

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Centre Universitaire Maghnia
Institut des Sciences et Technologie
Conseil Scientifique d'Institut

Extrait Procès-Verbal du Conseil
Scientifique d'Institut des Sciences et
Technologie

المركز الجامعي مغنية
معهد العلوم و التكنولوجيا
المجلس العلمي للمعهد

Lors de la session ordinaire N°02 du conseil scientifique, tenue le 13 octobre 2024, le conseil a confirmé l'avis favorable pour la publication du polycopié pédagogique intitulé "Travaux pratiques de mécaniques des sols" de Dr. Driz Hafida. Cette décision a été prise après l'examen des rapports d'expertise favorables concernant ce polycopié.

Le Président du Conseil
Scientifique de L'Institut ST

د. و. فضيل محمد الأبي
رئيس المجلس العلمي
المعهد الجامعي مغنية
المجلس العلمي للمعهد



République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
scientifique

CENTRE UNIVERSITAIRE DE MAGHNIA
INSTITUT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE



POLYCOPIE DE TRAVAUX PRATIQUES SUR

***MECANIQUES DES
SOLS I***



Présenté par : Dr. Hafida DRIZ

Maitre de Conférence classe B

2021/2022

Avant -propos

L'étude des sols est un point-clé des projets de construction. Les travaux associés présentent un coût important, et les risques engendrés en cas de problèmes peuvent être conséquents.

La mécanique des sols, c'est une application des lois mécaniques au matériau sol. Elle est voisine de la mécanique des milieux continus qui étudie de nombreux matériaux comme l'acier, le bois, les bétons, les plastiques dont la plupart sont artificiels et donc de constitution bien connue.

L'objectif de ce polycopié est de fournir les bases nécessaires à la compréhension du comportement des sols pour pouvoir concevoir, construire et contrôler les ouvrages avec lesquels le sol a une interaction importante.

- Maîtriser les outils de description des sols
- Développer la capacité d'expliquer et d'analyser le comportement des sols afin de les utiliser comme matériau de construction (remblai, barrage) et de concevoir des fondations, murs de soutènement, tunnels, et autres ouvrages.

D'une remarquable clarté et illustré par des photos, le présent document décrit cinq essais de laboratoire traitant aussi l'identification physique du matériau sol que de sa caractéristique mécanique. Chaque TP présente le principe de l'essai, la description du matériel utilisé, le mode opératoire de l'essai et la méthode d'interprétation des résultats expérimentaux.

À chaque début des essais, des rappels de cours permettront d'avoir une synthèse des différentes méthodologies, des notations et des conventions utilisées. Ces rappels se limitent à l'essentiel et il est conseillé de se munir de ses cours et éventuellement d'un ouvrage de référence adapté au niveau d'étude.

Ce polycopié s'adresse principalement aux étudiants inscrits en troisième année 'LMD' en Hydraulique & deuxième année de Génie Civil. Je souhaite vivement que cet ensemble des travaux pratiques puisse rendre service à de jeunes diplômés dans la spécialité d'hydraulique & Génie Civil. Je leur souhaite autant de plaisir à lire ce document que j'en ai eu à l'écrire et à l'enseigner.

Table de matière

Avant –propos

Table de matière

Listes des figures

Liste des tableaux

Notations Scientifiques

I . MESURE DES CARACTÉRISTIQUES PONDÉRALES (POIDS VOLUMIQUE & LA TENEUR EN EAU)

I.1 LA TENEUR EN EAU

I.1.1 Rappel du cours	1
I.1.2 Essai de détermination de la teneur en eau (<i>Méthode</i>)	2
<i>Materiels & Matériaux utilisés</i>	2
I.1.3 Conclusion	3

I.2 LA MASSE VOLUMIQUE DES GRAINS

I.2.1 Rappel du cours.....	4
I.2.1.1.La masse volumique apparente.....	4
I.2.1.2 La masse volumique absolue	5
I.2.2 Détermination de la masse volumique apparente	6
<i>Mode opératoire</i>	6
I.2.3 Détermination de la masse volumique absolue	7
<i>Mode opératoire</i>	7

II ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE (PAR TAMISAGE & SÉDIMENTOMÉTRIE)

II.1 L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE A SEC

II.1.1 Rappel du cours	9
II.1.1.1 Principe de la méthode de l'analyse granulométrique :	9
II.1.1.2 Quelques définitions :.....	10
II.1.2 TAMISAGE.....	12
II.1.2.1 Mode opératoire :.....	12

II.1.2.2	Méthode de Calcul.....	13
II.1.2.3	Travail demandé	14
II.1.2.4	Conclusion	14
II.2 L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTOMETRIE		
II.2.1	Rappel du cours	15
II.2.1.1	Principe de l'essai	15
II.2.1.2	Appareillage.....	15
	<i>Le densimètre</i>	16
	<i>Le défloculant</i>	16
II.2.2	LA SEDIMENTOMETRIE.....	17
II.2.2.1	Préparation de l'échantillon.....	17
II.2.2.2	L'essai	17
II.2.2.3	Réalisation des mesures	17
II.2.2.4	Calcul et résultats :	18
III MESURE DES PARAMÈTRES DE CONSISTANCE (LIMITES D'ATTERBERG)		
III.1	Rappel du cours	20
III.1.1	Définition	20
III.1.2	Principe de l'essai	21
III.2	LIMITE DE LIQUIDITE	22
III.2.1	Mode opératoire	22
III.2.2	Calcul & résultat	23
III.3	LIMITE DE PLASTICITE.....	24
III.3.1	Mode opératoire	24
III.3.2	Calcul & résultat	25
III.4	Conclusion :	25

IV MESURE DES CARACTÉRISTIQUES DE COMPACTAGE ET DE PORTANCE

ESSAIS PROCTOR & CBR

IV.1 Rappel du cours	26
IV.1.1 Définition	26
IV.1.2 Principe de la manipulation:	26
IV.2 ESSAI PROCTOR	27
IV.2.1 Mode opératoire.....	27
IV.2.2 Calcul et résultats :	28

V MESURE DE LA DENSITÉ IN-SITU PAR LE DENSITOMÈTRE À MEMBRANE

V.1 Rappel du cours.....	31
V.1.1 Introduction	31
V.1.2 Définition & Principe	31
V.1.3 APPAREILLAGE	32
V.2 Essai de densimètre à membrane.....	33
V.2.1 Préparation de l'appareil	33
V.2.2 Réalisation de l'essai	34
V.2.3 Calcul et résultats	35

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	31
------------------------------------------	-----------

ANNEXES	37
----------------------	-----------

Listes des figures

Figure I.1 Déformation d'un sol en fonction de la teneur en eau.....	1
Figure I.2 Détermination de la masse volumique apparente pour les solides	4
Figure I.3 Détermination de la masse volumique apparente pour les matériaux incohérents	5
Figure I.4: Détermination de la masse volumique absolue.....	5
Figure I.5 Les étapes pour la détermination de la masse volumique apparente	6
Figure I.6 Les étapes pour la détermination de la masse volumique absolue du sable	8
Figure II.1 Les différents types de granulat en fonction de leur diamètre	9
Figure II.2 Analyse granulométrique des différents cas	10
Figure II.3 Mode opératoire du Tamisage (gravier) au laboratoire du CUM.....	12
Figure II.4 les étapes de la pesée des tamis (gravier) au laboratoire du CUM.....	13
Figure II.5 Exemples de la granulométrie étalée et uniforme	14
Figure II.6 Schéma d'une particule du sol fin	15
Figure II.7 Illustration de la prise de mesure sous le ménisque	16
Figure III.1 Représentation des limites d'Atterberg.....	20
Figure III.2 Le principe de la détermination des imites d'Atterberg.....	21
Figure III.3 Mode opératoire de l'essai de limite de liquidité au laboratoire du CUM.....	23
Figure III.4 Mode opératoire de l'essai de limite de Plasticité au laboratoire du CUM	24
Figure IV.1 Préparation du sol pour l'essai de compactage au laboratoire du CUM	27
Figure IV.2 Mode opératoire de l'essai de Proctor au laboratoire du CUM.....	28
Figure IV.3 Courbe Proctor.....	30
Figure V.1 Principe de l'essai	31
Figure V.2 APPAREILLAGE : DENSITOMÈTRE	32
Figure V.3 Préparation de l'appareil au laboratoire	33
Figure V.4 Fixation de la plaque d'appui sur la surface préparé du sol.....	34
Figure V.5 Fixation de l'appareil et mesure du volume V0	34
Figure V.6 Excavation de la cavité	35
Figure V.7 Mesure du volume de la cavité et lecture de V1.....	35

Liste des tableaux

Tableau I.1 Récapitulatifs des résultats de W%	3
Tableau I.2 Récapitulatifs des résultats de ρ_{app} & ρ_{abs}	8
Tableau II.1 Méthode de calcul.....	13
Tableau II.2 la viscosité dynamique de l'eau en fonction de T°	18
Tableau III.1 Limite de liquidité	23
Tableau III.2 Limite de plasticité	25
Tableau IV.1 Résultats d'essai Proctor.....	29
Tableau V.1 Résultats de mesure de la densité in-situ	35

NOTATIONS

M_1 : Poids de la tare vide

M_2 : Poids de l'échantillon humide + tare

W : Teneur en eau

W_{nat} : Teneur en eau naturelle

M_s : Poids des grains solides

M_w : Poids de l'eau

$\gamma_{app} = \rho_{app}$: Masse Volumique Apparente.

V_{ap} : Volume Apparent

V_V : Volume des vides

ρ_{abs} : Masse Volumique Absolue

V_1 : Volume d'eau.

V_2 : Volume d'eau + granulats.

C_u : Facteur d'uniformité

C_c : Facteur de courbure

d_{60} : La valeur lue en abscisse pour le point de la courbe correspondant à l'ordonnée de 60 %

d_{30} : La valeur lue en abscisse pour le point de la courbe correspondant à l'ordonnée de 30 %

d_{10} : La valeur lue en abscisse pour le point de la courbe correspondant à l'ordonnée de 10 %

M_f : Le module de finesse

R : Refus

T : Tamisât

V : vitesse limite de chute des grains (m/s).

D : diamètre de la particule en (m).

γ_S : Poids volumique des grains solides en KN/m^3

γ_W : Poids volumique de l'eau : 10 KN/m^3 .

γ_h : Poids volumique du sol humide.

γ_d : Poids volumique du sol sec

μ : Viscosité dynamique

t : le temps de lecture (min)

H_R : la profondeur effective du centre de poussée du densimètre (cm)

R_c : La lecture corrigée

Cor : Correction

P : le pourcentage des grains de \emptyset inférieur à D

V_s : Volume de la suspension

m : Masse de la prise d'essai

ρ_s : Masse volumique des grains solides

ρ_w : Masse volumique de l'eau.

R_c : Lecture corrigée de densimètre à l'instant t .

R_t : Lecture de l'éprouvette témoin à l'instant t .

W_L : Limite de liquidité

W_P : Limité de plasticité

I_P : l'indice de plasticité

I_c : l'indice de consistance

S_r : Degré de saturation du sol



TP I

*Mesure des caractéristiques
pondérales (Masse Volumique &
la Teneur en eau)*

TP I : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique & la teneur en eau)

I.1 LA TENEUR EN EAU (NF P 94-050)

I.1.1 Rappel du cours

On désigne par teneur en eau la quantité d'eau contenue dans un échantillon de matière. Par exemple un échantillon de sol, de roche, de céramique ou de bois, la quantité étant évaluée par un rapport de poids humides sur poids secs.

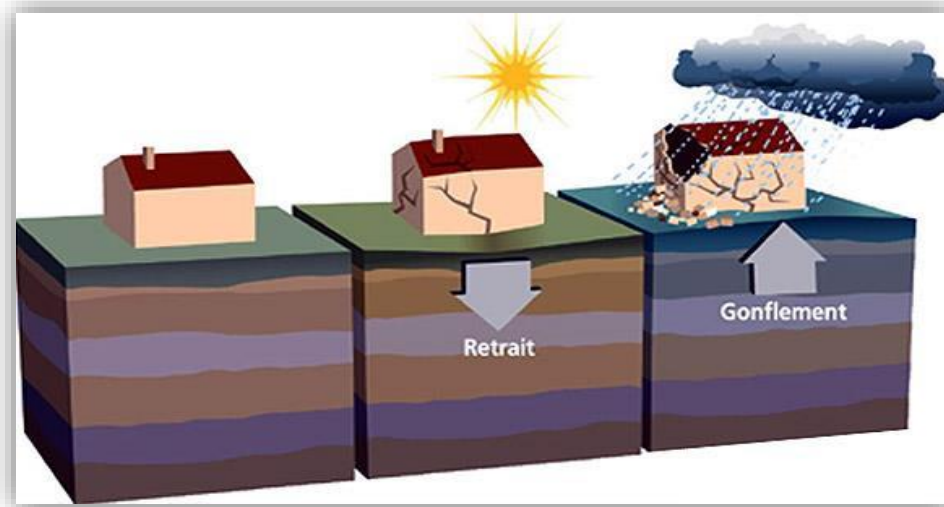


Figure I.1 Déformation d'un sol en fonction de la teneur en eau
(Source : iDropProject.com)

Un sol se déforme en fonction de la variation de la quantité d'eau qu'il contient. Maîtriser la quantité d'eau; revient à maîtriser la portance du sol et donc à protéger les ouvrages qui y sont construits.

L'essai de teneur en eau nous permet de connaître le pourcentage massique $W\%$ d'eau dans le sol étudié, c'est-à-dire la masse d'eau présente par rapport à 100 grammes de sol sec.

Pour les besoins du présent document, les définitions suivantes s'appliquent :

Teneur en eau pondérale d'un matériau (W) : rapport de la masse de l'eau évaporée lors de l'étuvage (M_w) sur la masse des grains solides (M_s), exprimé en pourcentage :

$$W(\%) = \frac{M_w}{M_s} \times 100$$

Teneur en eau naturelle (W_{nat}) d'un matériau : Teneur en eau déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur site, de transport et de conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle-ci.

TP I : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique & la teneur en eau)

MATERIELS & MATERIAUX UTILISES



Balance de précision



Les tares



Etuve de séchage



Argile de la Bentonite

I.1.2 Essai de détermination de la teneur en eau (Méthode)

La mesure de teneur en eau se déroule suivant les phases suivantes:

Phase 1 : Détermination du poids humide de l'échantillon

- ✚ Sur le plan du travail, disposer d'une balance type balance de cuisine et d'un récipient (la tare) à faire contenir l'échantillon.
- ✚ Peser la tare vide, soit M1.
- ✚ Placer l'échantillon à l'état naturel dans la tare et peser l'ensemble (échantillon + récipient), On obtient le poids humide de l'échantillon, soit M2. De préférence garder le fermé afin de garder l'humidité de l'échantillon.
- ✚ Noter le poids indiqué par la balance. On obtient le poids humide de l'échantillon.

