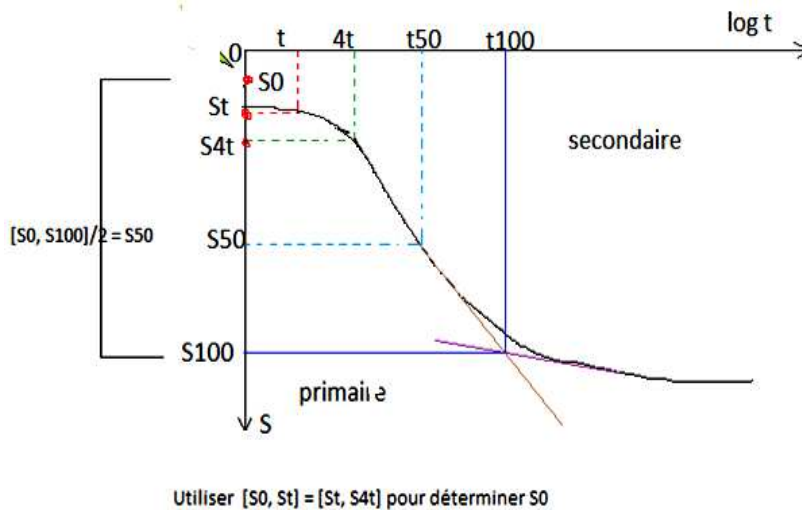
$$C_v = \frac{0,197.H_{50}^2}{\sqrt{t_{90}} \cdot t_{50}}$$



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 I.30 : Détermination de  $C_v$  par la méthode de Taylor (Magnan, 2014)



*Figure I.31 : Détermination de CV par la méthode de Casagrande (Magnan, 2014)*

### Appareillage utilisé :

- Oedomètre
- Pierres poreuses
- Anneau volumétrique
- Comparateur
- Boites à pétri
- Balance de précision
- Étuve ventilée et régulée
- Chronomètre (pour l'essai de consolidation)

### 3- Mode opératoire :

#### Essai de compressibilité

- Prélever un échantillon de sol à l'aide de l'anneau volumétrique
- Mettre l'échantillon ainsi prélevé entre deux pierres poreuses
- Porter à saturation à l'aide du dispositif de l'oedomètre
- Faire le chargement de l'échantillon par paliers de contraintes à l'aide du piston de l'oedomètre.
- Prendre la lecture du comparateur lorsque le tassement est stabilisé.

**Cycle de chargement** (0 ; 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 4 ; 8 ; 16 ; 32 ; 64 bars)

**Cycle de déchargement** (64 ; 32 ; 16 ; 8 ; 4 ; 2 ; 1 ; 0,5. 0,25 ; 0 bars)

#### Essai de consolidation :

- Prendre un échantillon dans l'anneau volumétrique et le saturer.

- Applique une charge constante par exemple  $\sigma = 1 \text{ bar}$ .
- Noter les déformations verticales à l'aide du comparateur en fonction du temps ( voir fiche technique)

**TP N° 14**  
**ESSAI A L'OEDOMETRE**  
**COMPRESSIBILITÉ**

Date de l'essai :  
 Groupe :  
 Sondage :  
 Profondeur :  
 Provenance :  
 Type d'Échantillon :  
 Couleur :  
 Nature :

<u>Avant Essai</u>	<u>Après Essai</u>
Poids total humide P <sub>th</sub> =	g   P <sub>th</sub> = g
Poids total sec P <sub>ts</sub> =	g
Poids de la tare P <sub>t</sub> =	g

Poids (kg)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Lect. Comp Nb. grad	$\Delta h$ (mm)	$\Delta e = \Delta h / h_s$	$e = e_0 - \Delta e$	$E = (1 + e_0) * \Delta \sigma / \Delta (\Delta e)$ (bars)
0	0					
1	0.125					
2	0.25					
4	0.5					
8	1					
16	2					
32	4					
64	8					
32	4					
16	2					
8	1					
4	0.5					
2	0.25					
1	0.125					
0	0					

**N.B :**

1 graduation = 10<sup>-2</sup> mm, Boîte  $\phi$  = 70mm, h<sub>0</sub> = 12 mm, S = 38.485 mm<sup>2</sup>

$$e_0 = h_v / h_s ; h_v = h_0 - h_s$$

$$h_s = \{ h_0 * S - (\Delta h_f * S + V_{wf}) \} / S$$

$$V_{wf} = P_{hf} - P_s / \gamma_w$$

$$\gamma_w = 1 \text{ g / cm}^3$$

**TP N° 15**  
**ESSAI A L'OEDOMETRE**  
**CONSOLIDATION**

Groupe :  
 Échantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

1 graduation =  $10^{-2}$  mm

**$\sigma =$  bars)**

Temps (s)	t (mn)	Lect. Comp Nb. grad	$\sqrt{t}$	Log t	$\Delta h$ (mm)
6					
15					
30					
60					
120					
240					
480					
900					
1800					
3600					

### 3.4 Essai de cisaillement rectiligne à la boîte: (NF P94-71-1)

#### 1- But de l'essai :

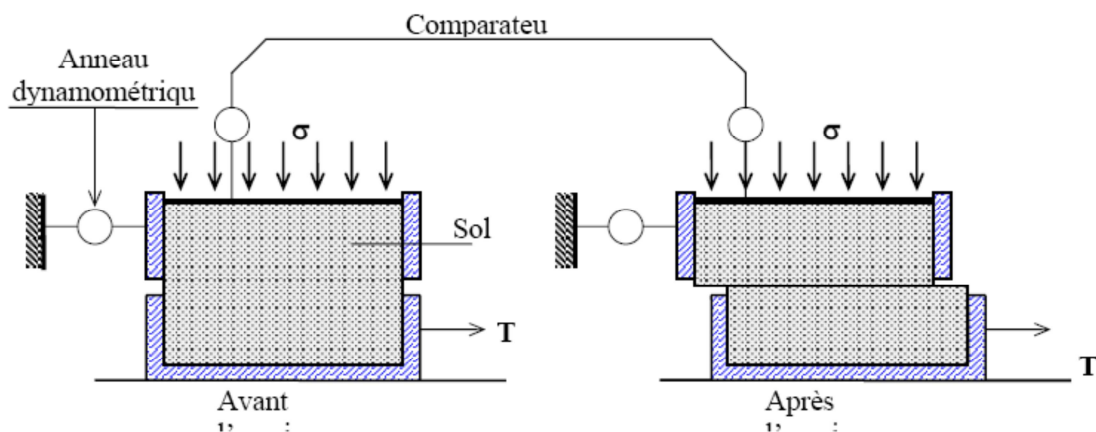
Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante.

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

Ces valeurs servent entre autre à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement.

#### 2- Matériel utilisé :

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  $\sigma$  déterminée (Figure I.32).



*Figure I.32 : Schéma de l'appareil et de la boîte de cisaillement*

La demi - boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement  $F$  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.

### 3- Préparation et déroulement de l'essai :

#### 3.1- Sols utilisés :

**Sol pulvérulent** : Un sable (état lâche ou dense).

**Sol cohérent** : Une argile

#### 3.2- Type d'essai :

Essai non consolidé non drainé (UU)

#### 3.3 - 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 :

- o Pour un sol pulvérulent : **100 - 200 - 300 kPa.**

- o Pour un sol cohérent :

- o UUessai non consolidé, non drainé : **50 - 100 - 200 - 300 kPa**

- Désolidariser les deux demi-boîtes en enlevant les goupilles,

- Mettre en route à la vitesse désirée.

#### 3.4 - Vitesse d'essai :

- Sols pulvérulents : **1 mm / min**

- Sols cohérents :

- o essais non drainés, consolidés ou non (UU ou CU) : **1 mm / min**

- o essai drainé (CD) : vitesse la plus lente

### 4- Calculs et graphes :

- On converti les lectures de l'anneau en KN ou N en utilisant la correspondance suivante :

$$T(\text{KN}) = 1,379 X$$

Avec : X = lecture du comparateur /100

- On détermine la contrainte de cisaillement :  $\tau = T/A$

- On trace ensuite, pour chaque essai, les courbes de contraintes en fonction des déplacements et les tassements en fonction des déplacements, tel que montré sur la figure I.33 (Cas d'un sable dense).



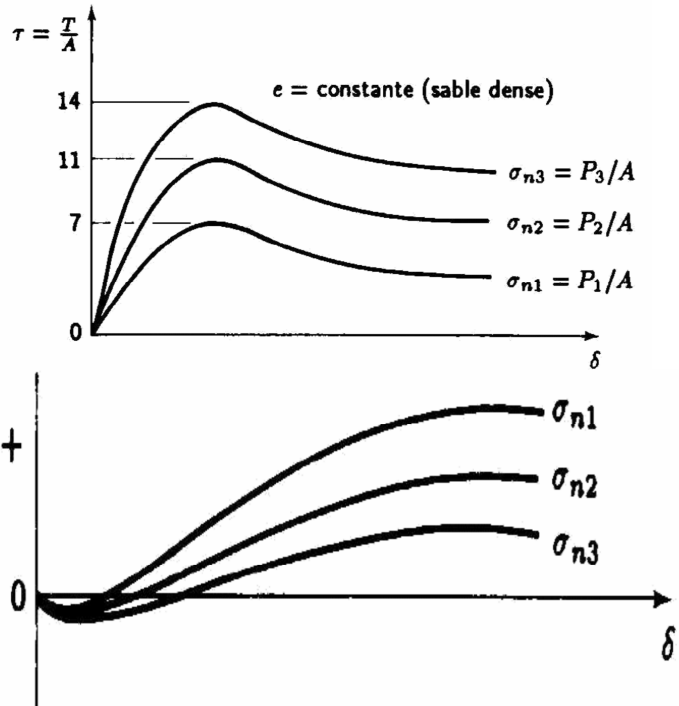


Figure I.33 : Courbes  $\tau = f(\delta l)$  et  $\delta h = f(\delta l)$

- On reporte ensuite chaque point sur un graphique ayant pour abscisse la contrainte normale  $\sigma$  et pour ordonnée la contrainte de cisaillement  $\tau$ , c'est la courbe intrinsèque (figure I.34).

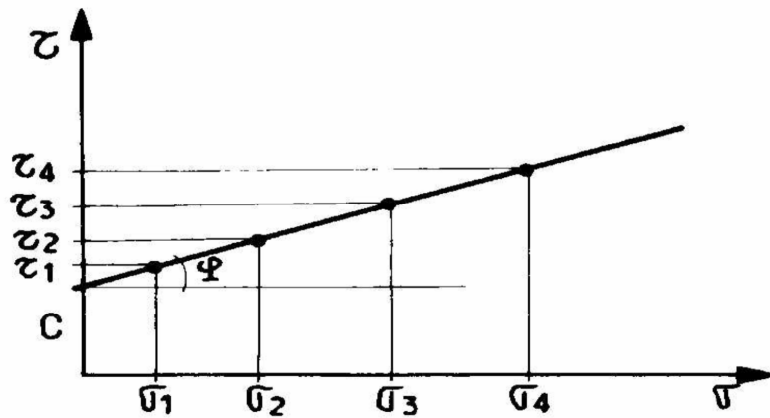


Figure I.34 : Courbe intrinsèque

**TP N° 16**

**ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE**

Groupe :  
 Échantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :

Date de l'essai :

**$\sigma_3 =$**

$\Delta h$ (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	F lue (grad)	F (N)	$\tau$ (kPa)
0				
0.25				
0.5				
1				
1.5				
2				
2.5				
3				
3.5				
4				
4.5				
5				
5.5				
6				
6.5				
7				
7.5				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
18				
18				
19				
20				

### 3.5 Essai de compression triaxiale :( NF P94-074)

#### 1-But de l'essai :

Il est nécessaire de connaître les caractéristiques d'un sol avant toute construction, pour éviter tout risque inutile. Il existe donc plusieurs essais et l'*essai triaxial* est l'un des plus complets, puisqu'il permet de déterminer les caractéristiques mécaniques dans le domaine des petites et des grandes déformations, il est surtout utilisé pour déterminer les caractéristiques de la *résistance* du sol au *cisaillement*, en traçant le cercle de Mohr, déterminer la cohésion du sol et l'angle interne de frottement.

#### 2 – Matériel utilisé :

C'est l'appareil triaxial ( figure I.35). Un échantillon cylindrique de sol est placé dans une cellule contenant de l'eau, dont une membrane étanche le sépare. Par l'intermédiaire de l'eau, une contrainte radiale uniforme et constante  $\sigma_2 = \sigma_3$  est appliquée. Un piston permet d'exercer sur l'échantillon une contrainte axiale  $\sigma_1$  croissante. La connaissance de  $\sigma_1$  à la rupture permet de tracer un cercle de Mohr, généralement celui pour lequel l'extrémité de diamètre  $\sigma_1$  correspond au pic de contrainte. C'est la contrainte principale majeure,  $\sigma_3$  étant la résistance principale mineure.

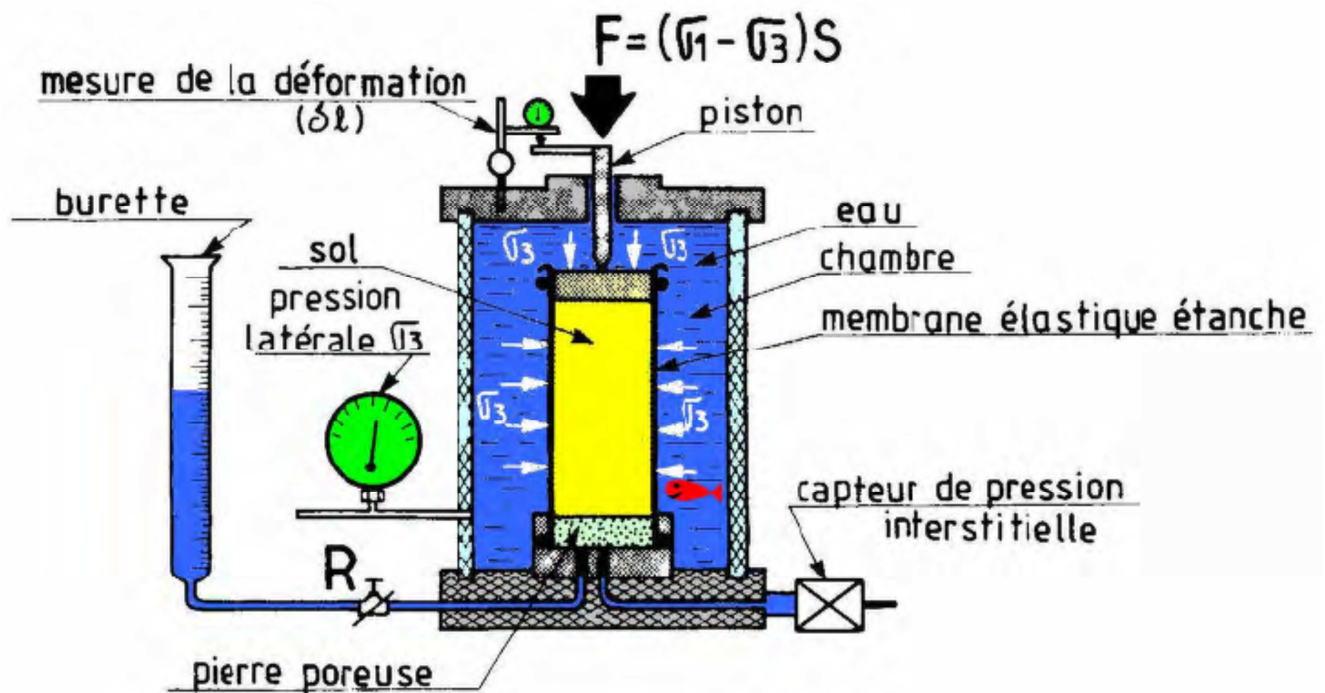


Figure I.35 : Schéma de l'appareil triaxial



Figure I.36 : Appareillage Triaxial.

### 3 – Préparation des échantillons et déroulement de l'essai :

#### 3.1- Sols utilisés :

**Sol cohérent :** Trois ruptures sont en général réalisées, sous différentes valeurs de  $\sigma_3$  avec trois échantillons d'argile réputés identiques (élancement = 2 : diamètre 35mm, hauteur 70mm)

#### 3.2- Montage de l'éprouvette :

- Éprouvette cylindrique de sol dans une gaine élastique étanche et déformable.
- Pierre poreuse.
- Communication avec burette graduée et capteur de pression interstitielle.
- Robinet R : assurer ou non le drainage de l'échantillon.

#### 3.3- Types d'essai :

Essai non consolidé non drainé (UU). Les pressions interstitielles ne se dissipent pas. Cet essai rapide correspond au comportement à court terme. Pendant l'essai, le volume est constant. Cet essai est interprété en contraintes totales et permet d'estimer  $C_u$ , cohésion non drainée et l'angle de frottement interne  $\phi_u$ .

#### 3.4- Déroulement d'un essai UU:

- 1- Application d'une contrainte isotrope  $\sigma_0$  mais orifice de drainage fermé.
- 2- Augmenter la contrainte axiale jusqu'à la rupture (drainage fermé,  $\sigma_0$  ( $\sigma_3$ ) maintenu constant). L'application d'un déviateur engendre des contraintes de cisaillement  $\tau$  non nulles.  
Le déviateur de contraintes s'écrit comme suit :  $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$
- 3- La vitesse de chargement est de : **1mm/min.**
- 4- Réalisation de deux autres essais avec des pressions de confinement supérieures (200 et 300kPa).
- 5- Prendre les lectures du comparateur de force équivalentes aux tassements imposés.

#### 4 – Calculs et graphes :

- Convertir les lectures de l'anneau en utilisant la formule suivante :

$$F = 551,23 X + 19,594 \quad \text{donnée en N}$$

Avec :  $X = \text{lecture du comparateur} / 100$ .

- Déterminer la déformation donnée par  $\epsilon h = \Delta h / h$ .

- Calculer la section corrigée  $A_c$ , avec :  $A_c = A_0 (1 - \Delta v / v_0) / (1 - \Delta h / h_0) = A_0 (1 - \epsilon_v) / (1 - \epsilon_h)$

- Tracer les cercles de Mohr qui devront avoir l'allure donnée par la figure 1.36.

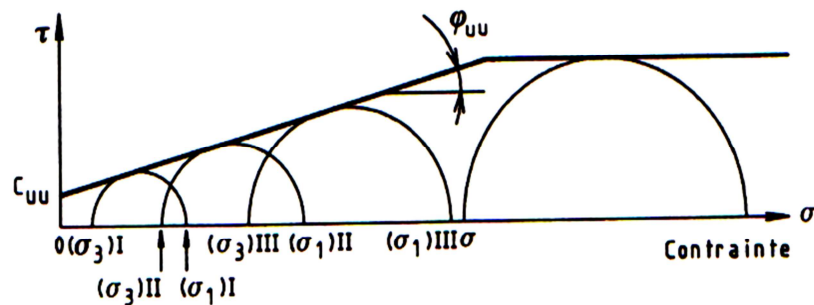


Figure I.36 : Essai non consolidé non drainé sur une argile non saturée.