Phase 2 : Détermination du poids sec de l'échantillon

- ✚ Mettre l'échantillon dans l'étuve et le chauffer (105°C pendant 24heures) pour les matières non organique, Identifier le avec une étiquette. une fois le récipient dans l'étuve n'oublier pas d'enlever le couvercle.
- ✚ Utiliser des gants pour éviter tout risque de brûlure.
- ✚ Après 24heures, laisser se refroidir l'échantillon sous surveillance.
- ✚ Peser l'échantillon après avoir remettre le couvercle, et noter le poids indiqué, c'est le poids sec, soit M3.

Phase 3 : Détermination de W%

- ✚ A l'aide d'une calculatrice, remplacer les valeurs de et dans la formule précédente et déterminer la teneur en eau du sol étudié (la bentonite) .

$$W(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 = \frac{M_w}{M_s} \times 100 = \frac{M2 - M1}{M3 - M1} \times 100$$

On répète la même opération plusieurs fois, et la teneur en eau obtenue à la fin de l'essai est la moyenne des teneurs en eau pour chaque opération.

Les données de l'essai sont récapitulées dans un tableau comme suit :

TP I : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique & la teneur en eau)

Tableau I.1 Récapitulatifs des résultats de W%

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS	TP: MDS			Document de référence NF P 94-050
TPN°:	DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU			
Groupe N° :				
Expression des résultats				
Essai N°	1	2	3	
Numéro du récipient				
Poids du récipient (g)				
Poids récipient + Sol humide (g)				
Poids du sol humide (g)				
Poids du récipient + Sol sec (g)				
Poids du sol sec (g)				
Poids de l'eau (g)				
Teneur en eau (%)				
Teneur en eau moyenne (%)				

I.1.3 Conclusion :

L'essai permet de connaître la teneur en eau du matériau à mettre en œuvre, afin de la corriger si on a besoin, en aérant le sol, ou en l'humidifiant. Le but de la correction d'une teneur en eau est de se rapprocher de la teneur en eau optimale qui permet d'obtenir un compactage maximum du matériau. (Voir l'essai Proctor)

TP I : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique & la teneur en eau)

I.2 LA MASSE VOLUMIQUE DES GRAINS (NF P 94-054)

I.2.1 Rappel du cours

I.2.1.1 La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à 105 ± 5 °C, notée ρ_{app} et exprimée en (gr/cm^3 ; kg/m^3 ; T/m^3).

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la masse volumique apparente des matériaux de construction selon leur dimension et leur dispersion:

a) Pour les matériaux solides : les roches naturelles, le béton, le bois ..., on peut faire des échantillons de forme géométrique (cubique, cylindrique, ..).

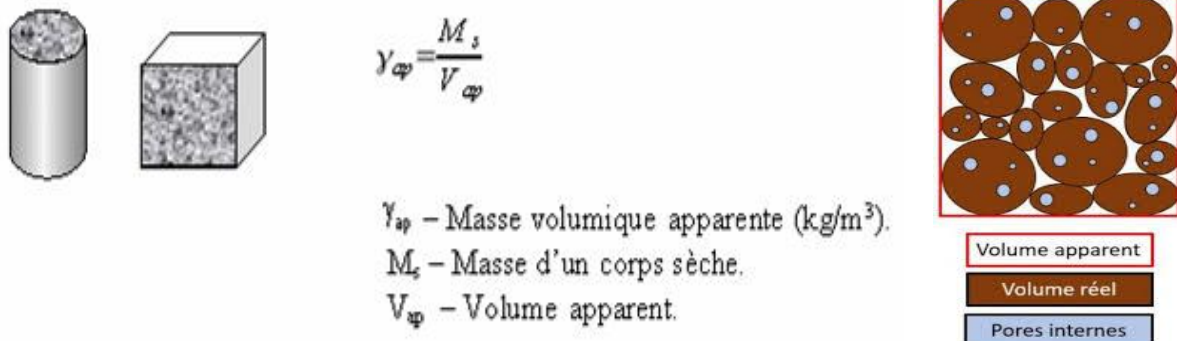


Figure I.2 Détermination de la masse volumique apparente pour les solides
(Source : <http://coursexosup.blogspot.com>)

b) Pour les matériaux incohérents (ensemble de grains – sable ou gravier).

La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standard (de volume connu).

TP I : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique & la teneur en eau)

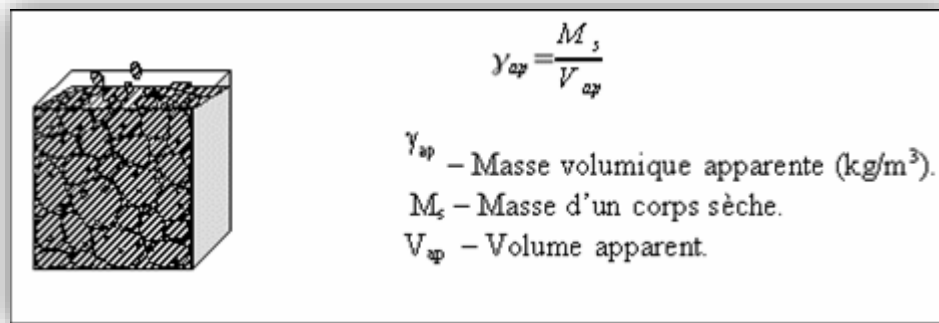


Figure I.3 Détermination de la masse volumique apparente pour les matériaux incohérents (Source : <http://coursexosup.blogspot.com>)

La masse volumique d'un ensemble de grains est fortement influencée par la composition granulométrique, la forme des grains, le degré de tassement ainsi que la teneur en eau lorsque les grains sont petits. La masse volumique apparente des sables ou des graviers peuvent varier entre 1400 à 1650 kg/m^3 .

I.2.1.2 La masse volumique absolue

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

Si les matériaux étudiés sont poreux, on doit les concasser et les broyer jusqu'à ce que la dimension des grains de matériaux (l'échantillon) devienne inférieure à 0,2 mm. Ceci afin d'éliminer les pores et les vides existants dans les matériaux. Ensuite, on verse l'échantillon dans un récipient, qui contient de l'eau pour pouvoir déterminer la masse volumique absolue (Voir la figure II.3)

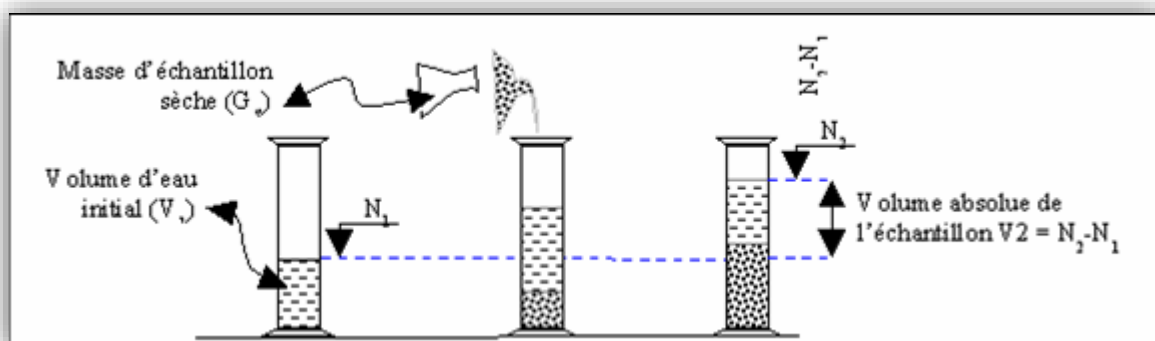


Figure I.4: Détermination de la masse volumique absolue (Source : <http://coursexosup.blogspot.com>)

TP I : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique & la teneur en eau)

MATERIELS & MATERIAUX UTILISES



Balance de précision



Pied coulissante



L'éprouvette en verre
+ Un moule



Etuve de séchage



Gravier & Sable humides

I.2.2 Détermination de la masse volumique apparente

La masse volumique apparente des granulats est nécessaire lors de l'établissement d'une composition de béton. Elle permet aussi d'estimer la masse d'une charge d'exploitation (exemple: hall de stockage de matériaux...), et sert également à déterminer les capacités réelles des engins de terrassement.

Mode opératoire : (voir la figure I.5)

- ✚ Déterminer le volume du récipient = V , soit $V=(\pi\phi^2/4)*h$
- ✚ Noter la masse du récipient propre et vide = M_0
- ✚ Verser les granulats, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel
- ✚ Araser à l'aide de la règle métallique, à laquelle on imprime un mouvement horizontal de va et vient.
- ✚ Noter la masse du récipient rempli = M_1
- ✚ Renouveler l'opération pour les autres matériaux.

A la fin de cet essai, on peut calculer la masse volumique apparente par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M_1 - M_0}{V}$$

Avec

ρ_{app} : Masse volumique apparente,
 M_0 : Masse du récipient vide,
 M_1 : Masse du récipient rempli.

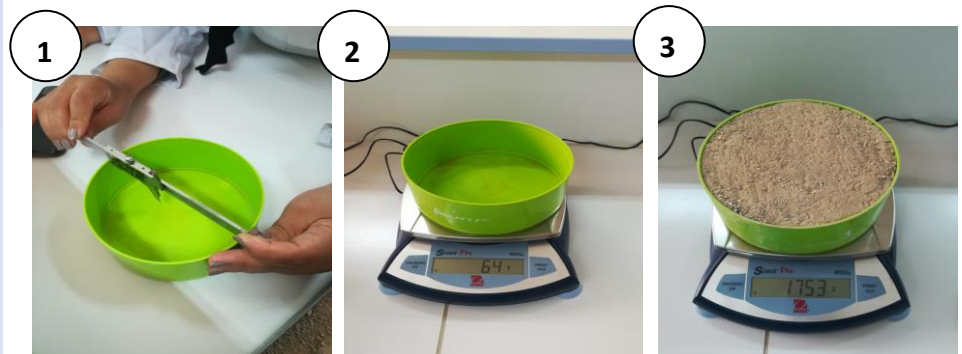


Figure I.5 Les étapes pour la détermination de la masse volumique apparente au laboratoire du CUM

TP I : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique & la teneur en eau)

MATERIELS & MATERIAUX UTILISES



Balance de précision



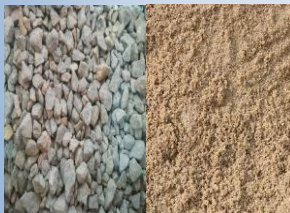
Pied coulissante



*L'éprouvette en verre
+ Un moule*



Etuve de séchage



Gravier & Sable humides

I.2.3 Détermination de la masse volumique absolue

Des caractéristiques intrinsèques des matériaux telles que la résistance à la compression et le module d'élasticité sont fonctions de la masse spécifique ρ_s ou masse volumique absolue.

Par ailleurs, la connaissance simultanée de la masse spécifique ρ_{abs} et de la masse volumique apparente ρ_{app} permet de calculer la compacité C et le pourcentage des vides V_v dans un échantillon.

Ainsi, un matériau tassé ou comprimé voit sa masse volumique apparente ρ_{app} tendre vers sa masse volumique spécifique ρ_{abs} .

Mode opératoire : (voir la figure I.6)

- + Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau, soit $V_1=300\text{cm}^3$.
- + Préparer un échantillon de granulats secs de masse M_1 (environ 204 g).
- + Verser l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir et provoquer le départ des vides (= air) en remuant le mélange avec la tige agitateur.
- + Noter le nouveau volume d'eau dans l'éprouvette V_2 , soit $V_2= 350\text{cm}^3$;
- + Renouveler l'opération pour les autres matériaux.

A la fin de cet essai, on peut calculer la masse volumique absolue par la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M_1}{V_2 - V_1}$$

Avec

ρ_{abs} : Masse volumique absolue,

M_1 : Masse de granulats sec,

V_1 : Volume d'eau.

V_2 : Volume d'eau + granulats.

Les données de l'essai sont récapitulées dans les tableaux ci-dessous

TP I : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique & la teneur en eau)

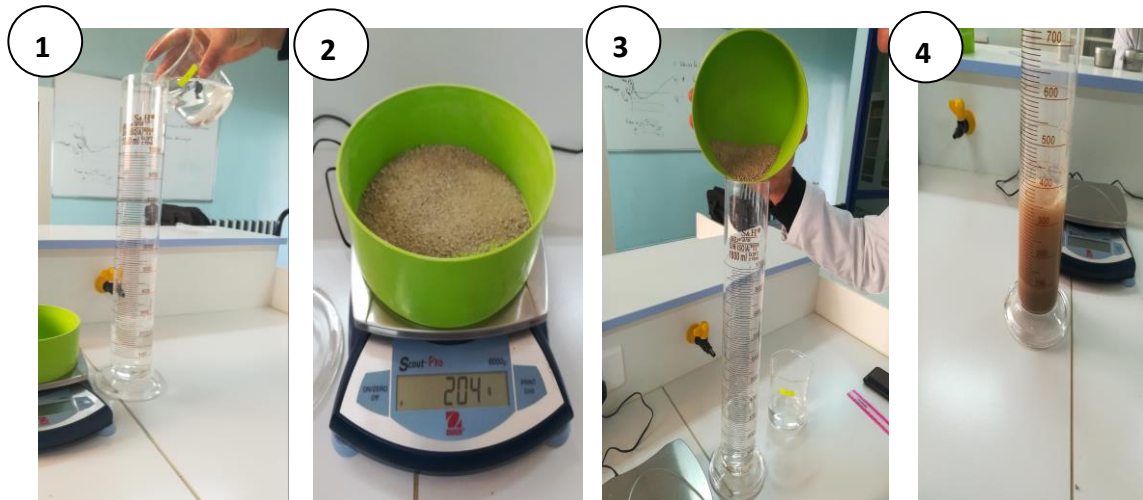


Figure I.6 Les étapes pour la détermination de la masse volumique absolue du Sable au laboratoire du CUM

Tableau I.2 Récapitulatifs des résultats de ρ_{app} & ρ_{abs}

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS	TP: MDS			Document de référence NF P 94-054
TPN°:	DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE			
Groupe N° :				
LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE				
Matériau	V	M₀	M₁	ρ_{app}
Gravier				
Sable				
LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE				
Matériau	M₁	V₁	V₂	ρ_{abs}
Gravier				
Sable				



TP II

*Analyse granulométrique
(par Tamisage & Sédimentométrie)*

TP II : Analyse granulométrique (par Tamisage & Sédimentométrie)

II.1 L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE A SEC (NF P 94-056)

II.1.1 Rappel du cours

On appelle granulat un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :

- ✓ des mortiers, des bétons,
- ✓ des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées,
- ✓ et des assises et des ballasts de voies ferrées

Les granulats sont appelés fillers, sables, gravillons, graves ou ballast suivant leurs dimensions. (Voir la figure 2.1)

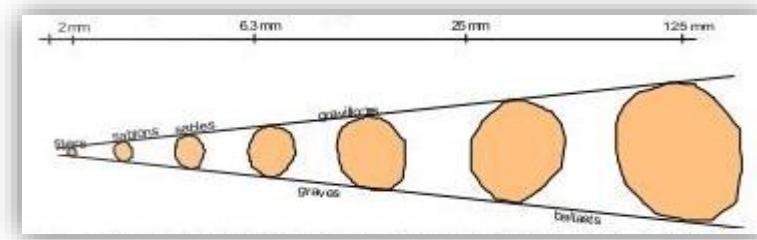


Figure II.1 Les différents types de granulat en fonction de leur diamètre
(source , <https://www.yumpu.com>)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des fillers.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

II.1.1.1 Principe de la méthode de l'analyse granulométrique :

L'opération de laboratoire qui permet de dresser la courbe granulométrique s'appelle l'analyse granulométrique. Lorsque les particules ont une dimension supérieure à 80 μm , cette opération est un simple tamisage, on utilise des tamis dont l'ouverture intérieure des mailles varie entre 40 mm et 80 μm . Par définition, le diamètre d'une particule est égal à l'ouverture intérieure des mailles du plus petit tamis la laissant passer.