Tableau I.6 Bilan des essais effectués au laboratoire et de leurs conditions de réalisation

Essai	Consolidation	Drainage	Mesure de $U$	Résultats	Type d'essai
Triaxial	UU	Non	Non	$\phi_{uu} ; C_{uu}$ ou $C_u$ ( $\phi=0$ )	Non consolidé non drainé
	CU	Oui	Non	$\lambda_{cu} ; C_{uo}$	Consolidé non drainé
		Oui	Non	Oui	$\phi' ; C'$ $\lambda_{cu} ; C_{uo}$
CD	Oui	Oui	Oui : $U=0$	$\phi' ; C'$	Consolidé drainé
Essai	Consolidation	Vitesse	$U$ non mesuré	Résultats	Type d'essai
Cisaillement	Non	Rapide		$\phi_{uu} ; C_{uu}$ ou $C_u$ ( $\phi=0$ )	Non consolidé rapide (*)
	Oui	Rapide		$\lambda_{cu} ; C_{uo}$	Consolidé rapide (*)
	Oui	Lente		$\phi' ; C'$	Consolidé lent

(\*) Essais non normalisés. Caractéristiques mesurées non fiables.

**TPN° 17**  
**ESSAI TRIAXIAL**

Groupe :  
 Échantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

**TYPE D'ESSAI :**

Eprouvette de  $\phi = 35$  mm,      Hauteur  $h = 70$  mm,      Surface  $A_0 = 0.962 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$   
 Pression de consolidation  $\sigma_3 =$

$\Delta h$ (mm)	Lecture de comparateur des forces $10^{-2}$ mm	Force N (N)	$\epsilon h = \Delta h/h$	$A_c$ ( $\text{m}^2$ )	$\Delta\sigma$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	$\sigma_1$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )
0						
05						
1						
1.5						
2						
2.5						
3						
3.5						
4						
4.5						
5						
5.5						
6						
6.5						
7						
7.5						
8						
8.5						
9						
10						
10.5						
11						
11.5						
12						
12.5						
13						
13.5						

### 3.6 Essai de compression simple :(NF P94-077)

#### 1- Principe :

L'essai s'effectue sur une éprouvette placée entre les deux plateaux parallèles d'une presse. L'axe de l'éprouvette cylindrique est orthogonal aux plateaux. L'essai consiste à imposer une vitesse constante de déformation longitudinale et à mesurer la force axiale appliquée à l'éprouvette.

#### 2- Appareillage

- Carottier pour prélèvement d'éprouvettes ;
- Petit matériel pour scier et découper les éprouvettes ;
- Dispositif de chargement permettant d'imposer un déplacement à vitesse constante de deux plateaux horizontaux rigides de dimensions supérieures ou égales à la dimension transversale des éprouvettes ;
- Capteur de force avec une incertitude de 2/100.

#### 3- Mode opératoire

- Des éprouvettes cylindriques de section transversales circulaire ou carrée sont taillées à partir de l'échantillon de matériau dans une certaine dimension conformément à la norme XP P 94-202. Elles seront mesurées et pesées par la suite.
- L'essai comporte l'écrasement à la même vitesse de trois éprouvettes ou plus.
- L'écrasement est réalisé à une vitesse de raccourcissement constante ( $\Delta H/\Delta t$ ) correspondant à une vitesse de déformation entre 0.5% et 1.5% par minute.
- Prise des mesures de force axiale F et de déplacement axiale  $\Delta H$  avec un intervalle entre deux prises de mesure au plus de 0.15% de déformation tant que la déformation ne dépasse pas 1% et au plus de 0.30% au delà.
- L'essai prend fin lorsque l'on atteint 15% de déformation.
- Soumettre l'éprouvette à dessiccation et noter sa masse

#### 4-Expression des résultats

$$R_c = \frac{F}{S}$$

Où :

$R_c$  (N / mm<sup>2</sup> ou MPa): Résistance à la compression simple

F (N): Force maximale sur l'éprouvette

S (mm<sup>2</sup>) : La surface de l'éprouvette









Figure I.37 : Essai de résistance à la compression sur un échantillon de sol

**TPN° 18**

**ESSAI DE COMPRESSION AXIALE**

Groupe :  
 Échantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

Forage ECH profondeur	$\Phi$ (cm)	Hauteur (cm)	Poids d'éch. (g)	Poids vol (g/cm <sup>3</sup> )	Charge RC (Kn)	RC (kg/cm <sup>2</sup> )	H/ $\Phi$	RC corrigée	OBS
									
									
									
									
									
									



## **PARTIE II : GÉOTECHNIQUEROUTIÈRE**

### ***2.1 Essai Proctor***

Voir partie I (page 40)

### ***2.2 Essai CBR***

Voir partie I (page 45)

### ***2.3 Essai au bleu de méthylène***

Voir partie I (page 50)

## **2.4 Mesure de la résistance à la fragmentation par choc Essai Los Angeles( NF P18-573)**

### **1. Définition et but de l'essai**

Ce mode opératoire est issu de l'essai américain défini par la norme ASTM C.131.55

L'essai (N.F. P18.573) permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement.

Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), et d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.

### **2. Principe**

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments *inférieurs à 1,6 mm* produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en oeuvre.

Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité.

Si **P** est le poids du matériau soumis à l'essai, **p** le poids des éléments *inférieurs à 1,6 mm* produits au cours de l'essai, la résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques s'exprime par la quantité en pourcentage. Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, '*coefficient Los Angeles*' noté **CLA** du matériau.

### **3. Matériel utilisé**

a)- La machine Los Angeles comporte :

1/ un cylindre creux en acier de 12 mm ± 0,5 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de 711 mm ± 1 mm et une longueur intérieure de 508 mm ± 1 mm. Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ne pénétrant pas à l'intérieur du cylindre ; le montage est tel que le cylindre peut ainsi tourner sur son axe qui doit être horizontal,



**Figure 2.1** : Machine Los Angeles

- 2/ une ouverture de 150 mm de largeur, sur toute la longueur du cylindre, permet d'introduire l'échantillon. Pendant l'essai, cette ouverture est obturée d'une façon hermétique aux poussières par un couvercle amovible tel que la surface intérieure reste bien cylindrique. Cette dernière est coupée par une tablette en saillie placée à une distance de 40 cm du rebord du couvercle, distance mesurée le long du cylindre dans le sens de la marche. Cette tablette démontable, en acier dur est de section rectangulaire (longueur égale à celle du cylindre, largeur de 90 mm  $\pm$  0,5mm, épaisseur de 25 mm). Elle repose, suivant un plan diamétral, le long d'une génératrice et est fixée par des boulons sur les parois latérales. Elle doit avoir des arêtes vives, la charge est constituée par des boulets sphériques de 47 mm de diamètre environ et pesant 420 et 445 g. Ces boulets ne doivent pas s'user de façon trop irrégulière, Un moteur d'au moins 0,75 kW, assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours/minute,
- 3/ un bac destiné à recueillir les matériaux après essai,
- 4/ un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.
- b) un jeu de tamis de 1,6 – 4 – 6,3 – 10 – 14 mm. Leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250 mm,
- c) une balance précise au gramme, de portée au moins égale à 10 kg,
- d) une étuve à 105 °c,
- e) des bacs et des truelles,
- f) des bacs d'environ 40 x 30 x 5 cm, à perforation inférieur à 1,6 mm.

#### 4. Préparation du matériau

Effectuer l'essai sur un granulat, ayant une granularité conforme à l'une des six classes granulaires type, lavé et séché à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant (5 heures au minimum).

La prise d'essai sera de **5 kg**. La préparer de la façon suivante :

- a) si deux essais sont envisagés, préparer, à partir de 15 kg, deux échantillons identiques par quartage à sec,
- b) sinon, tamiser l'échantillon à sec sur chacun des deux tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.

Recueillir dans un bac **5100 g** environ du matériau tamisé. Ce poids supplémentaire de 100 g servant à compenser celui des poussières ou de la gangue terreuse. Laver cette quantité recueillie sous un jet d'eau et la remuer à la truelle jusqu'à ce que l'eau soit claire. Après lavage, verser le matériau dans un bac perforé et égoutter quelques instants.

Sécher l'ensemble à l'étuve à 105 °c, jusqu'à poids constant. Retirer le bac perforé de l'étuve et laisser refroidir.

Enlever l'excédent de matériau pour ajuster le poids à  **$P = 5 \text{ kg} \pm 2 \text{ g}$** , exigé pour l'essai.

#### 5. Mode opératoire

- Mise en place de l'échantillon dans la machine ainsi que la charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie (voir *tableau suivant*).

**Tableau II.1** : Charge de boulets relatifs à la classe granulaire et

Classes granulaires (mm)	Fractions	Nombre de boulets	Poids total de la charge (g)	Poids des fractions (g)
4-6,3		7	3080 ± 20	5000 ± 2
6,3- 10		9	3960 ± 25	5000 ± 2
10-14		11	4840 ± 25	5000 ± 2
10-25	10-16	11	4840 ± 25	3000
	16-25	11	4840 ± 25	2000
16-31,5	16-25	12	5280 ± 25	2000
	25-31.5	12	5280 ± 25	3000
25-50	25-40	12	5280 ± 25	3000
	40-50	12	5280 ± 25	2000

- Replacer le couvercle et serrer les boulons de fixation.
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 35 tr/mn pour toutes les classes à l'exception de la classe 25–50 mm où le nombre de rotations est de 1000.
- Enlever le granulat après l'essai. Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm ; le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.
- Laver le refus à 1,6 mm dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle. Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant.
- Peser ce refus une fois séché, soit P' le résultat de la pesée.

$$CLA = 100 \frac{5000 - p'}{5000}$$

**N.B:**

Le résultat sera **arrondi à l'unité**.