On commence toujours par faire passer l'échantillon dans une étuve à 105° C (environ 24h) jusqu'à ce que sa masse soit devenue constante. Cette opération a pour but de déterminer la masse exacte de l'échantillon. On procède ensuite au tamisage proprement dit soit à sec, soit sous l'eau. Le tamisage à sec n'est précis que pour les matériaux sans cohésion comme les sables ou graviers.

TP II : Analyse granulométrique (par Tamisage & Sédimentométrie)

Dès qu'on est en présence d'un sol limoneux ou argileux, il faut recourir au tamisage sous l'eau. Le sol doit alors être mis à détremper pendant un temps suffisant pour désagréger les mottes et les agglomérats de terre et de cailloux. Cette opération peut durer de quelques minutes à plusieurs heures. Après le tamisage, on passe à nouveau les tamis et leur refus à l'étuve avant de peser.

Les résultats sont exprimés sous forme d'un graphique appelé *courbes granulométrique*. Cette courbe est l'un des indicateurs permettant de caractériser la distribution granulométrique du matériau.

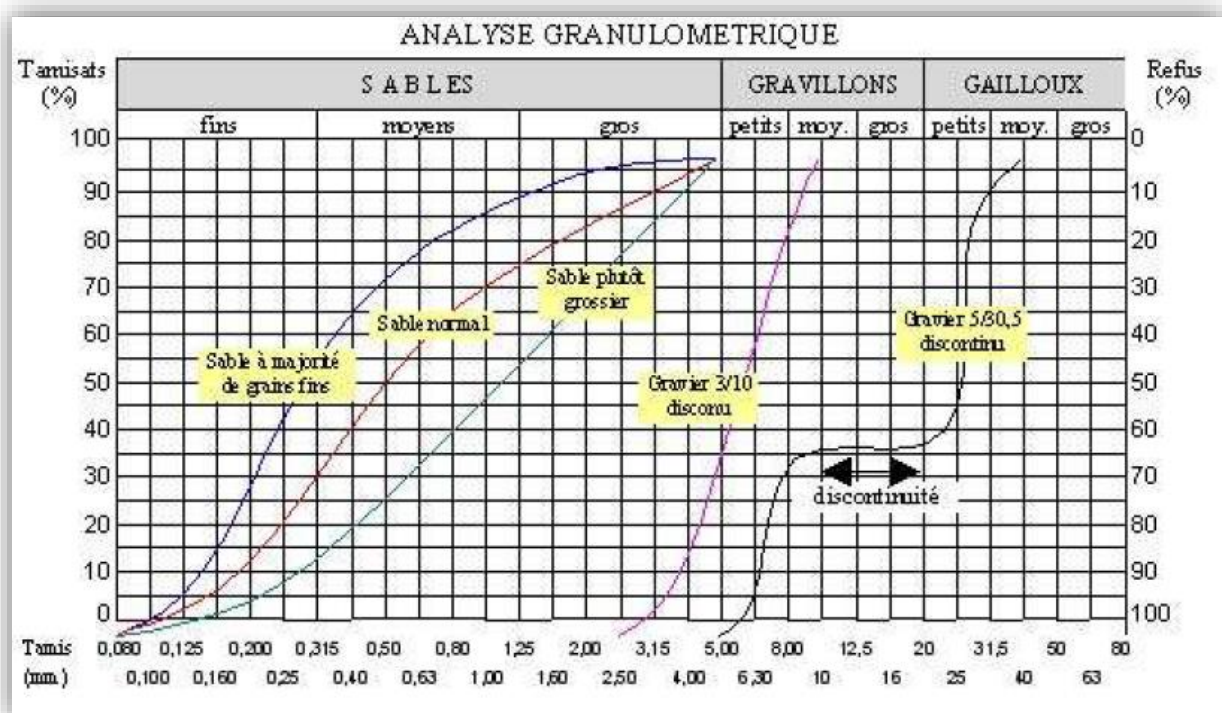


Figure II.2 Analyse granulométrique des différents cas

II.1.1.2 Quelques définitions :

Pour les besoins du présent document, les définitions suivantes s'appliquent :

- ☞ **Prise d'essai** : matériau soumis à l'essai.
- ☞ **Dimension nominale d'ouverture d'un tamis d** : dimension caractéristique de la maille carrée de côté d .
- ☞ **Refus sur un tamis** : partie du matériau retenu sur un tamis.
- ☞ **Tamisât ou passant** : partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.
- ☞ **Classe granulométrique** : ensemble des éléments dont les dimensions sont comprises entre deux ouvertures d de tamis définissant un intervalle.

TP II : Analyse granulométrique (par Tamisage & Sédimentométrie)

- ☞ **Pourcentage massique de refus** : rapport, exprimé en pourcentage, de la masse de matériau sec retenu par un tamis d'ouverture d , à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.
- ☞ **Pourcentage massique d'un tamisât** : rapport, exprimé en pourcentage, de la masse sèche du passant à travers un tamis d'ouverture d , à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.
- ☞ **Courbe granulométrique** : représentation du pourcentage massique p des différents tamisât en fonction de la dimension nominale d'ouverture des tamis.
- ☞ **Facteur d'uniformité** : sur le passant au tamis de 63mm, rapport des dimensions des mailles de tamis pour lesquels il y a respectivement 60% et 10% de passant :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

- ☞ **Facteur de courbure** : sur le passant au tamis de 63mm, rapport des dimensions des mailles de tamis défini par :

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}}$$

- ☞ **Le module de finesse (Mf)** : est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Par définition, c'est le centième (1/100) de la somme des refus cumulés (exprimés en pourcentage de masse) des tamis de la série suivante: 0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4.

$$Mf = [\Sigma \text{ Refus cumulé } (0,125 + 0,25 + 0,5 + 1 + 2 + 4)] / 100$$

Si :

- ☞ Pour **$1,8 \leq Mf \leq 2,2$** : le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- ☞ Pour **$2,2 < Mf \leq 2,8$** : le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités. **C'est Un bon sable.**
- ☞ Pour **$2,8 < Mf \leq 3,2$** : le sable manque de fin et le béton y perd de l'ouvrabilité. le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.
- ☞ Pour **$Mf > 3,2$** le sable est à rejeter.

TP II : Analyse granulométrique (par Tamisage & Sédimentométrie)

MATERIELS & MATERIAUX UTILISES



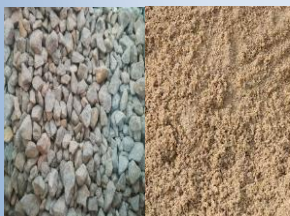
Balance de précision



Colonne de tamis



Agitateur mécanique



Gravier & Sable

II.1.2 TAMISAGE

Le matériau séché, de masse M , est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers haut.

En partie inférieure, on dispose un tamis de 0.08mm sur montant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui passant à travers cette tamis.

L'essai portera sur un échantillon de sable, et un échantillon de gravier.

II.1.2.1 Mode opératoire : (voir la figure II.3)

- ✚ Peser un échantillon de sol sec d'environ 2 kg ;
- ✚ Verser l'échantillon de sol sur le premier tamis et mettre le couvercle ;
- ✚ Vibrer énergiquement la colonne des tamis soit manuellement ou avec un agitateur mécanique pendant 5 minutes ;
- ✚ Laisser reposer quelques instants afin de permettre la décantation des particules les plus fines ;
- ✚ Procéder à la pesée de chaque tamis avec son refus puis au tamis seul (tare).

Les résultats de l'essai seront portés sur le tableau ci-après (Tableau II.1).



Figure II.3 Mode opératoire du Tamisage (gravier) au laboratoire du CUM

TP II : Analyse granulométrique (par Tamisage & Sédimentométrie)

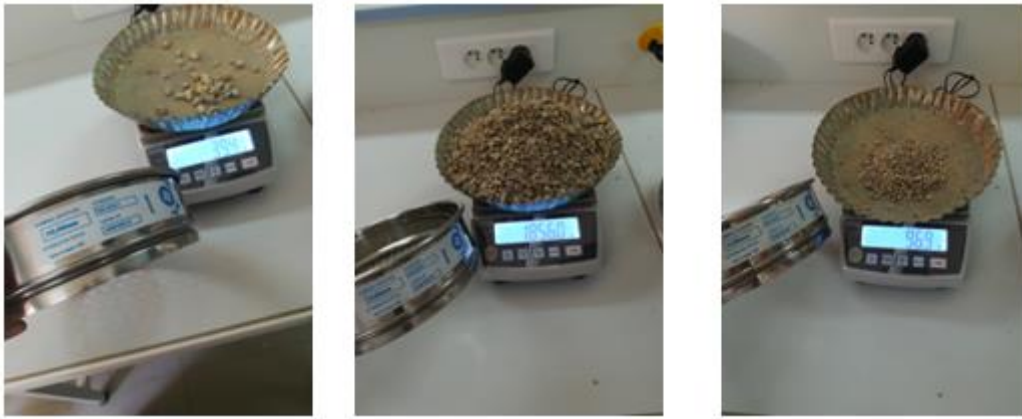


Figure II.4 les étapes de la pesée des tamis (gravier) au laboratoire du CUM

II.1.2.2 Méthode de Calcul

Pour le calcul des pourcentages et le tracé de la courbe granulométrique, le procédé est le suivant:

M est la masse totale de l'échantillon.

Tableau II.1 Méthode de calcul

N° Tamis	Ouverture des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisat cumulé (%)
1	M1	M1	$R1 = 100X \frac{M1}{M}$	$T1= 100-R1$
2	M2	M1+M2	$R2 = 100X \frac{M1 + M2}{M}$	$T2=100-R2$
3	M3	M1+M2+M3	$R3 = 100X \frac{M1 + M2 + M3}{M}$	$T 3=100-R3$

N.B

En principe, la somme des masses des refus de chaque tamis plus celle du dernier tamisât nous donne la masse initiale de l'échantillon du sol

TP II : Analyse granulométrique (par Tamisage & Sédimentométrie)

II.1.2.3 Travail demandé

- ✓ Compléter le tableau des calculs.
- ✓ Tracer la courbe granulométrique (voir annexe) .
- ✓ Déterminer les différents diamètres (**D10, D30 et D60**) et les deux coefficients **Cu** (coefficient d'uniformité) et **Cc** (coefficient de courbure), en sachant que : (**D10, D30 et D60**) : étant respectivement les diamètres correspondant à **10%, 30% et 60%** d'éléments de dimension inférieure.

Le coefficient d'uniformité ou de Hazen :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Le coefficient de courbure :

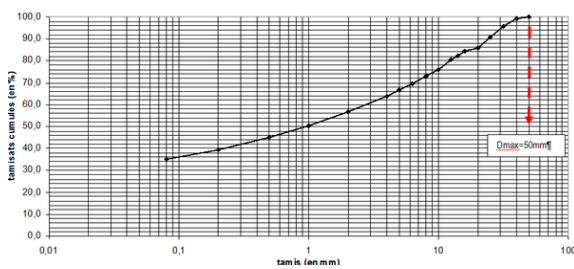
$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}}$$

- ✓ Nommer ce sol selon la classification **LCPC** (Laboratoire des Ponts et Chaussées, France) voir annexe de la Classification des sols grenus.
- ✓ Commenter vos résultats :

La granulométrie est dite **étalée** si $C_u \geq 6$;

La granulométrie est dite **uniforme** si $C_u < 6$

Exemple de granulométrie étalée



Exemple de granulométrie uniforme

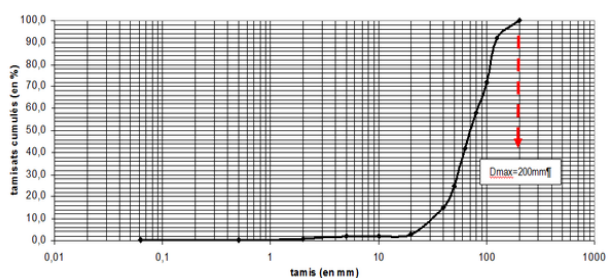


Figure II.5 Exemples de la granulométrie étalée et uniforme
(<http://wikydro.developpement-durable.gouv.fr>)

II.1.2.4 Conclusion

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur des granulates ,c'est un paramètre très important qui caractérise la qualité des granulates

TP II : Analyse granulométrique (par Tamisage & Sédimentométrie)

II.2 L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTOMETRIE

(NF P 94-057)

II.2.1 Rappel du cours

L'analyse granulométrique par sédimentométrie permet de déterminer la distribution en poids des particules fines (de diamètre inférieur à 80 μ) d'un sol en fonction de leurs dimensions donc elle complète l'analyse par tamisage.

La séparation par décantation consiste à déterminer les diamètres équivalents des particules sphériques en fonction de leur vitesse de chute dans un environnement visqueux afin d'obtenir le tracé d'une courbe Granulométrique pour des particules inférieure à 0,08mm.

II.2.1.1 Principe de l'essai

Dans un liquide au repos, des grains de diamètres différents sédimentent à des vitesses différentes.

La sédimentométrie se base sur la loi de STOKES exprimant la relation entre la vitesse-limite de sédimentation (V) et le diamètre (D) d'une particule solide sphérique. En l'appliquant à des grains de forme quelconque, on n'obtiendra que des diamètres équivalents.