**Figure 2.2** : Etat du matériau avant et après essai.

**TPN° 19**

**ESSAI LOS ANGELES**

Groupe :  
 Echantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

<b>N° échantillon</b>	<b>Nature échantillon</b>	<b>Classe granulaire</b>	<b>Nombre de boulets</b>	<b>Masse sèche refus à 1,6mm P' (g)</b>	<b>Perte de poids 100-P'</b>	<b>LA</b>

## **2.5. Mesure de la résistance à l'attrition Essai Deval (NF P 18.577)**

### **1. Définition :**

L'essai Deval a pour but de mesurer la résistance à l'attrition d'un matériau. L'attrition est reproduite dans l'essai par une combinaison de frottements réciproques et de chocs modérés. L'essai s'effectue surtout les granulats de classe granulaire 25-50 mm, d'origine naturelle ou artificielle utilisés pour le ballast des voies ferrées. Il existe deux types d'essai: à sec ou humide. L'essai s'applique à tous les matériaux, quelle qu'en soit la nature minéralogique, et fournit une évaluation à l'aptitude du matériau à se transformer dans la chaussée sous l'action mécanique des véhicules.

### **2. Principe :**

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produits dans la machine Deval par les frottements réciproques et les chocs modérés des éléments d'une prise d'essai de 7 kg. La résistance à l'attrition par frottements réciproques et chocs modérés du matériau s'exprime par un coefficient dit coefficient Deval.

Si l'essai est effectué à sec, le coefficient obtenu sera appelé "coefficient Deval sec 'DS'".

Si l'essai est effectué en présence d'eau, il sera appelé "coefficient Deval humide 'DH'".

L'essai donne également des indications sur la fragilité du matériau.

### **3. Matériel utilisé :**

a)-La machine Deval comporte:

- un nombre pair de cylindres creux en tôle de  $3 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$  d'épaisseur, de  $200 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  de diamètre intérieur, et d'une longueur de  $340 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ . Ils sont portés par un axe rigoureusement horizontal et sont inclinés à  $32^\circ$  sur cet axe avec tolérance de  $\pm 2^\circ$ . Chaque cylindre permet d'effectuer un essai. L'intérieur des cylindres ne doit présenter aucune saillie due à la soudure ou au mode de fixation. Ces cylindres sont fermés par un couvercle plat bloqué par trois tiges filetées articulées. Un joint torique en caoutchouc, placé à l'extrémité du cylindre du côté couvercle, assure l'étanchéité aux poussières et à l'eau. Cet ensemble doit reposer sur un support massif..

- un motoréducteur entraînant les cylindres à une vitesse régulière de 30 à 33 tr/ mn. La puissance de ce moteur est adaptée au nombre de cylindres. Elle est de 0,75 kW pour deux cylindres.

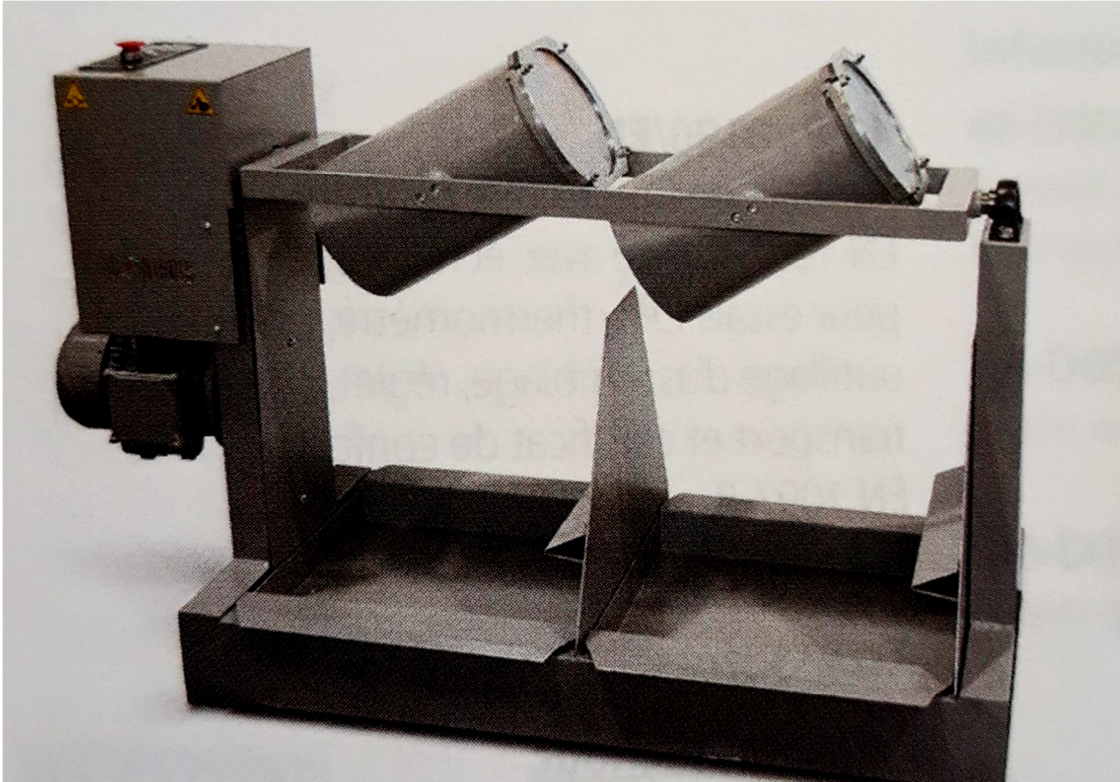
- un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.

b) Jeu de tamis: 1,6–10–25–40 et 50 mm, d'undiamètre au moins égal à 250 mm.

c) une balance précise au gramme, de portée au moinségale à 10 kg.

d) une étuve à  $105^\circ\text{C}$ .

e) des bacs, brosse, pissette.



*Figure 2.3 : Machine Deval*

#### **4. Préparation du matériau**

Effectuer l'essai sur  $7000 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$  de granulats secs répartis de la façon suivante:  $4200 \text{ g} \pm 30 \text{ g}$  de 25-40 mm,  $2800 \text{ g}$  de 40-50 mm

#### **5. Mode opératoire**

**a) Essai Deval sec:** On introduit la prise d'essai lentement, sans chocs, dans l'un des cylindres (voir figure). On replace le couvercle et l'on serre soigneusement les tiges filetées articulées afin qu'aucune poussière ne s'échappe au cours de l'essai.

A la fin des rotations, on dispose un bac sous le cylindre dont l'ouverture est placée en position haute. On enlève le couvercle puis on fait basculer le cylindre de façon que son contenu s'écoule dans le bac. L'intérieur du cylindre vide est soigneusement brossé et lavé afin qu'aucune poussière ne reste collée à la surface. Les pierres et les gros éclats contenus dans le bac sont repris un par un, lavés et brossés sous l'eau. Le contenu du bac (à l'exception des gros éléments) est ensuite versé puis arrosé et agité sur un tamis de 1,6mm. Le refus est ajouté aux pierres et gros éclats. L'ensemble des matériaux dont le diamètre est supérieur à 1,6 mm est placé dans l'étuve à  $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . On le laisse à l'étuve jusqu'à poids constant.

**b) Essai Deval humide:** Le cylindre étant placé de façon que son ouverture soit dans la position la plus haute on introduit la prise d'essai avec la même précaution que pour l'essai Deval sec, puis on recouvre d'eau jusqu'à ce que l'eau affleure le bord du cylindre. Le cylindre ne devra jamais être complètement rempli d'eau (voir figure). On replace le

couvercle et l'on serre soigneusement les tiges filetées articulées afin d'éviter toute perte d'eau. Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine  $10.000 \pm 10$  rotations à une vitesse constante comprise entre 30 et 33 tr/mn.

A la fin des rotations, on dispose un bac sous le cylindre dont l'ouverture est placée en position haute. On enlève le couvercle puis on fait basculer le cylindre de façon que son contenu s'écoule lentement dans le bac. On lave soigneusement à la pissette tout l'intérieur du cylindre et l'on recueille l'eau et les parties minérales entraînées dans le bac avec tout l'échantillon. Les pierres et les gros éclats sont pris ensuite un à un, lavés et brossés à l'eau afin d'enlever la boue adhérente à la surface des morceaux (voir figure 2.4). Après l'avoir brassé on verse le contenu restant dans le bac sur un tamis de 1,6 mm que l'on agite en l'arrosant. Le refus est ajouté aux pierres et gros éclats. Le refus au tamis de 1,25 mm est placé dans l'étuve à  $105 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ . On le laisse à l'étuve jusqu'à poids constant.



Matériau avant essai



Matériau après essai

**Figure 2.4** : État du matériau avant et après essai.

On sort le matériau de l'étuve et on le pèse. Soit P1 le poids obtenu

$$CD = \frac{2800}{P}$$

Où :  $p = 7000 - P1$



**TP N° 20**

**ESSAI DEVAL**

Groupe :  
 Echantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

N° échantillon	Nature de l'essai	Nature du matériaux	Provenance	Poids sec avant essai P (g)	Poids sec après essai p'(g)	Poids éléments <1,6mm p(g)	Coefficient Deval DS ou DH

## 2.6. Mesure de la résistance à l'attrition et à l'usure. Essai Micro Deval (NF P 18.572)

### 1 – Définition et but de l'essai

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Le matériau évolue pendant l'essai par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive) à sec ou en présence d'eau.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires : 4-6,3mm; 6,3-10 mm; 10-14 mm; 25-50 mm.

Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm, une charge abrasive est utilisée.

### 2. Principe

Si **M** est la masse du matériau soumis à l'essai, **m** la masse des éléments **inférieurs à 1,6 mm** produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par le coefficient Micro-Deval noté **CMD** qui s'écrit:

$$CMD = 100 \frac{m}{M} \%$$



*Figure 2.5* : Machine Micro Deval

### 3. Matériel utilisé :

a) La machine Micro Deval comporte :

- Un à quatre cylindres creux en acier inox ayant un diamètre intérieur de  $200 \pm 1$  mm et une longueur utile de  $154 \pm 1$  mm pour les gravillons compris entre 4 et 14 mm et de  $400 \pm 2$  mm pour les 25 – 50mm. Les cylindres d'essai ont une épaisseur supérieure ou égale à 3 mm. Ils sont posés sur deux arbres horizontaux soudés sur un châssis métallique tubulaire. Chaque cylindre est fermé à une extrémité par un couvercle plat d'environ 8 mm d'épaisseur.

L'étanchéité est assurée par un joint placé sur le couvercle. Chaque cylindre contient un échantillon.

La rotation des cylindres est obtenue grâce à deux arbres, recouverts en téflon, sur lesquels le ou les cylindres appuient. La rotation arrive à travers un rapport de courroie.

Le nombre de rotations est comptabilisé à l'aide d'un compteur placé sur le panneau de commande - la charge est constituée par des boulets sphériques en acier inox de  $10 \pm 0,5$  mm de diamètre environ. Les diamètres doivent être contrôlés régulièrement ; il ne faut plus utiliser celles qui passent à travers une passoire de 9,5 mm ou entre deux barres parallèles de 9,5 mm. Un moteur, d'environ 1kW, assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière de  $100 \pm 5$  mm tr/min.

- un bac destiné à recueillir les matériaux après essai,

- un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.

**b)** un jeu de tamis de 1,6 - 4 - 6,3 - 8 - 10 - 14 - 25 - 40 - 50mm. Leur diamètre ne devra pas être inférieur à 200 mm,

**c)** une balance précise au gramme, de portée au moins égale à 10 kg,

**d)** une étuve à 105 °c,

**e)** des bacs et des truelles,

#### 4. Préparation du matériau

Effectuer l'essai sur un granulat, ayant une granularité conforme à l'une des quatre classes granulaires types 4-6,3 ; 6,3-10 ; 10-14 ; 25-50. Les 25-50 mm doivent contenir 60% de 25-40 mm.

Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105 C° jusqu'à poids constant (5 heures au minimum).

Il n'est pas possible d'étendre ce processus d'usure aux sables, les classes granulaires inférieures à 4mm n'évoluent plus par usure, dans cet essai, mais *par fragmentation*.

Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des deux tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.

La prise d'essai sera de  $500 \pm 2$  g pour les 4-14 mm et de  $10 \text{ kg} \pm 20$  g pour les 25-50 mm.

#### 5. Mode opératoire

**a)- Essai sur les gravillons compris entre 4 et 14 mm :**

Mise en place de l'échantillon dans la machine ainsi que la charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie (voir *tableau 1*).

*Tableau II.2. Charge de boulets suivant le type de classe granulaire.*

Classe granulaire (mm)	Poids de l'échantillon (g)	Poids de la charge
4 - 6.3	$500 \pm 2$	$2000 \pm 5$
6.3 - 10	$500 \pm 2$	$4000 \pm 5$
10 - 14	$500 \pm 2$	$5000 \pm 5$

Pour l'essai **humide** (en présence d'eau), ajouter **2,5 litres** d'eau.

Replacer le couvercle et serrer les boulons de fixation. S'assurer que les cylindres sont étanches pendant leur rotation.

Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 12.000 rotations à une vitesse régulière de  $(100 \pm 5)$  tr/min pour toutes les classes, soit deux heures.

Enlever le granulat après l'essai. Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat.

Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de  $1,6\text{mm}$  ; le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.

Laver le refus à  $1,6\text{ mm}$  dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle. Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant.

Peser ce refus une fois séché, soit  $m'$  le résultat de la pesée.

**b)- Essai sur les granulats compris entre 25 et 50 mm :**

- Introduire dans le cylindre d'essai les **10.000 g** de matériau préparé.
- Pour l'essai humide (en présence d'eau), ajouter **2,0 litres** d'eau.
- Replacer le couvercle et serrer les boulons de fixation. S'assurer que les cylindres sont étanches pendant leur rotation.
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 14.000 rotations à une vitesse régulière de  $(100 \pm 5)$  tr/min pour toutes les classes, soit deux heures et 20 minutes.
- Enlever le granulat après l'essai. Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de  $1,6\text{ mm}$  ; le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.
- Laver le refus à  $1,6\text{ mm}$  dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle. Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant.
- Peser ce refus une fois séché, soit  $m'$  le résultat de la pesée.

Le coefficient Micro-Deval **CMD** est par définition égal au rapport :

$$CMD = 100 \frac{m}{M} \%$$

Avec :  $m = M - m'$  ,             $M$  : masse de l'échantillon  $500$  ou  $10.000\text{ g}$  selon la classe choisie,

$m'$  : masse du tamisât au tamis de  $1,6\text{ mm}$ .

**N.B :** - Le résultat sera **arrondi à l'unité**.

- Le coefficient mesure le pourcentage d'usure, *plus il est petit et plus la résistance à l'usure est grande.*

**6. Classification des granulats en fonction des coefficients Micro Deval et Los Angeles**

Classement MDE-LA : les granulats sont classés en 6 catégories allant de A à F, chacune d'elle devant satisfaire les conditions définies aux tableaux suivants :

*Tableau II.3 : Classement des granulats selon les coefficients MDE-LA*

<b>Catégories</b>	<b>Coef. Los Angeles</b>	<b>Coef. Micro- Deval</b>	<b>Coef. L A + MD</b>
<b>A</b>	$\leq 20$	$\leq 15$	$\leq 25$
<b>B</b>	$\leq 25$	$\leq 20$	$\leq 35$
<b>C</b>	$\leq 30$	$\leq 25$	$\leq 45$
<b>D</b>	$\leq 35$	$\leq 30$	$\leq 55$
<b>E</b>	$\leq 45$	$\leq 45$	$\leq 80$
<b>F</b>	$> 45$	$> 45$	$> 80$

*Tableau II.4 :Type de gravier selon le coefficient MDE*

<b>Valeurs du coefficient Micro Deval en présence de l'eau</b>	<b>Appréciation</b>
De 10 à 20	Bon à moyen
De 20 à 35	Moyen à faible
$>35$	Médiocre

**TPN° 21**

**ESSAI MICRO DEVAL**

Groupe :  
 Echantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

N° échantillon	Nature de l'essai	Nature du matériaux	Provenance	Classe granulaire (mm)	Poids charge abrasive (g)	Poids initial P(g)	Poids sec après essai p'(g)	Poids éléments <1,6mm p(g)	MDE MDS

## **2.7 Essai de fragmentabilité (NF P 94-066)**

### **1- Définition :**

Le coefficient de fragmentabilité (FR) est déterminé à partir d'un essai de fragmentation. Il s'exprime par le rapport des D<sub>10</sub> d'un échantillon de granularité initiale donnée, mesurés avant et après lui avoir fait subir un pilonnage conventionnel avec la dame Proctor normal. Sa détermination est en particulier nécessaire pour préciser le classement des roches argileuses (marnes, argilites, schistes sédimentaires,...) et des roches siliceuses, magmatiques et métamorphiques altérées ou peu résistantes.

### **2- Principe de l'essai :**

L'essai consiste à déterminer la réduction du D<sub>10</sub> d'un échantillon de granularité d/D donnée soumis à un pilonnage conventionnel.

Avec : d/D, matériau constitue de grains qui sont en totalité retenus par le tamis de maille d et passent en totalité au travers du tamis de maille D.

Cette réduction s'exprime par le rapport :

$$FR = \frac{D_{10} \text{ Après pilonnage}}{D_{10} \text{ Avant pilonnage}}$$

Avec : FR : Coefficient de fragmentabilité d'un matériau rocheux (en pourcentage) ;

D<sub>10</sub> : Dimension des grains en-dessous de laquelle se situe 10 % de la masse d'un matériau granulaire (en millimètres).

### **3- Appareillage et matériel d'essai**

- Le moule CBR,
- La dame Proctor Normal,
- Le massif de réaction.
- Une colonne de tamis de mailles : 1, 2, 5, 10, 16, 20, 40, 50 ou 63, 80 mm.
- Une balance : portée 3 000 g, précision ± 1 g.

### **4- Préparation des échantillons :**

Prélever un échantillon représentatif de la nature et de l'état hydrique du matériau rocheux considéré par prélèvement soit carotté ; soit à la pelle hydraulique ; soit sur affleurements ; soit directement sur le site en cours d'extraction puis préparer la fraction d/D qui sera soumise à l'essai.