Cette loi s'exprime par :

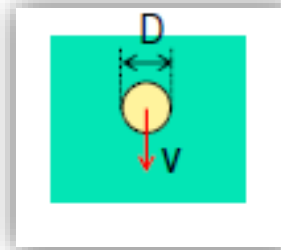


Figure II.6 Schéma d'une particule du sol fin

V : vitesse limite de chute des grains (m/s).

D : diamètre de la particule en (m).

γ_s : Poids volumique des grains solides en KN/m³ (valeur moyenne 26,5 KN/m³).

γ_w : Poids volumique de l'eau : 10 KN/m³.

μ : Viscosité dynamique de la solution en Pa.s.

II.2.1.2 Appareillage

- Deux éprouvettes de 1 litre ;
- Un densimètre ;
- Un agitateur mécanique ;
- Un thermomètre ; chronomètre
- Un agent défloculent (hexamétaphosphate de sodium NaPO₃ ;

TP II : Analyse granulométrique (par Tamisage & Sédimentométrie)

Le densimètre

Un densimètre sert à mesurer la densité relative d'un liquide, à savoir le rapport de la densité du liquide sur la densité de l'eau. Sur un densimètre, la valeur de l'eau distillée est 1.

Le principe de fonctionnement du densimètre est basé sur une loi de la physique: la poussée d'Archimède. Selon cette dernière, tout corps plongé dans un liquide reçoit une poussée vers le haut dont la force est égale au poids du volume du liquide déplacé.

○ L'utilisation du densimètre -Conseils d'utilisation

- ✓ prendre un échantillon de solution d'une quantité suffisante pour remplir le contenant de telle façon à permettre une lecture qui ne sera pas en plongée, mais bien le plus près de l'horizontal possible;
- ✓ il doit bien flotter verticalement et ne pas coller aux parois.
- ✓ utiliser un densimètre bien nettoyé; des résidus sur le densimètre ajouteraient du poids à celui-ci, qui s'enfoncerait plus dans la solution pour enfin sous-évaluer la concentration;
- ✓ noter la lecture faite à la base du ménisque formé par le liquide autour du densimètre (voir figure II.7), mais dans une suspension qui n'est pas transparente, effectuer cette lecture au sommet du ménisque et corriger la ensuite.

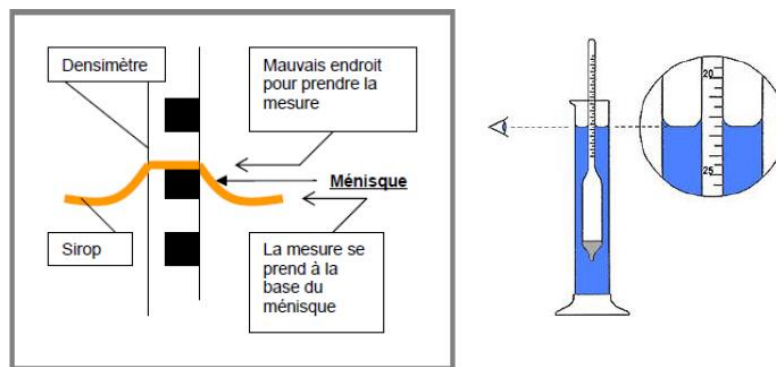


Figure II.7 Illustration de la prise de mesure sous le ménisque

Le défloculant

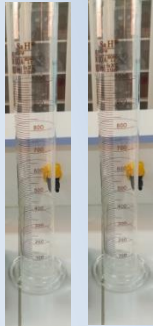
La plupart des normes* ont adopté « l'hexamétaphosphate de sodium » comme défloculant, à la suite des plusieurs travaux** qui ont montré que :

- ✓ ce composé assure la meilleure dispersion de pratiquement tous les sols (sauf, peut-être, les sols latéritiques***) ;
- ✓ son effet défloculant est peu sensible à sa concentration, alors que la concentration optimale d'autres défloculants dépend du sol étudié.

*Etats-Unis, Grande-Bretagne, Suisse, France et Pays-Bas.

Travaux de Tyner, Winter Meyer et Kinter et Chu et Davidson * Les sols latéritiques sont des sols maigres, lessivés et appauvris en silice et en éléments nutritifs fertili-sants (Ca, Mg, K, Na). La latérite (du latin later, brique) –Wikipédia

MATERIELS & MATERIAUX UTILISES



Deux éprouvettes graduées de 1 L



Un densimètre



Un agitateur mécanique



Chronomètre & thermomètre

II.2.2 LA SEDIMENTOMETRIE

II.2.2.1 Préparation de l'échantillon

La procédure consiste à prendre 60 cm³ de défloculant dilué dans 400 cm³ de l'eau distillée pour obtenir 500 cm³ de suspension. On ajoute 40 gr de sol sec récupéré du tamisât à 80 µm (fond du tamis). L'ensemble sera soumis à l'agitation mécanique pendant 3mn environ. Et complétée avec de l'eau distillée jusqu'à 1000 cm³.

II.2.2.2 L'essai

- + La suspension est agitée manuellement pour la rendre homogène;
- + Une fois qu'on arrête l'agitation manuelle, on retire l'agitateur, et au même temps on déclenche le chronomètre, par convention, cet instant indique le début de l'essai.
- + Introduire aussitôt le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le décrochement du chronomètre (t=0) et réaliser 4 lectures successives (à 30s, 1mn, 2mn, 5mn) sans retirer le densimètre ;
- + Retirer le densimètre et l'introduire dans l'éprouvette témoin pour nettoyer. Réaliser ensuite les lectures aux temps indiqués en introduisant le densimètre dans la suspension 30s avant chaque lecture. Ce temps est suffisant pour stabiliser le densimètre. Les lectures sont normalement réalisées à 30s, 1mn, 2mn, 5mn, 10mn, 20mn, 40mn, 80mn, 240mn et éventuellement à 24h. Après chaque lecture dans la suspension il faut réaliser une lecture de température dans l'éprouvette témoin.

II.2.2.3 Réalisation des mesures :

- Pour les 3 premières lectures (30 sec ; 1 min ; 2 min), le densimètre n'est pas retiré de la suspension.
- Après la 3ième lecture, une fois celle-ci effectuée, et ça sera le cas pour le reste des lectures, le densimètre est retiré de la suspension, nettoyer et ranger soigneusement.
- Pour reprendre les lectures et à chaque fois, le densimètre est introduit dans la suspension environ 30s avant la lecture.

TP II : Analyse granulométrique (par Tamisage & Sédimentométrie)

II.2.2.4 Calcul et résultats

Lors de la décantation de grains solides en suspension dans l'eau, les grains les plus gros chutent plus rapidement que les plus petits. La vitesse de chute est directement liée à leur diamètre (loi de Stokes).

***Calcul du diamètre des particules non décantées

Le diamètre des particules qui sont en suspension est donné par :

$$D = F \sqrt{\frac{H_R}{t}}$$

Avec

$$F^2 = \frac{18\mu}{\gamma_s - \gamma_w}$$

Où t : est le temps de lecture en minute.

H_R : est la profondeur effective du centre de poussée du densimètre en centimètre. Elle est donnée par :

$$H_R = H - 100 \times H_1 (R_c - R_t) - H_c$$

Avec :

H = hauteur séparant le milieu du bulbe du densimètre de la graduation 1,0000 ($H = 22,2$ cm)

H_1 = la distance séparant la graduation 1,0000 de la graduation 1,0100 ($H_1 = 3,8$ cm)

R_c = la lecture du densimètre (sommet du ménisque) à l'instant t

R_t = la lecture du densimètre dans l'éprouvette témoin

H_c : est le déplacement de la suspension dû à l'introduction du densimètre. Elle est prise (par convention) égale à 0 pour les 3 premières lectures et égale à 1,4 cm pour la suite.

***La viscosité

Le tableau ci-dessous donne la viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température :

Tableau II.2 la viscosité dynamique de l'eau en fonction de T°

Température [°C]	Viscosité [10^{-3} Pa.s]	Température [°C]	Viscosité [10^{-3} Pa.s]	Température [°C]	Viscosité [10^{-3} Pa.s]
12	1,235	18	1,053	24	0,9111
13	1,202	19	1,027	25	0,8904
14	1,169	20	1,002	26	0,8705
15	1,139	21	0,9779	27	0,8513
16	1,109	22	0,9548	28	0,8327
17	1,081	23	0,9325	29	0,8148

TP II : Analyse granulométrique (par Tamisage & Sédimentométrie)

*** Corrections

La lecture effectuée sur le densimètre à un instant t doit intégrer un certain nombre de corrections :

- ✓ Ct : la correction due aux variations de la température
- ✓ Cm : la correction due à la hauteur du ménisque
- ✓ Cd : la correction due au défloculant
- ✓ R : Nombre de graduation*0.0005 (0.0005 étant la valeur d'une graduation)

La lecture corrigée prend en compte l'ensemble de ces corrections et s'exprime par :

$$R_c = R + Cor \quad \text{avec} \quad Cor = C_t + C_m + C_d$$

N. B. *Le diamètre D déterminé par la loi de Stokes est un diamètre de particule sphérique. Les grains ayant a priori une forme quelconque, le diamètre calculé est dit équivalent.*

*** Calcul du pourcentage des particules non décantées (non sédimentées)

On exprime le pourcentage « p » des grains de diamètre inférieur à « D » qui sont encore en suspension à l'instant t par :

$$P = \left[1000 \frac{V_s \rho_s}{m \rho_s - \rho_w} \rho_w \right] (R_c - R_t)$$

Où :

- V_s : Volume de la suspension
- m : Masse de la prise d'essai
- ρ_s : Masse volumique des grains solides
- ρ_w : Masse volumique de l'eau.
- R_c : Lecture corrigée de densimètre à l'instant t.
- R_t : Lecture de l'éprouvette témoin à l'instant t.

Chaque mesure (D_i,P_i) représente un point de la courbe granulométrique.



TP III

*Mesure des paramètres de consistance
(Limites d'ATTERBERG)*

TP III : Mesure des paramètres de consistance (Limites d'ATTERBERG)

MESURE DES PARAMETRES DE CONSISTANCE (LIMITES D'ATTERBERG)

(NFP 94-051)

III.1 Rappel du cours

III.1.1 Définition

Dans les sols fins, ou cohérents, où la surface spécifique des grains (rapport de la surface du grain à son volume) est grande, l'eau joue un rôle très important par son influence sur les forces qui s'exercent entre les particules. Selon la valeur de la teneur en eau, les propriétés mécaniques d'un sol fin évoluent depuis celle d'un solide (w faible) jusqu'à celle d'un liquide (w élevé). Entre ces deux états, pour les teneurs en eau moyennes, le sol présente des propriétés plastiques, c'est à dire qu'il est capable de se déformer rapidement et considérablement sans se casser, se fendiller ou changer de volume et sans présenter de déformation réversible notable.

Les limites de liquidité et de plasticité (Limites d'Atterberg) sont utilisées essentiellement pour l'identification des sols. La limite de retrait est utilisée dans certaines régions où le sol subit de fortes variations volumiques quand la teneur en eau change. Les essais de détermination de la limite de liquidité et de plasticité sont aussi utilisés pour la détermination du potentiel de variation volumique des sols.

La limite de liquidité est parfois utilisée pour estimer les tassements dans des problèmes de consolidation.

Pour la détermination des limites de liquidité et de plasticité, c'est TERZAGHI en 1925 qui a proposé des techniques de mesure, et c'est CASAGRANDE en 1933 qui a développé un appareil standard pour la mesure de la limite de liquidité. Plus tard (1940), CASAGRANDE a utilisé la limite de liquidité et l'indice de plasticité comme base pour la classification des sols.

Ces limites sont mesurées sur la fraction du sol qui passe à travers le tamis de diamètre 0,4mm.

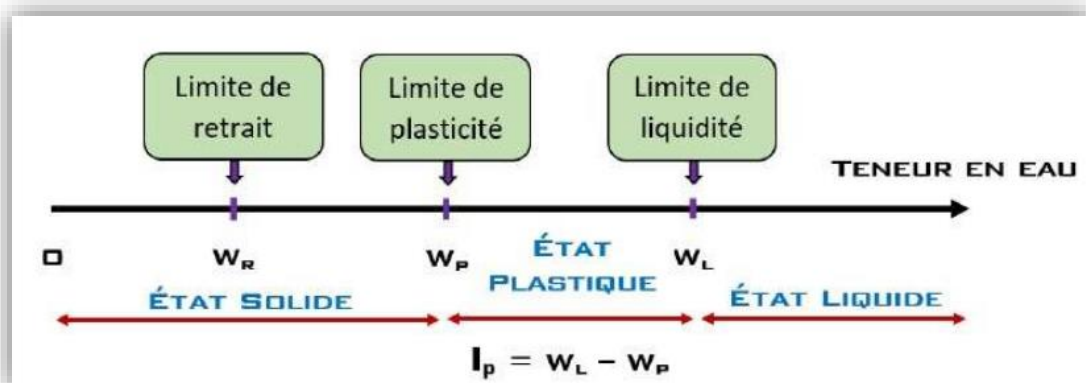


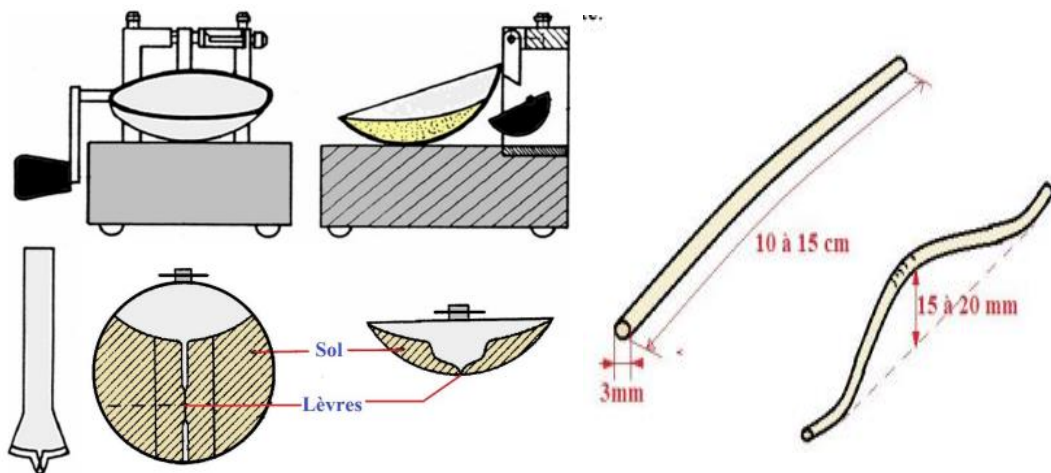
Figure III.1 Représentation des limites d'ATTERBERG

TP III : Mesure des paramètres de consistance (Limites d'ATTERBERG)

III.1.2 Principe de l'essai

L'essai s'effectue en deux phases :

- **Limite de liquidité W_L** : recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se referme sur 1cm lorsque celle-ci et son contenu sont soumis à des chocs répétés (**Appareil de CASAGRANDE**). voir la figure **III.2a**
- **Limité de plasticité W_P** : recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure (« petits rouleaux »). voir la figure **III.2b**



a. Coupelle de Casagrande pour la détermination de la limite de liquidité

b. Rouleaux pour la détermination de la limite de plasticité.