Cette fraction d/D est obtenue en fragmentant, si nécessaire, l'échantillon à l'aide d'un marteau, puis en procédant à son tamisage au travers des tamis suivants :

- 10 et 20 mm pour les matériaux issus des roches argileuses du type marnes, argilites, pelites...
- 40 et 80 mm pour les matériaux issus des roches argileuses du type schistes sédimentaires et des roches magmatiques et métamorphiques altérées.

Les refus aux tamis de 20 et 80 mm peuvent être réintégrés dans la prise d'essai après fragmentation au marteau et repassage aux travers des tamis respectifs 10/20 mm ou 40/80 mm.

La prise d'essai doit être de 2 kg (à un élément près). Elle doit être conservée à l'abri de l'évaporation si l'essai de fragmentabilité n'est pas exécuté immédiatement après la préparation de la fraction d/D.

### 5- Exécution de l'essai :

Pour tracer la courbe granulométrique initiale avec trois points, tamiser la fraction 10/20 mm ou 40/80 mm préalablement préparée respectivement au travers des tamis de 16 mm et 50 ou 63 mm, peser et noter les refus à ces tamis.

Reconstituer et ré-homogénéiser la fraction d/D après ce tamisage et l'introduire dans le moule CBR. Les éléments sont arrangés manuellement en imprimant quelques secousses au moule par de légers coups de maillet sur les parois. La surface supérieure de l'échantillon doit être aussi régulière que possible.

L'ensemble moule et prise d'essai est ensuite placé sur le massif de réaction utilisé pour l'exécution des essais Proctor (NF P 94.093) et on applique à la surface de l'échantillon 100 coups de dame Proctor Normal distribués conformément au mode de compactage décrit pour le compactage d'une couche dans l'essai Proctor.

Après pilonnage, procéder au démoulage et à la désagrégation manuelle des éléments éventuellement agglutinés, puis tamiser l'échantillon au travers des tamis suivants :

- 1, 2, 5, 10 mm lorsque la fraction soumise à l'essai est une fraction 10/20 mm ;
- 5, 10, 20, 40 mm lorsque la fraction soumise à l'essai est une fraction 40/80 mm ;

Procéder enfin à la pesée des refus sur chacun des tamis.

A partir des résultats des pesées des refus aux différents tamis définis précédemment, établir les courbes granulométriques de la fraction soumise à l'essai respectivement avant et après pilonnage., et déterminer sur ces courbes les valeurs respectives du D10 du matériau.

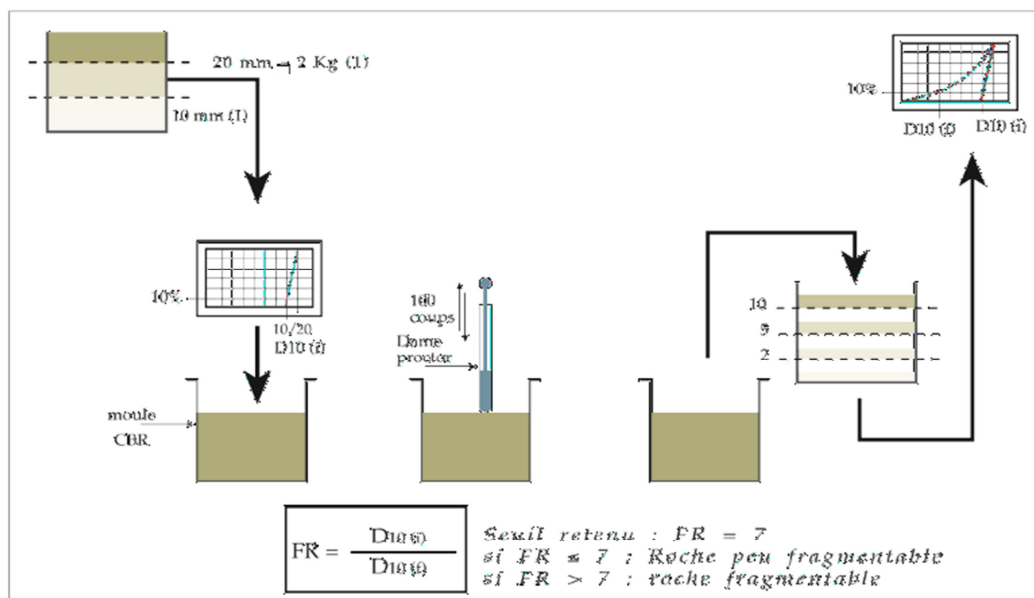


Figure 2.6 : Principe de l'essai de Fragmentabilité (GTR.2000)



**TP N° 22**  
**ESSAI DE FRAGMENTABILITÉ**

Groupe :  
 Échantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :  
**Avant Pilonnage :**

Masse de l'échantillon= 2000 g

Les tamis (mm)	Refus (gr)	Tamisât cumulés ( gr)	Tamisât cumulés (%)
<b>20</b>			
<b>16</b>			
<b>8</b>			
<b>Fond</b>			

**Après pilonnage :**

Masse de l'échantillon= 2000 g

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisât cumulés ( g)	Tamisât cumulés (%)
<b>20</b>			
<b>16</b>			
<b>8</b>			
<b>4</b>			
<b>2</b>			
<b>1</b>			
<b>Fond</b>			

$$FR = \frac{D_{10} \text{ Après pilonnage}}{D_{10} \text{ Avant pilonnage}}$$

## 2.8 Essai de dégradabilité( NF P 94-067)

### 1- Description :

L'essai de dégradabilité vise à évaluer la sensibilité du matériau rocheux aux sollicitations hydriques, et donc le risque d'évolution à long terme sous l'action combinée de l'eau et des sollicitations mécaniques.

L'échantillon testé est identique à celui préparé pour l'essai de fragmentabilité (TP précédent), avec une fraction 10/20 ou 40/80 et une masse totale de 2 kg.

La granulométrie de l'échantillon est déterminée sur 3 points. L'essai consiste à soumettre l'échantillon à quatre cycles alternant 8h d'imbibition et 16h de séchage en étuve à 105°. Après l'essai, la granulométrie est à nouveau déterminée à l'aide de quatre tamis au minimum (Figure II.7).

Sur les courbes granulométriques mesurées, on détermine les valeurs avant et après essai du  $D_{10}$ , la dimension des grains en dessous de laquelle se situe 10% de la masse du matériau. Le coefficient de dégradabilité  $DG$  se détermine alors selon l'expression :

$$DG = \frac{D_{10}(\text{Avant } 1^{\text{er}} \text{ cycl. imbibition/séchag.})}{D_{10}(\text{Après } 4^{\text{em}} \text{ cycl. imbibition/séchag.})}$$

### 2- Principe :

L'essai consiste à déterminer la réduction de la dimension des grains en-dessous de laquelle se situe 10% de la masse d'un matériau constitué de grains retenus en totalité entre deux tamis de mailles de taille donnée soumis à quatre cycles imbibition-séchage conventionnels.

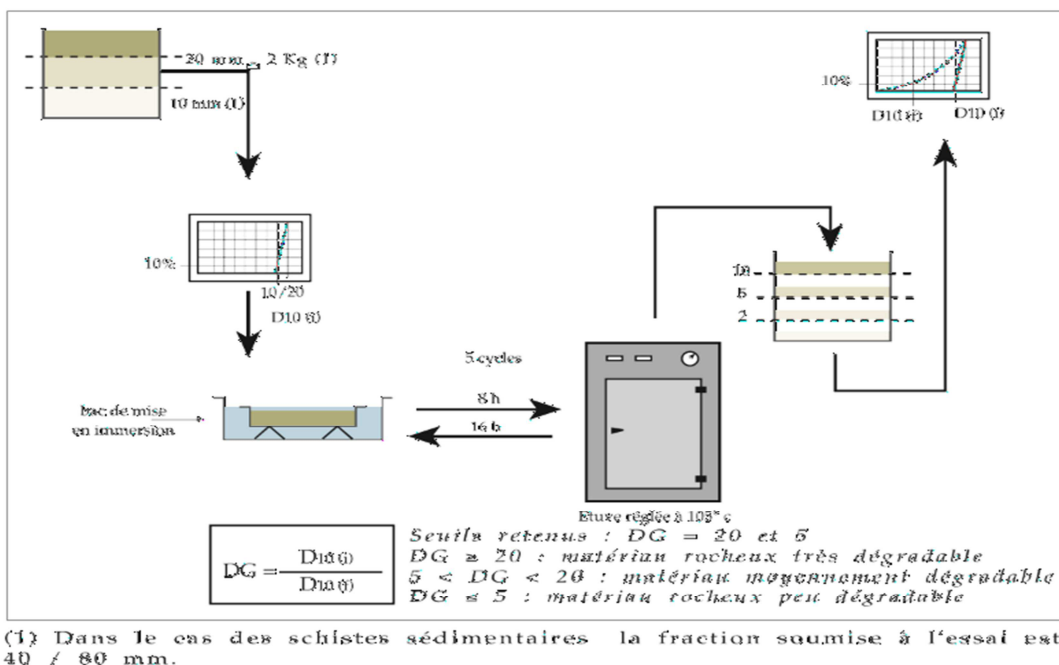


Figure 2.7 : Principe de l'essai de Dégradabilité( GTR. 2000)

### 3- Appareillage utilisé :

- Colonne de tamis de mailles : 1, 2, 5, 10, 16 mm
- Étuve thermostatée réglable à  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Bac métallique plat de dimensions minimales {H x I x L} : 0.1 m x 0.3 m x 0.5 m.
- Bac plat de dimensions minimales {H x I x L} : 0.25 m x 0.5 m x 0.75 m.
- Balance portée 3000g, précision  $\pm 1\text{g}$  (Fig. 5.3).