Figure III.2 Le principe de la détermination des limites d'ATTERBERG

On définit ensuite, l'indice de plasticité I_P comme étant la différence entre la limite de plasticité et liquidité. Celui-ci représente l'étendue du domaine plastique. Et calculer également l'indice de consistance I_c .

Finalement, Classifier le sol selon l'abaque de CASAGRANDE pour les sols fins (voir les annexes)

**MATERIELS &
MATERIAUX UTILISES**



Appareil de CASAGRANDE



Une étuve de séchage



Outil à rainure & spatule



Balance de précision & tares



La bentonite

III.2 LIMITE DE LIQUIDITE

III.2.1 Mode opératoire (voir la figure III.3)

- + Prélever 100g de sol sec passant au tamis de 0.4 mm.
- + Humidifier à une teneur en eau élevée de manière à obtenir une pâte homogène et presque fluide en malaxant vigoureusement.
- + Enlever la coupelle de son support et placer environ 70g de pâte répartie en plusieurs couches dont l'épaisseur totale au centre doit être de l'ordre de 15 à 20 mm (Cette pâte étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air).
- + Partager la pâte en deux suivant le plan de symétrie de la coupelle et de son attache à l'aide de l'outil à rainure en le tenant perpendiculairement à la coupelle en présentant sa partie biseautée face à la direction du mouvement.
- + Fixer délicatement la coupelle sur le support métallique de l'appareil de CASAGRANDE.
- + Faire subir une série de chocs réguliers en tournant la manivelle à une cadence de 2 tours par seconde environ.
- + Compter le nombre de coups nécessaires pour que les lèvres se rejoignent sur une longueur de 1cm environ.
- + Prélever deux échantillons de chaque côté des lèvres du sillon et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées
- + Peser immédiatement et mettre à l'étuve afin de mesurer la teneur en eau.
- + Re-homogénéiser le sol et le sécher un peu puis reprendre les opérations de 3 à 7. Il faut au moins trois essais avec un nombre de coups croissant et de préférence bien étalé entre 15 et 35.

NB:

- ☞ *La fermeture de la rainure doit se produire par affaissement de la pâte dans sa masse et non par glissement sur la paroi de la coupelle.*
- ☞ *Si N est inférieur à 15, le processus est recommencé avec un matériau plus sec et homogénéisé à nouveau.*
- ☞ *Si N est supérieur à 35, l'opération est renouvelée sur un prélèvement de pâte auquel a été ajouté un peu d'eau distillée ou déminéralisée.*
- ☞ *L'essai n'est poursuivi que lorsque N est compris entre 15 et 35.*

TP III : Mesure des paramètres de consistance (Limites d'ATTERBERG)



Figure III.3 Mode opératoire de l'essai de limite de liquidité au laboratoire du CUM

III.2.2 Calcul & résultat (voir le tableau III.1)

Les différents résultats obtenus sont récapitulés sur le tableau ci-dessous.

Tableau III.1 Limite de liquidité

Essai	1er essai	2ème essai	3ème essai
Nombre de coups			
Poids de la tare (g)			
Poids total humide (g)			
Poids total sec (g)			
Poids de l'eau (g)			
Poids du sol sec (g)			
Teneur en eau (%) **			
Moyenne W%			

** Teneur en eau : $W = M_w / M_s$

M_w : Poids de l'eau

M_s : Poids du sol sec

On portera sur un graphe les points correspondants aux différents essais et on déterminera la teneur en eau correspondant à 25 coups, c'est la limite de liquidité.

**MATERIELS &
MATERIAUX UTILISES**



Plan du travail



Une étuve de séchage



Spatule



Balance de précision & tares



Le sol utilisé

III.3 LIMITE DE PLASTICITE

III.3.1 Mode opératoire (voir la figure III.4)

La procédure pour la détermination de la limite de plasticité est la suivante :

- + Prendre un échantillon séché du sol fin
- + Y ajouter un peu d'eau et homogénéiser le mélange
- + Former une boulette à partir de la pâte préparée.
- + La rouler à la main sur le marbre de façon à ce qu'elle s'amincisse progressivement formant un rouleau de 3 mm de diamètre, 10 à 15 cm de longueur.
- + Il faut réaliser au moins deux essais pour la limite de plasticité.

NB:

- ☞ *La cadence du mouvement de la main doit être régulière. L'amincissement du rouleau se fait de manière continue et sans effectuer de coupure dans le sens de sa longueur.*
- ☞ *Le rouleau au moment où il atteint un diamètre de $3.0\text{mm} \pm 0.5\text{mm}$, doit avoir environ 10 cm de longueur et ne doit pas être creux.*

Trois cas peuvent se présenter :

- Le bâtonnet confectionné commence à se fissurer quand il atteint une longueur de 10 cm et un diamètre de 3 mm . Dans ce cas, le sol est à la limite de plasticité et il faut **il faut mesurer sa teneur en eau**.
- Le sol est encore fluide et vous n'arrivez pas à confectionner le bâtonnet. Il faut sécher un peu le matériau.
- Le bâtonnet commence à se fissurer trop tôt, le matériau est sec. Il faut l'humidifier un peu.



Figure III.4 Mode opératoire de l'essai de limite de Plasticité au laboratoire du CUM

TP III : Mesure des paramètres de consistance (Limites d'ATTERBERG)

III.3.2 Calcul & résultat (voir le tableau III.2)

Tableau III.2 Limite de plasticité

Essai	1er essai	2ème essai
Poids de la tare (g)		
Poids total humide (g)		
Poids total sec (g)		
Poids de l'eau (g)		
Poids du sol sec (g)		
Teneur en eau (%) **		
Moyenne W%		

** Teneur en eau : $W = M_w / M_s$

M_w : Poids de l'eau

M_s : Poids du sol sec

Pour le calcul de la limite de plasticité, on fera la moyenne des teneurs en eau deux essais.

III.4 Conclusion

Les tests d'ATTERBERG, faciles à effectuer, permettent de calculer des limites de plasticité et de liquidité assez précises, et très importantes pour la détermination et classification du type de sol selon l'indice de consistance :

- $I_c > 1$ → **Sol en état solide** (les grains sont encore plus proches les uns des autres et arrivent même en contact en chassant l'eau adsorbée ; les frottements internes sont alors importants);
- $0 < I_c < 1$ → **Sol en état plastique** (les grains se sont rapprochés et ont mis en commun les couches adsorbées ; lorsqu'il y a mouvement, les grains restent attachés les uns aux autres sans éloigner) .
- $I_c < 0$ → **Sol en état liquide** (les grains sont indépendants les uns des autres et leurs mouvements relatifs sont aisés)

Limite de liquidité (Wl)	Limite de plasticité (Wp)	Teneur en eau (W%)
Indice de plasticité (Ip)		Indice de consistance (Ic)
Observation		



TP IV

*Mesure des caractéristiques de
compactage et de portance*

TP IV : Mesure des caractéristiques de compactage et de portance

ESSAIS PROCTOR & CBR (NFP 94-093)

IV.1 Rappel du cours

IV.1.1 Définition

Le compactage est l'ensemble des procédés mécaniques (charge, vibration, chocs), qui mènent à la diminution du volume et l'amélioration la densité d'un sol. La texture du sol est ainsi resserrée ce qui élève la compacité du sol, améliore sa capacité portante et limite les déformations et tassements. Les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les plates-formes et remblais routiers, les digues des barrages en terre et les pistes d'atterrissage.

Le compactage se produit que par l'élimination des vides remplis d'air qui existent dans le sol à son état initial ; par conséquent la teneur en eau (W) du sol ne sera donc pas modifiée. Le poids volumique du sol (γ_h), et le poids volumique sec (γ_d) seront alors augmenté [$\gamma_d = \gamma_h / (1+W)$]. Ce paramètre (γ_d) doit être suivi comme conséquence de l'opération de compactage. Cette grandeur garde sa signification même si le sol considéré n'est pas sec.

Tout sol est caractérisé par un poids volumique naturel γ_h et par une teneur en eau W , donc, par un poids volumique sec γ_d calculé au moyen de la formule [$\gamma_d = \gamma_h / (1+W)$]. Il suffit de considérer qu'il s'agit du poids volumique (γ_d) qui caractériserait le sol s'il était sec.

Il existe deux essais Proctor :

- L'essai **Proctor Normal (ou standard)** est appliqué pour les sols qui ont **un diamètre maximum < à 5mm**, réservé aux **couches de forme et de remblais**, et réalisé avec la dame normale (petite dame), quel que soit le moule,
- L'essai **Proctor Modifié (C.B.R)** est appliqué pour les sols qui ont **un diamètre maximum < à 20mm**, utilisé pour **les couches d'assise** (les routes nationales), et réalisé avec la dame modifiée (grande dame)

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

1.1 Principe de la manipulation:

L'essai Proctor permet de tracer la courbe du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau, pour une énergie de compactage donnée. Cette courbe permet de mettre en évidence un optimum de poids volumique.

TP IV : Mesure des caractéristiques de compactage et de portance

IV.2 ESSAI PROCTOR

MATERIELS & MATERIAUX UTILISES



Moules & dames : Proctor et
CBR



Une étuve de séchage



Spatule



Balance de précision & tares



Le sol utilisé (la bentonite)

IV.2.1 Mode opératoire (voir la figure IV.1 & IV.2)

- ✚ Préparer plusieurs Kg de sol sec dont le diamètre des particules <5mm ; le matériau doit être mis dans l'étuve jusqu'à un état hydrique suffisamment sec pour entamer l'essai ;
- ✚ Peser le moule PROCTOR vide, sans sa hausse, soit M_0 sa masse ;
- ✚ Placer la hausse en la fixant au moule ;
- ✚ Humidifier 2,5 Kg de sol (la bentonite dans notre cas) sec avec un certain pourcentage d'eau (la teneur en eau doit être inférieure à la teneur en eau optimale) et malaxer le tout afin que tous les grains soient mouillés ;
- ✚ Monter correctement le corps du moule, l'embase et la rehausse. Et lubrifier l'intérieur par de la graisse ou l'enrobé par un film en plastique, pour que l'on puisse facilement retirer l'échantillon compacté (voir la figure IV.1) ;
- ✚ Compacter le sol en trois couches à peu près égales avec 25 coups par la dame PROCTOR normal. Les coups doivent être uniformément répartis sur toute la surface (voir l'annexe du compactage) . Chaque couche aura une masse de 700g environ ;
- ✚ Après le compactage de la dernière couche, enlever la hausse, raser l'échantillon jusqu'au bord du moule ;
- ✚ Peser le moule + l'échantillon du sol compacté, soit M_1 cette masse ;
- ✚ Pour déterminer la teneur en eau réelle du sol, on prélève deux échantillons de la partie supérieure et inférieure du sol compacté qu'on dépose dans deux tares numérotées et pesées. Les échantillons et les tares sont pesés et étuvés à 105°C pendant 24 h. après 24 h, les peser à sec ;
- ✚ Démouler le sol compacté ;
- ✚ Pour les autres essais, humidifier toujours 2,5 Kg de sol en augmentant la quantité d'eau d'humidification; rajouter 2 % de teneur en eau et bien homogénéiser le sol.
- ✚ Refaites l'opération (de l'étape 6 à 10) 5 à 6 fois afin de tracer une courbe sous forme de **cloche**.



Préparer le sol sec dont le
diamètre des particules <5mm

Peser 2,5 Kg de ce sol

Humidifier 2,5 Kg de ce sol

Figure IV.1 Préparation du sol pour l'essai de compactage au laboratoire du CUM

TP IV : Mesure des caractéristiques de compactage et de portance

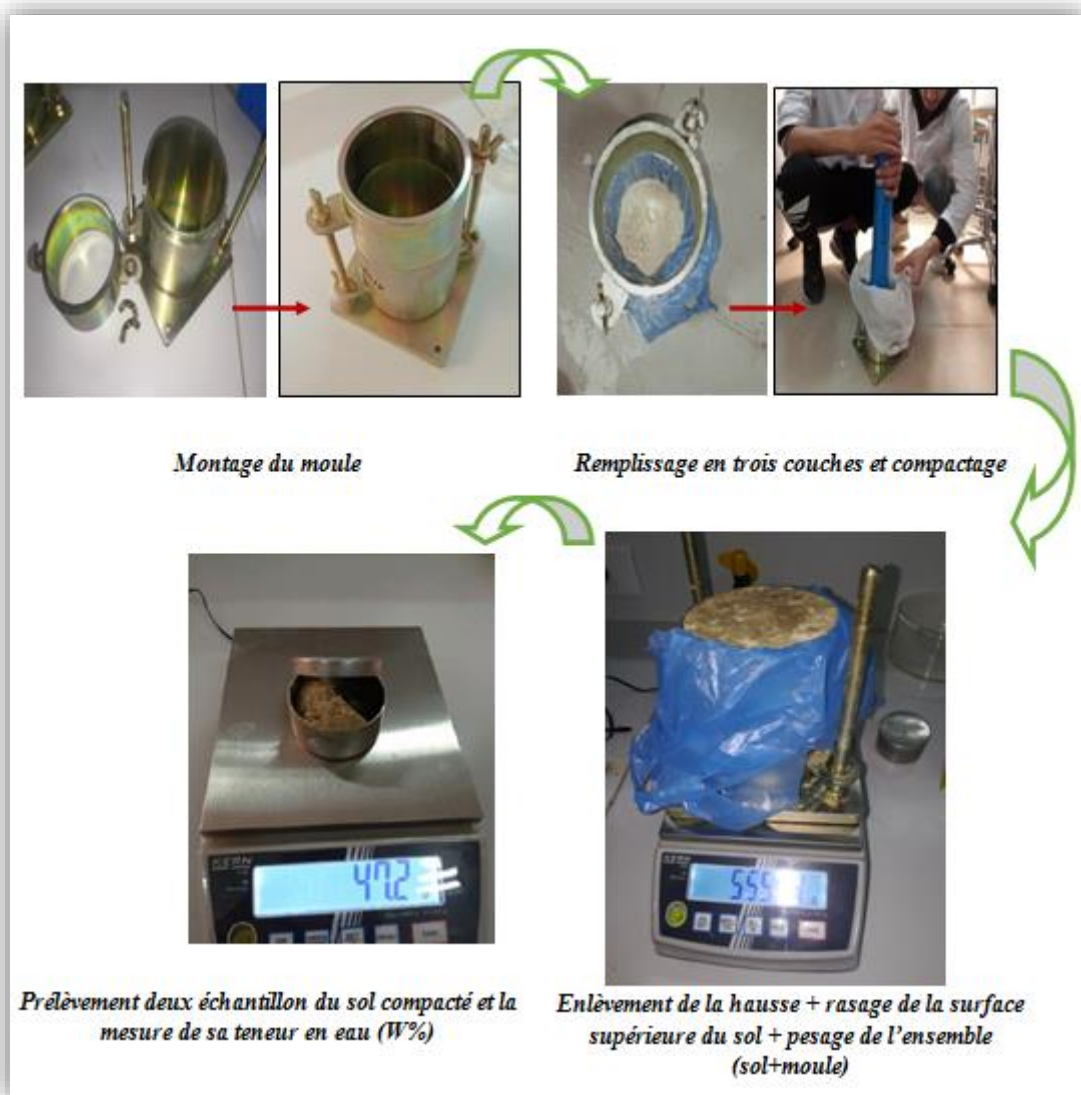


Figure IV.2 Mode opératoire de l'essai de Proctor au laboratoire du CUM

3. Calcul et résultats :

On calcul :

- ✓ La teneur en eau de chaque échantillon prélevé (w) ;
- ✓ Le poids volumique du sol humide (γ_h) ;
- ✓ Le poids volumique du sol sec (γ_d) ;

TP IV : Mesure des caractéristiques de compactage et de portance

Tableau IV.1 Résultats d'essai Proctor

Essai Proctor			Les Tares			
	M_0	M_1	M_t (h)	M_t (h)	M_t (s)	M_t (s)
1^{er} Essai						
2^{ème} Essai						
3^{ème} Essai						
4^{ème} Essai						
5^{ème} Essai						

$M_t(h)$: masse (Tare + Sol humide)

$M_t(s)$: masse (Tare + Sol sec) Après étuvage.

- 1) On calcul la masse humide nette de l'échantillon W_h a partir de la formule suivante :

$$W_h = \text{Masse du moule plein} - \text{Masse du moule vide}$$

- 2) Calcul de poids volumique humide γ_h de l'échantillon : On applique la formule suivante :

$$\gamma_h = \frac{W_h}{V_{moule}}$$

$$V_{moule} = \frac{\pi \cdot \Phi^2}{2} \cdot H = \frac{\pi \cdot 10,16^2}{2} \cdot 11,7$$

- 3) Calcul de poids volumique sèche γ_d de l'échantillon: On applique la formule suivante :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{W(\%)}$$

- 4) On représente les ponts relatifs aux essais effectués en portant :

- ✓ Sur l'axe des abscisses la teneur en eau W en %
- ✓ Sur l'axe des ordonnées le poids volumique du sol sec γ_d en (KN/m³)

TP IV : Mesure des caractéristiques de compactage et de portance

On trace ensuite la courbe Proctor, le plus près que possible des points expérimentaux.

La teneur en eau optimale et le poids volumique du sol sec maximal sont respectivement l'abscisses et l'ordonnées du point sommet de la courbe Proctor avec laquelle on peut représenter la courbe de saturation du sol ($S_r=100\%$).

Le degré de saturation S_r exprimé en pourcentage est déterminé à partir de la formule suivante :

$$S_r = \frac{W}{\gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)} 100$$

Où : γ_w est la masse volumique de l'eau

γ_d est poids volumique du sol sec

γ_s est poids volumique des particules solides du sol

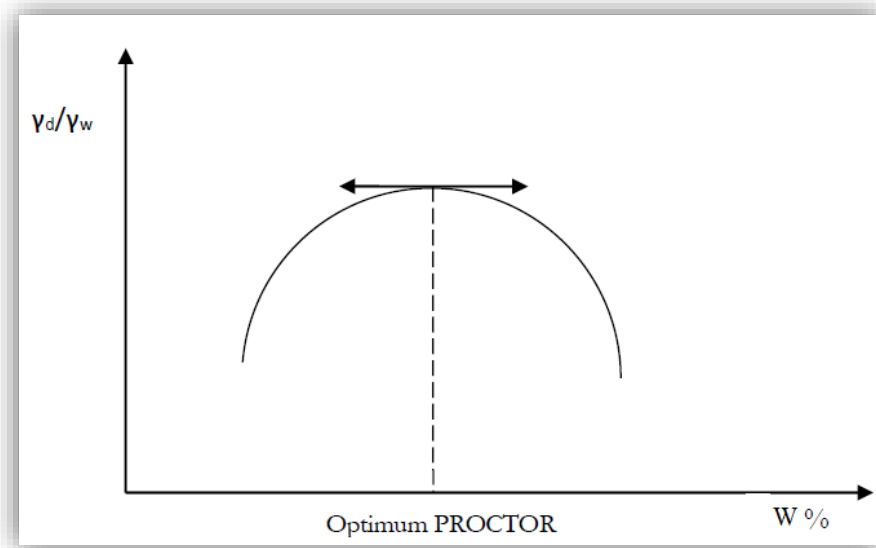


Figure IV.3 Courbe Proctor



TP V

*Mesure de la densité in-situ par le
densitomètre à membrane*

TP V : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

Essai in-Situ

- DENSITOMÈTRE À MEMBRANE - (NF P 94-061-2)

V.1 Rappel du cours

V.1.1 Introduction

Le contrôle du compactage pendant la réalisation des ouvrages en génie civil est indispensable (Routes, remblai ...). Plusieurs méthodes permettent de mesurer le taux de compactage et de le comparer avec les résultats du laboratoire.

L'essai du densitomètre a pour objectif principale de contrôler le compactage d'un sol et le qualifier à partir de la détermination du poids volumique apparent (γ), du poids volumique sec (γ_d) et de la teneur en eau (W).

Cet essai se décompose en deux étapes :

- ✓ Une étape in situ pour un prélèvement de sol.
- ✓ Une deuxième étape en laboratoire pour la recherche des différentes caractéristiques physiques du sol prélevé.

V.1.2 Définition & Principe

Le densitomètre permet la mesure de la masse volumique des sols in situ, la comparaison avec celle de l'essai Proctor (densité optimale), donne la compacité, exprimé en pourcentage.

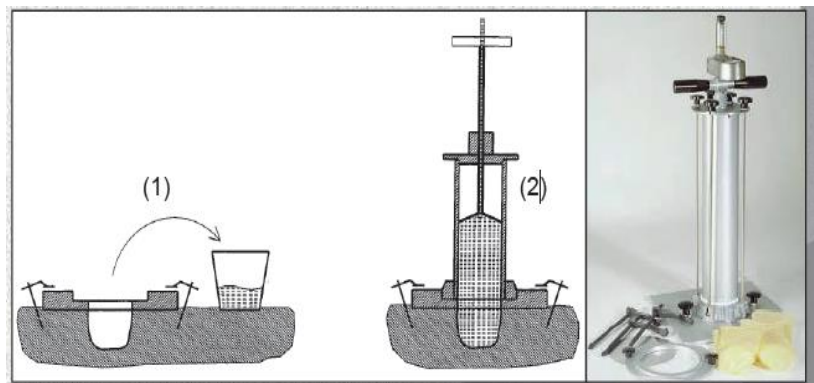


Figure V.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à creuser une cavité, à recueillir et peser la totalité du matériau extrait, puis à mesurer le volume de la cavité à l'aide d'un densitomètre à membrane. 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.

TP V : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

V.1.3 APPAREILLAGE : IN-SITU (Sur Site)

1. Un cylindre de volume minimal de 3 000 cm³, doté d'une embase, la taille de l'appareil doit être adaptée à la cavité réalisée.
2. Une membrane souple, étanche, amovible, en latex ou en matériau de propriétés équivalentes raccordée au cylindre, l'ensemble étant rempli d'eau.
3. Un piston muni d'une tige graduée équipée d'un index permettant la mesure du volume au centimètre cube (cm³), et d'une poignée.
4. Une plaque de base suffisamment rigide pour supporter sans déformation le poids de l'opérateur. Cette plaque est percée en son centre d'un orifice muni d'une collerette destinée à recevoir l'embase du corps de l'appareil.
5. Un dispositif de contrôle de la pression appliquée ou d'un limiteur d'effort.
6. Un système de purge situé en haut de la tige graduée.
7. Une plaque de transport (protection de la membrane au cours du transport).
8. Quatre piquets d'ancrage au moins.
9. Matériel de creusement (pelle, piochon, burin, couteau, marteau, etc.).
10. Matériel de prélèvement (sacs, feuille plastique, pinceau, etc.).

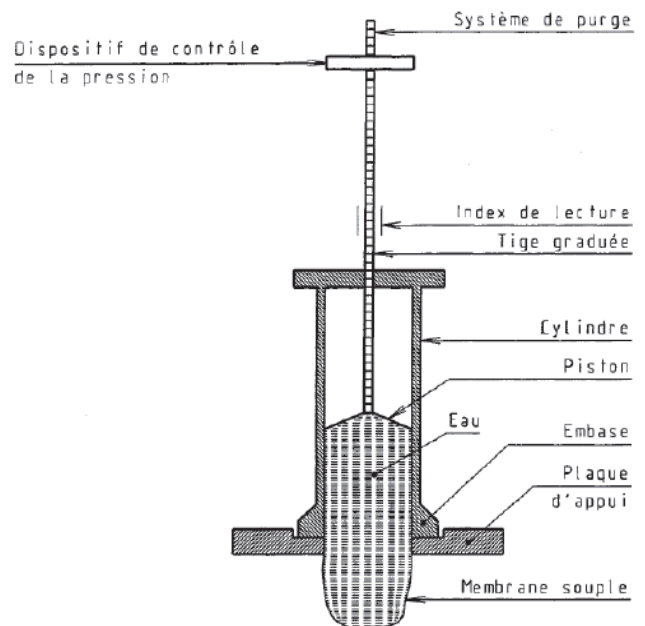
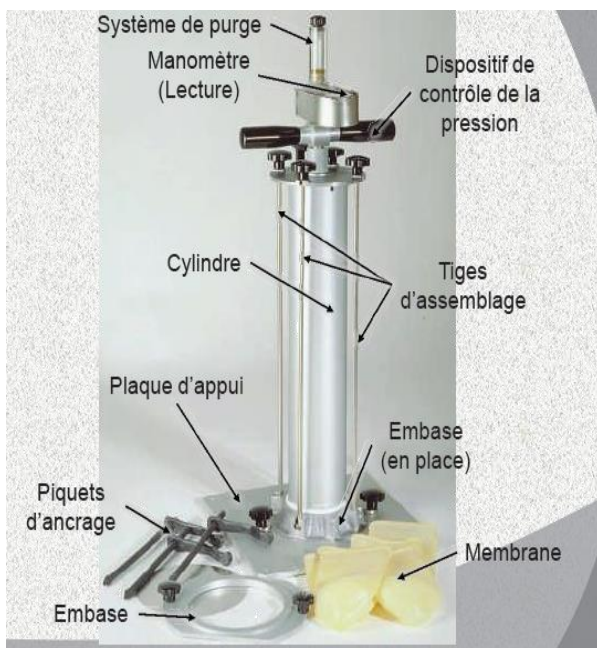


Figure V.2 APPAREILLAGE : DENSITOMÈTRE

TP V : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

MATERIELS & MATERIAUX UTILISES



Densimètre à Membrane



Une étuve de séchage



Spatule



Balance de précision & tares



Le terrain

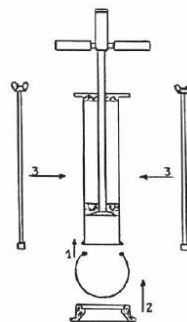
V.2 Essai de densimètre à membrane

V.2.1 Préparation de l'appareil (voir la figure V.3)

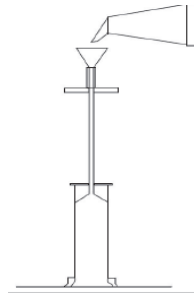
Pour la préparation du densitomètre procéder de la manière suivante :

- ✚ Retirer les colonnes serrées par écrous papillons ;
- ✚ Séparer le tube de la couronne de base (embase) ;
- ✚ Fixer la membrane (1) sur l'embase du cylindre ;
- ✚ Remonter l'appareil en remettant en place la couronne de base (2) et les tiges (3) ;
- ✚ Serrer modérément les écrous papillons à la main ;
- ✚ Tirer sur la poignée pour remonter le piston au point haut ;
- ✚ Poser l'appareil sur une table bien plane et remplir l'appareil d'eau par le trou de la tige centrale en s'aidant d'un entonnoir,
- ✚ Remplir complètement jusqu'à débordement,
- ✚ Tapoter l'appareil pour faire remonter les bulles,
- ✚ Visser le bouchon. Une rainure ménagée dans le filetage permet à l'excès d'eau de s'échapper,
- ✚ Arrêter de visser lorsqu'il reste encore un tour ou deux à effectuer ;
- ✚ Appuyer sur la poignée pour refouler le piston et faire échapper l'excès d'eau en purgeant l'air,
- ✚ Tapoter l'appareil pour faire remonter les bulles,
- ✚ Serrer le bouchon et remonter le piston à fond.

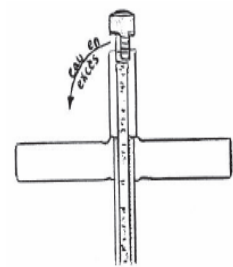
La membrane est aspirée et se dégage de l'appui, **L'appareil est prêt à servir.**



Assemblage du Densitomètre



Remplissage du densitomètre



Serrage du bouchon



Figure V.3 Préparation de l'appareil au laboratoire

TP V : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

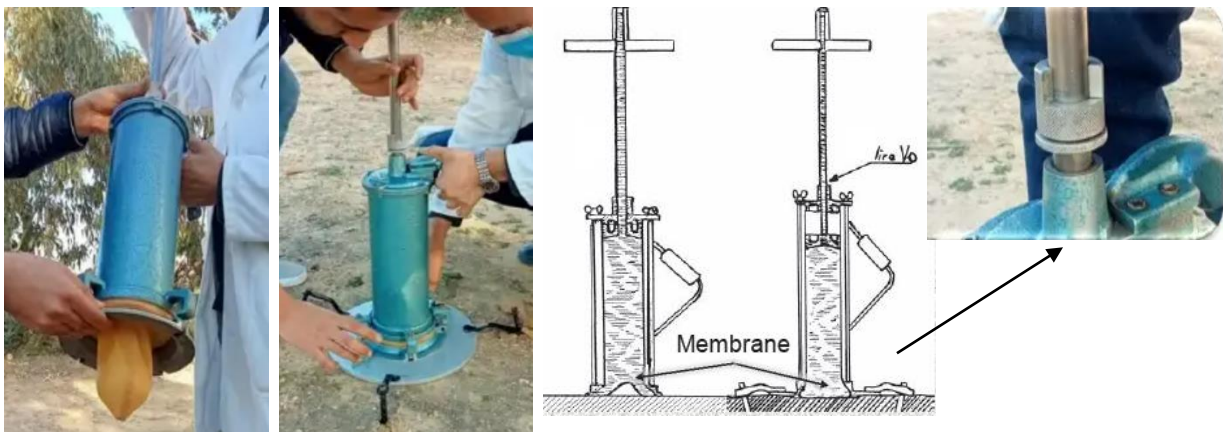
V.2.2 Réalisation de l'essai (voir les figures V.4 , V.5 , V.6 , V.7)

- ✚ Préparer, par arasement, une surface plane sensiblement horizontale au moins égale à celle de la plaque d'appui,
- ✚ Fixer la plaque d'appui avec les piquets d'ancrage (valets) ; en cas d'impossibilité, lester la plaque,



Figure V.4 Fixation de la plaque d'appui sur la surface préparé du sol.