### 4- Mode opératoire :

- le tamisage est effectué après la fragmentation de l'échantillon. Les tailles de tamis dépendront du type de matériau.
- procéder ensuite à la reconstitution et à la ré homogénéisation de la fraction en la répartissant dans un bac métallique que l'on place alternativement quatre fois successivement en immersion dans un grand bac, puis dans l'étuve à  $105^{\circ}\text{C}$ . Le 1er cycle débute par une mise en immersion et le 4ème cycle se termine par un séchage.
- Après le 4ème cycle, procéder au tamisage.
- Tracer sur le même graphe les Courbes granulométriques des échantillons testés avant 1er cycle et après 4ème cycle imbibition/séchage et Calculer le coefficient DG

**Tableau II.1** : Valeurs seuil selon la classification française des roches (NF P11-300)

Valeur de DG	Matériaux
$DG < 5$	peu dégradables
$5 < DG < 20$	moyennement dégradables.
$DG > 20$	très dégradables

**TPN° 23**

**ESSAI DE DEGRADABILITE**

Groupe :  
 Echantillon :  
 Couleur :  
 Nature :  
 Provenance :  
 Date de l'essai :

**Avant 1 er cycle Imbibition/Séchage :**

Masse de l'échantillon= 2000 gr

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisât cumulés ( g)	Tamisât cumulés (%)
20			
16			
8			
Fond			

**Après 4ème cycle imbibition/séchage :**

Masse de l'échantillon= 2000 gr

Les tamis (mm)	Refus (g)	Tamisât cumulés ( g)	Tamisât cumulés (%)
20			
16			
8			
4			
2			
1			
Fond			

$$DG = \frac{D_{10}(\text{Avant 1er cycl}\grave{\text{e}}\text{ imbibition/s}\acute{\text{e}}\text{chag}\grave{\text{e}})}{D_{10}(\text{Apr}\acute{\text{e}}\text{s 4}\grave{\text{e}}\text{m}\grave{\text{e}}\text{ cycl}\grave{\text{e}}\text{ imbibition/s}\acute{\text{e}}\text{chag}\grave{\text{e}})}$$

D<sub>10</sub> (Avant 1er cycle imbibition/séchage) =

D<sub>10</sub> (Après 4ème cycle imbibition/séchage) =

## CONCLUSION

La reconnaissance du sol d'assise est d'autant plus approfondie que l'ouvrage à édifier est important, dans certains cas, elle est si importante qu'elle nécessite à elle seule une enveloppe supplémentaire ou un appel d'offre séparément du projet en lui-même, c'est le cas des tunnels, des barrages, des zones à risques, etc.....

Les moyens de reconnaissance ne font que progresser avec le temps, et l'accumulation de l'expérience renforce la capacité de prédire le comportement du terrain.

Les essais, que ce soit au laboratoire ou in situ, sont d'une importance considérable pour établir un choix du système de fondation, donc, il faut que ces essais soient choisis et proposés de façon judicieuse, et leur réalisation doit, elle aussi, respecter les normes exigées dans ce sens.

L'impact d'une bonne reconnaissance sera opérable sur l'ouvrage fini, le contraire conduit, quant à lui, à des dégâts et désastres irréversibles.

A travers ce polycopié, nous avons tenté de récapituler le protocole de mesure pour un nombre conséquent d'essais de mécanique des sols et de géotechnique routière, et nous sommes contents de présenter les essais dont disposent le laboratoire Matériaux sol et thermique (LMST) au niveau de notre établissement.

Espérons que ce modeste travail sera un guide et une référence pour l'ensemble des étudiants durant les séances des travaux pratiques.

## RÉFÉRENCES

1. Amar S., Magnan J.-P.. (1980). « Essais de mécanique des sols en laboratoire et en place : Aide-mémoire ». Rapport des LPC, France, 1980.
2. Costet J., Sanglerat G.. (1981) « Cours pratique de mécanique des sols ». Dunod,.
3. Ghomari F. et Bendi-Ouis A., 2008 « Travaux pratiques de matériaux de Construction. <http://fsi.univ-tlemcen.dz/cours-GHOMARI2.html>
4. GTR. (2000). « Guide Technique pour la Réalisation des Remblais et des Couches de Forme ». Fascicules 1, principes généraux, 100p, LCPC-SETRA
5. Hachichi A., Benaissa A. (1984) « Travaux pratiques de mécanique des sols » photocopié U.S.T.O.
6. Lérau J.(2006), « Cours Géotechnique 1 » Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
7. Magnan, J. P. (2014). » *Déformabilité des sols. Tassements. Consolidation* ». Ed. Techniques Ingénieur.
8. Schlosser F. « Eléments de mécanique des sols ». Presse des Ponts, France, 1988.

## NORMES DES ESSAIS

1. Norme NF P94-050, :Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage (1993)
1. Norme NF P94-053, sols : Reconnaissance et essais détermination poids volumique des sols fins (1993)
2. Norme NF P94-054, sols : Reconnaissance et essais détermination de la masse volumique des particules solides des sols –méthode du pycnomètre à eau), (1993) .
3. Norme NF P94-06-2, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique d'un matériau en place - Partie 2 : méthode au densitomètre à membrane. (1996)
4. Norme NF P94-051, sols : reconnaissance et essais détermination des limites d'Atterberg limite de liquidité à la coupelle \_ limite de plasticité au rouleau), (1993).
5. Norme NF P94-056, sols : reconnaissance et essais analyse granulométrique méthode par tamisage à sec après lavage, (1993).
6. Norme NF P94-057, sols : reconnaissance et essais analyse granulométrique méthode par sédimentation, (1993).
7. Norme NFP 18-598, Granulats : Equivalent de sable. (1979)
8. Norme NF XP CEN ISO TS 17892-11.. Sols : reconnaissance et essais géotechniques - Partie 11 : Détermination de la perméabilité à charge constante et à charge variable décroissante, (2005)

9. Norme NF P X31-106, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en carbonate - Méthode du calcimètre,(1996).
10. Norme NF P 94-068. Sols : reconnaissance et essais – mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse – détermination de la valeur au bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche (1993).
11. Norme NF P 94-093, Sols : Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau-Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié (1993).
12. Norme NF P 94-078 Sols : reconnaissance et essais — Indice CBR après immersion — Indice CBR immédiat — Indice portant immédiat — Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.
13. Norme NF P 94-071-1, Sols : Reconnaissance et Essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1 : Cisaillement direct, (1993).
14. Norme NF P94-074, Sol, : reconnaissance et essais - Essais à l'appareil triaxial de révolution - Appareillage - Préparation des éprouvettes - Essai (UU) non consolidé non drainé - Essai (Cu+U) consolidé non drainé avec mesure de pression interstitielle - Essai (CD) consolidé drainé.(1994)
15. Norme NF P94-077, sols : Reconnaissance et essais – Essais de compression uni axiale. (1993).
16. Norme NF P 18.572, Granulats : Essai d'usure micro-Deval. (1990)
17. Norme NF P18-573, Granulats : Essai Los Angeles. (1990)
18. Norme NF P 18.577, Granulats : Essai Deval (1990)
19. Norme NF P 94.066 , Granulats : Essai de fragmentabilité . (1990)
20. Norme NF P 94.067, Granulats : Essai de dégradabilité. (1990)

**ANNEXE A : CARACTÉRISTIQUES DES SOLS TYPES ORDRES DE  
GRANDEURS (Léreau, 2006)**



**CARACTÉRISTIQUES DE SOLS - TYPES  
ORDRES DE GRANDEUR**

**CARACTERISTIQUES PHYSIQUES**

Paramètres	Sables	Argiles	Sable - état	Yd
$\gamma$	18 kN/m <sup>3</sup>	10 à 20 kN/m <sup>3</sup>	lâche	< 16
Yd	14 à 18 kN/m <sup>3</sup>	10 à 20 kN/m <sup>3</sup>	dense	16 à 18
Ysat	19 à 22 kN/m <sup>3</sup>	19 à 22 kN/m <sup>3</sup>	très dense	> 18
Ys	26 à 30 kN/m <sup>3</sup>	26 à 30 kN/m <sup>3</sup>		
Y'	9 à 12 kN/m <sup>3</sup>	9 à 12 kN/m <sup>3</sup>		
n	0,25 à 0,50	0,20 à 0,80		
e	0,5 à 1 1 à 15 %	0,3 à 1 10 à 20 %		

**LIMITES D'ATTERBERG (en %)**

Nature	WL	P	IP
Limon	24	17	7
Argile limoneuse peu plastique	40	24	16
Argiles plastiques	83	28	55
Montmorillonite	114	29	85
Argile de Mexico	400		
Bentonite	500	125	375
	600		

**SURFACE SPECIFIQUE DES ARGILES**

Nature	D (g)	e	Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)
Kaolinite	0,3 à 3	D/3 à D/10	20 à 30
Montmorillonite	0,05 à 1	D/400	jusqu'à 800
Illite	0,1 à 2	D/10	80 à 100

**EQUIVALENT DE SABLE**

Nature	E. S.
Argile pure	0
Sol plastique	20
Sol non plastique	40
Sable pur et propre	100

**INDICE DE CONSISTANCE**

Consistance	Ic	W <sub>nat</sub>
Liquide	0,00	WL
Très molle	0,25	
Molle	0,50	WP
Mi-consistant	0,75	
Consistant	1,00	
Très consistant	>1,00	

**ACTIVITE DES ARGILES**

Nature	Activité
Kaolinite	Ac= 0,38 (inactive)
Illite	Ac= 0,9 (normale)
Montmorillonite	Ac=7,2 (active)