- ✚ Enlever la couronne de protection et solidariser l'appareil à la plaque d'appui,
- ✚ Vérifier que le piège à bulle (système de purge) du densitomètre ne laisse apparaître aucune bulle. Sinon desserrer de 1 tour le bouchon, appuyer sur la poignée pour chasser l'air et un peu d'eau et resserrer le bouchon,



(a) Fixation de l'appareil sur la plaque d'appui

(b) Gonflement de la membrane et lecture de V_0

Figure V.5 Fixation de l'appareil et mesure du volume V_0

- ✚ Tirer la poignée pour faire remonter le piston à fond en mettant les pieds sur la base carrée afin d'éviter qu'elle bouge. Retirer le densitomètre de la base d'appui,
- ✚ Pratiquer l'excavation du trou à travers l'orifice de la plaque. La profondeur doit être égale au diamètre de l'orifice (à plus ou moins un demi-rayon). La forme de la cavité doit être régulière,

TP V : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane



Figure V.6 Excavation de la cavité

- Recueillir le matériau extrait de l'excavation, sans perte et peser le matériau humide M_h (calcul de teneur en eau (W) et poids volumique humide (γ_h)).

Noter bien que :

- Le volume minimale de la cavité est en fonction de D_{max} du matériau, il doit être tel que la masse du matériau extraite doit être $> 200 D_{max}$ et jamais < 1500 g.*
- Le matériau extrait est soit pesé immédiatement ou transporté au laboratoire dans un récipient hermétique.*
- Replacer le densitomètre et mesurer à nouveau le volume en appuyant sans excès sur le piston. Soit V_1 la nouvelle valeur marquée par l'index (Manomètre).
- Tirer le piston vers le haut à fond pour dégager la membrane et retirer l'appareil.

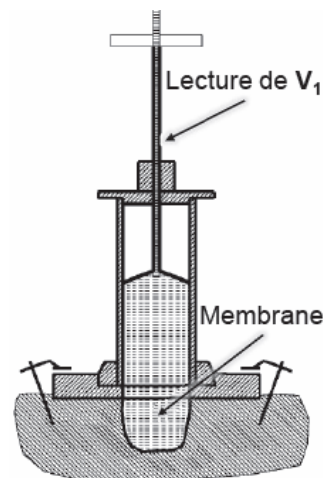


Figure V.7 Mesure du volume de la cavité et lecture de V_1 .

V.2.3 Calcul et résultats :

On calcul :

- ✓ Volume de l'échantillon (cavité) par la formule : $V_T = V_1 - V_0$
- ✓ Masse volumique de l'échantillon par la formule $\rho_h = M_h / V_T$

TP V : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

- ✓ Poids volumique de l'échantillon par : $\gamma_h = P_h / V_T$
- ✓ Le poids volumique sec par la formule : $\gamma_d = \gamma_h / (1+W)$

Tableau V.1 Résultats d'essai de mesure de la densité in-situ

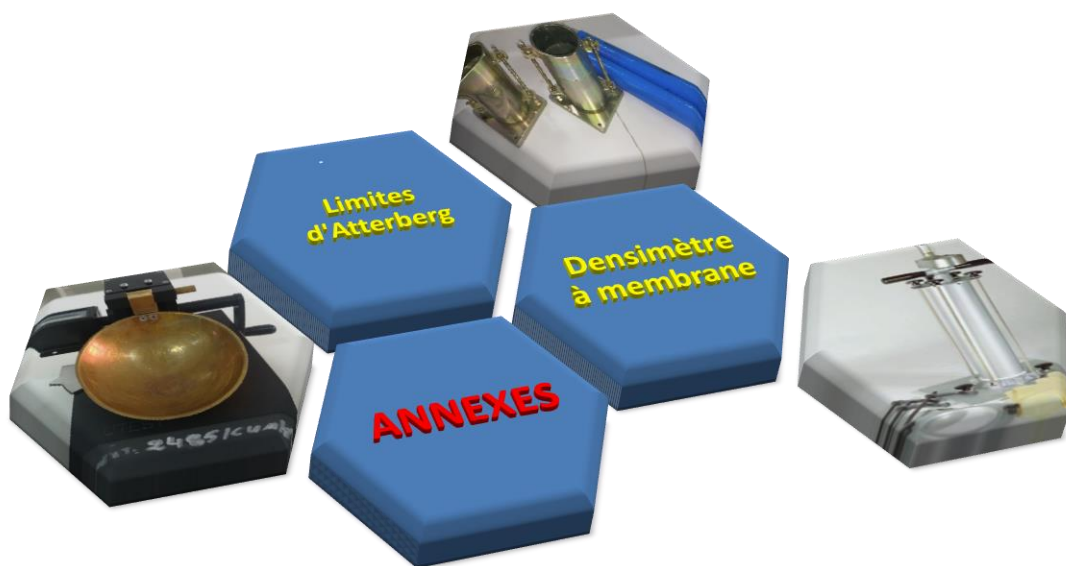
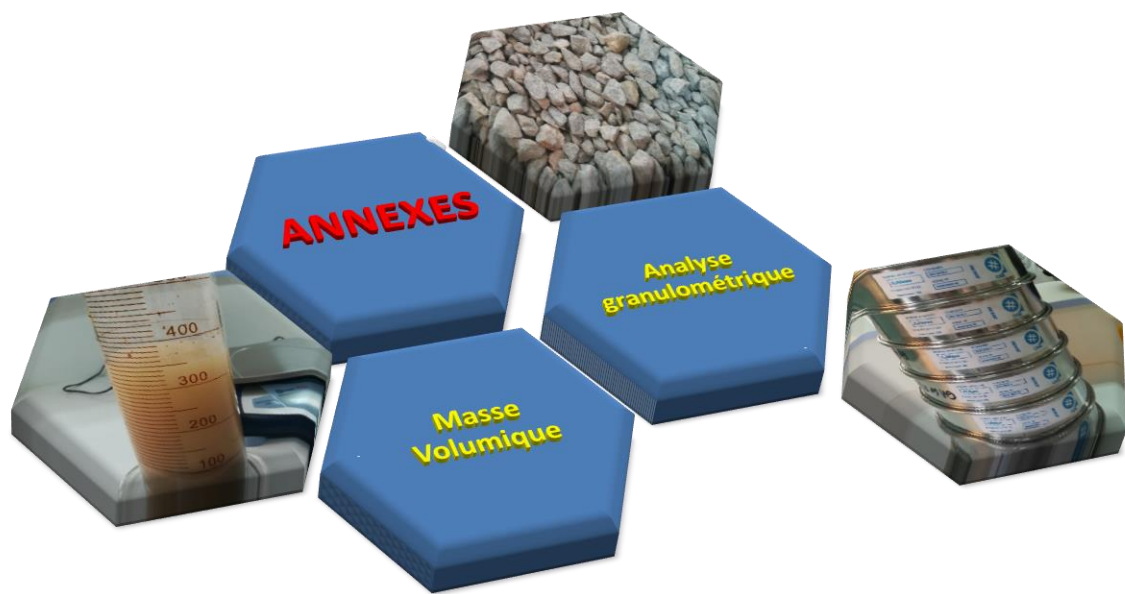
Essai de mesure de la densité in-situ		
Volume initial V_0	Cm^3
Volume final V_1		Cm^3
Masse du sol extrait du trou M		g
Tare		g
Tare + sol humid		g
Tare + sol sec		g

BIBLIOGRAPHIE



Références bibliographiques

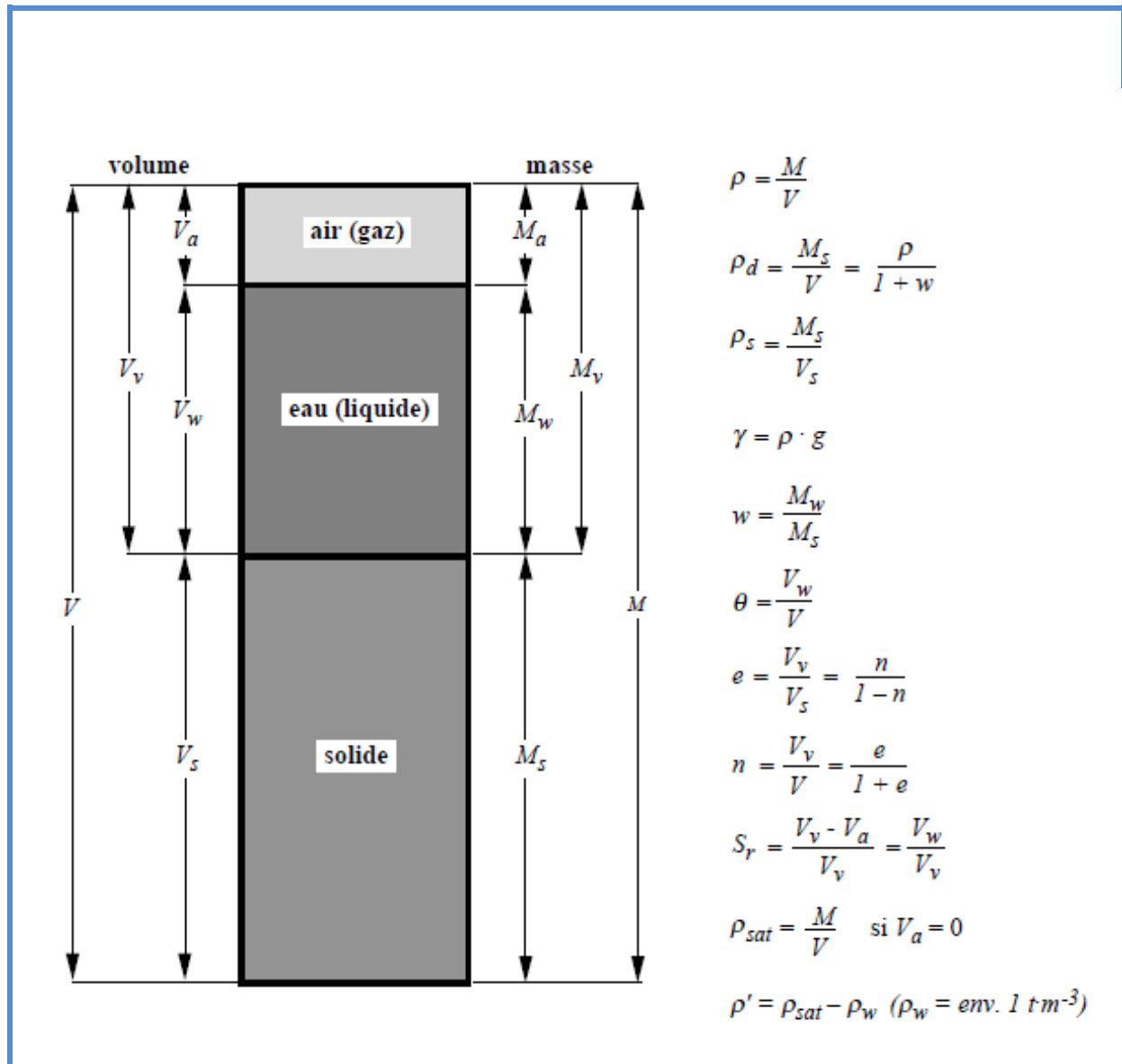
- [1] Clément Desodt, Philippe Reiffsteck, Géotechnique , Exercices et problèmes corrigés de mécanique des sols,avec rappels de cours 2e ÉDITION, Dunod, 2020 www.dunod.com ISBN 978-2-10-079883-4
- [2] Département de Génie Civil, Université libanaise -branche 1, tripoli , Analyse granulométrique par sédimentométrie, TP 2-Mecanique des sols 2014-2015, Tripoli, janvier 2015
- [3] Dr. Hadji R. Polycopié sur Introduction à la Mécanique des sols , 2019/2020
- [4] Dr. Hassan Sleiman ING. Yumen Al-Rawi Préparé par Rana El-ali , Analyse granulométrique par sédimentométrie Surveillé par Département de génie civil, Université Libanaise-Faculté de génie, Branche 1-Tripoli Tripoli, 12 janvier 2015
- [5] FILIAT G (1981) : « La pratique des sols et fondations » Editions du Moniteur, Paris Schlosser F., 1997. Eléments de mécanique des sols. Presses de L'école Nationale Des Ponts et Chaussées. 269 pages.
- [6] Hubert, G. P. B., & Phillponat, G. (2002). Fondations et ouvrages en terre. Edition Eroylles. Costet, J., Sanglerat, G., Biarez, J., & Lebelle, P. (1969). Cours pratique de mécanique des sols. Dunod.
- [7] Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). Soil mechanics.John Willey & Sons. Inc., New York, 553. Budhu M. 2011, Soil mechanics and foundations.Third Edition, John Wiley & Sons, 761 pages.
- [8] M. Bouassida, S. Boussetta (2007). Manuel de travaux pratiques de mécanique des sols. <https://www.researchgate.net/publication/258246393>, Book · January 2007
- [9] Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons.
- [10] Wilun Z. and Starzewski K., 1972. Soil mechanics in foundation engineering: properties of soils and site investigations, Volume 1, Surrey University Press. 249 pages.



ANNEXES

Annexe 1

Les trois éléments constitutifs du sol



V_a : volume de l'air.

V_w : volume de l'eau.

V_s : volume des grains solides.

V_v : volume des vides.

M_w : poids de l'eau ;

M_s : poids des grains solides ;

Le poids total du sol : $W = W_w + W_s$. $W_a = 0$, on considère que le poids de l'air est nul. Le volume total du sol $V = V_v + V_s = (V_a + V_w) + V_s$.