On peut considérer :

Argile inactive	Ac < 0,75
Argile normale	0,75 < Ac < 1,25
Argile active	Ac > 1,25

**VALEUR AU BLEU V<sub>as</sub>**

Classification des matériaux selon GTR 92 :

- 0,1 : seuil en dessous duquel le sol est insensible à l'eau
- 0,2 : seuil au-dessus duquel le sol est sensible à l'eau
- 1,5 : seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux
- 2,5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
- 6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
- 8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux

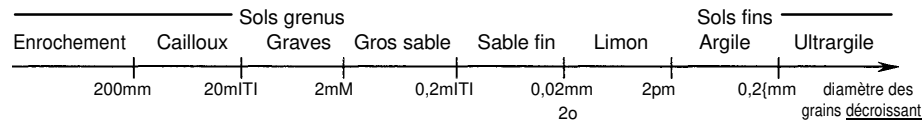
**TENEUR EN MATIERE ORGANIQUE**

Teneur en matière organique (%)	Désignation
0 - 3	Sol inorganique
3 - 10	
10 - 30	Sol tourbeux
> 30	Tourbe

**TENEUR EN CARBONATE DE CALCIUM**

Teneur en CaCO <sub>3</sub> (%)	Désignation géotechnique
0 - 10	Argile
10 - 30	
30 - 70	
70 - 90	Marne
90 - 100	
	Calcaire marneux
	Calcaire

**SOLS A GRANULOMETRIE UNIFORME**



**INDICE DE COMPRESSION Cm**

Nature	Indice de compression
Sables	0,01 < Cc < 0,1
Argiles raides (Kaolinites)	0,1 < Cc < 0,25
Argiles moyennes (Illites)	0,25 < Cc < 0,8
Argiles molles (Montmorillonites)	0,8 < Cc < 2,5

On peut considérer :

Sol incompressible	Cc < 0,02	Sables,
Sol très peu compressible	0,02 < Cc < 0,05	
Sol peu compressible	0,05 < Cc < 0,1	
Sol moyennement compressible	0,1 < Cc < 0,2	Kaolinites
Sol assez fortement compressible	0,2 < Cc < 0,3	Illites
Sol très compressible	0,3 < Cc < 0,5	
Sol extrêmement compressible	0,5 < Cc	Montmorillonites

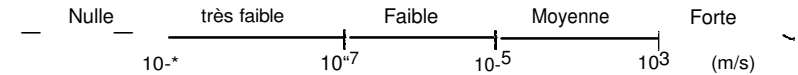
**COEFFICIENT DE CONSOLIDATION cm (en m<sup>2</sup>/s)**

Nature	Coefficient de consolidation
Kaolinites	2.10 <sup>-7</sup> < Cv < 4.10 <sup>-7</sup>
Illites	10 <sup>-7</sup> < Cv < 2.10 <sup>-7</sup>
Montmorillonites	2.10 <sup>-8</sup> < Cv < 1.10 <sup>-7</sup>
Argiles sableuses	de l'ordre de 10 <sup>-7</sup>
Limons	de l'ordre de 5.10 <sup>-6</sup>

**COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ k (en m/s)**

Nature	Coefficient de perméabilité
Graves	10 <sup>-3</sup> < k < 1
Sables	10 <sup>-5</sup> < k < 10 <sup>-3</sup>
Limons et sables argileux	10 <sup>-9</sup> < k < 10 <sup>-5</sup>
Argiles (intactes)	10 <sup>-13</sup> < k < 10 <sup>-9</sup>
Roches apparemment non fissurées	10 <sup>-12</sup> < k < 10 <sup>-10</sup>

Nature	Coefficient de perméabilité
Graviers sans sable ni fines	10 <sup>-2</sup> < k < 1
Sables purs ou mélanges sables et graviers sans fines	10 <sup>-5</sup> < k < 10 <sup>-2</sup>
Sables très fins - Argiles sableuses	10 <sup>-9</sup> < k < 10 <sup>-5</sup>
Argile homogène compacte et non stratifiée ou altérée	k < 10 <sup>-9</sup>



Nota : 10<sup>-8</sup> m/s représente une vitesse de 30 cm par an environ.

**COEFFICIENT DE PRESSION DES TERRES AU REPOS K<sub>0</sub>**

Nature	K <sub>0</sub>
Sable non compacté	0,4
Sable compacté en grande masse	0,5
Sable compacté par couches minces	0,8
Argile molle	0,6
Argile dure	0,5
Vase (imbibée d'eau)	1,0

**COHESION ET ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE**

Enrochements graviers sables et limons non plastiques

Cohésion c' = 0

Angle de frottement interne:

Enrochements : φ' = 40 - 45°

Gravier sableux, sable ou gravier à granulométrie étalée : φ' = 30-35° voire 40°

Sable à granulométrie uniforme, limon non plastique : φ' = 20 - 30°

Influence des caractéristiques physique sur l'angle de frottement interne d'un matériau pulvérulent

φ' = 36° + φ'1 + φ'2 + φ'3 + φ'4			
Compacité	φ'1	-6° 0° +6°	lâche : I <sub>D</sub> = 0,4 moyen : I <sub>D</sub> = 0,6 serré : I <sub>D</sub> = 0,9
Forme et rugosité des grains	φ'2	+1° 0° -3° -5°	aigu moyen arrondi sphérique
Grosseur des grains	φ'3	0° +1° +2°	sable fin 0,06 mm < D <sub>10</sub> < 0,2 mm gravier 0,6 mm < D <sub>10</sub> < 2mm gros graviers D <sub>10</sub> > 2mm
Répartition granulaire	φ'4	-3° 0° +3°	uniforme c <sub>u</sub> ≤ 5 moyenne 2 < c <sub>u</sub> < 5 étalée C <sub>u</sub> > 5

Relation de Kérisel : pour les sables : e . tan φ' = cste = 0,55

Argile saturée Le drainage s'effectue lentement.

Cohésion:

c<sub>u</sub> = quelques dizaines à quelques centaines de kPa

c' : négligeable

Angle de frottement interne : φ<sub>u</sub> = 0

φ' = 10 - 20°, quelquefois plus

Argile humide non saturée

Les propriétés mécaniques avant et après drainage sont du même ordre.

Cohésion:  $c_u$  et  $c'$ : de quelques dizaines et quelques centaines de kPa

Angle de frottement interne :  $\phi_u$  et  $\phi'$  : de quelques degrés à une vingtaine, quelquefois plus

Argile sèche (S<sub>v</sub> 0 7

Il ne se produit pas de drainage et il n'ya aucune différence entre les propriétés du sol mesurées dans un essai drainé ou non drainé

Cohésion :  $c_u$  -  $c'$  : quelques centaines de kPa (susceptible de beaucoup diminuer en cas d'humidification

Angle de frottement interne:  $\phi_u = \phi'$  : supérieur à 10°

Cohésion non drainée pour quelques consistances types d'argiles:

Consistance	$c_v$ (kPa)
Très molle	$c_v < 10$
Molle	$10 < c_u < 25$
Moyennement consistante	$25 < c_u < 50$
Consistante	$50 < c_u < 75$
Raide	$75 < c_u$

**MODULE DE DEFORMATION**

Nature du sol	Module de déformation E (en MPa)
Argile	4 à 40
Limon	4 à 15
Sable	6 à 80
Sable et gravier	40 à 120
Roche	» 200

**CAPACITÉ PORTANTE**

Nature	Capacité portante (kPa)
Argile molle	100
Argile moyennement consistante	200
Argile raide	300
Sable lâche	200
Sable compact	400
Roche tendre	1000

**CLASSIFICATION VIS-A-VIS DE LA PORTANCE**

Classe de portance	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$
Indice CBR	$I_{CBR} \leq 3$	$3 < I_{CBR} \leq 6$	$6 < I_{CBR} \leq 10$	$10 < I_{CBR} \leq 20$	$20 < I_{CBR} \leq 50$	$I_{CBR} > 50$
Examen visuel Indicatif (sous essieu de 13t)	Sol très déformable Inapte circulation impossible	Sol déformable Omère sous essieu de 13t	Sol déformable pas d'omère sous essieu de 13t	Sol peu déformable pas d'omère sous essieu de 13t	Sol très peu déformable pas d'omère sous essieu de 13t	Sol très peu déformable pas d'omère sous essieu de 13t
Module de déformation à la plaque $EV_2$ (MPa)	$EV_2 \leq 15$	$15 < EV_2 \leq 30$	$30 < EV_2 \leq 50$	$50 < EV_2 \leq 120$	$120 < EV_2 \leq 250$	$EV_2 > 250$
Module de réaction $K_w$ (dan/cm <sup>3</sup> )	$K_w \leq 3$	$3 < K_w \leq 5$	$5 < K_w \leq 6$	$6 < K_w \leq 7$	$7 < K_w \leq 15$	$K_w > 15$
Exemples de sols	Argile fine saturée, sols tourbeux à faible densité sèche, sols contenant des matières organiques	Limons plastiques argileux et argileux- plastiques, argile à silex, alluvions grossières, sols très sensibles à l'eau	Sables alluvionnaires argileux ou très limoneux, graves argileuses ou limoneuses avec fines $\leq 35\%$	Sables alluvionnaires propres avec fines $< 5\%$ , graves argileuses ou limoneuses avec fines $< 12\%$	Sols insensibles à l'eau, sables et graves propres, matériaux rocheux sains	Sols insensibles à l'eau, sables et graves propres, matériaux rocheux sains