ANNEXES

Relations entre les paramètres physiques des sols

	Teneur en eau (w)	Porosité (n)	Indice des vides (e)	Poids volumique (γ)	Poids volumique sec (γ_d)
Définition	$\frac{W_{vw}}{W_s}$	$\frac{V_v}{V}$	$\frac{V_v}{V_s}$	$\frac{W}{V}$	$\frac{W_s}{V}$
W		$\frac{n}{1-n} \cdot \frac{S_r \cdot \gamma_{vw}}{\gamma_s}$	$\frac{e \cdot S_r \cdot \gamma_{vw}}{\gamma_s}$	$\frac{S_r \cdot \gamma_{vw}}{\gamma_s} \cdot \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma - S_r \cdot \gamma_{vw}}$	$S_r \cdot \gamma_{vw} \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$
n	$\frac{W \cdot \gamma}{W \gamma_s + S_r \gamma_{vw}}$		$\frac{e}{e+1}$	$\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s - S_r \gamma_{vw}}$	$\frac{1}{\gamma_d} \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$
e	$\frac{W \gamma_s}{S_r \gamma_{vw}}$	$\frac{n}{1+n}$		$\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma - S_r \gamma_{vw}}$	$\frac{1}{\gamma_s} \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$
γ	$\frac{(1+W)\gamma_s S_r \gamma_{vw}}{W \gamma_s + S_r \gamma_{vw}}$	$(1-n)\gamma_s + n S_r \gamma_{vw}$	$\frac{\gamma_s + e S_r \gamma_{vw}}{1+e}$		$(1+W)\gamma_d$
γ_d	$\frac{\gamma_s S_r \gamma_{vw}}{W \gamma_s + S_r \gamma_{vw}}$	$(1-n)\gamma_s$	$\frac{\gamma_s}{1+e}$	$\frac{\gamma}{1+W}$	

ANNEXES

Annexe 2

Schéma du protocole d'essais de la granulométrie par tamisage.

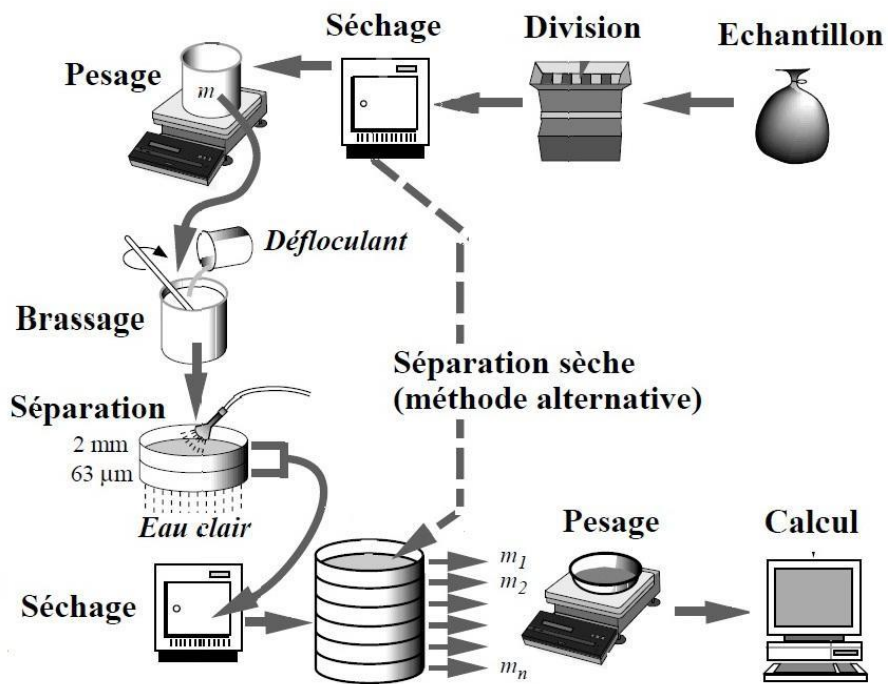
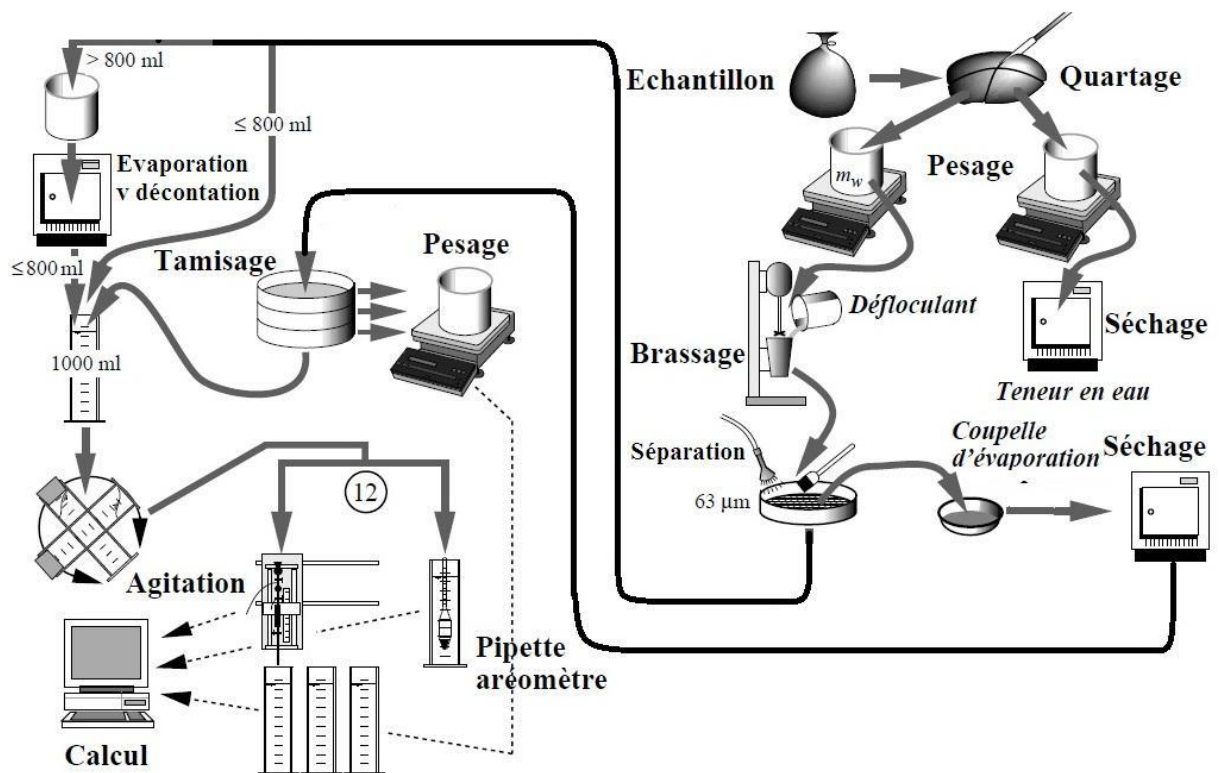
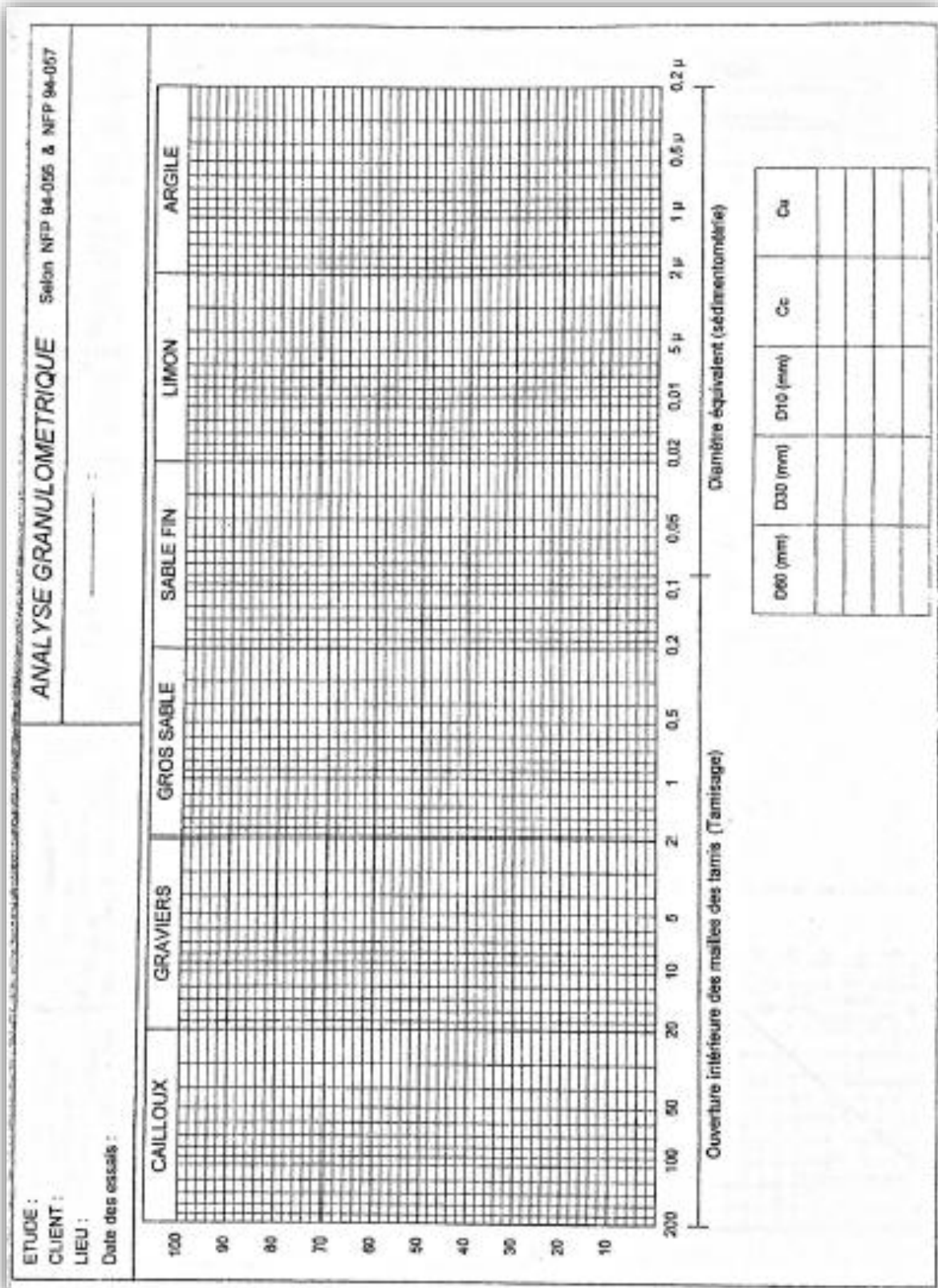


Schéma du protocole d'essais de la granulométrie par sédimentation



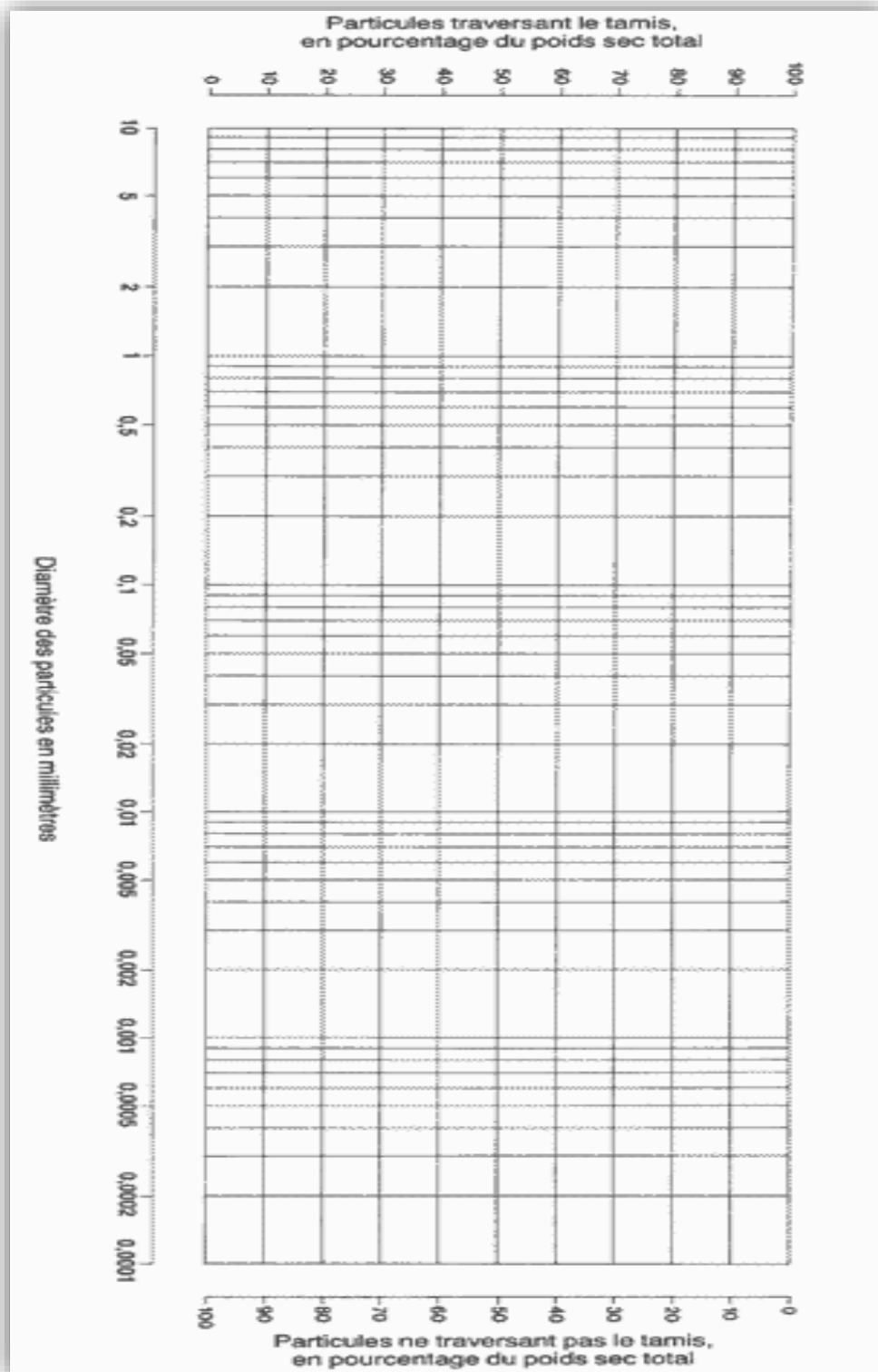
ANNEXES

La courbe granulométrique



ANNEXES

Source: <http://open.btp.free.fr/download/granulo-vierge.pdf>



ANNEXES

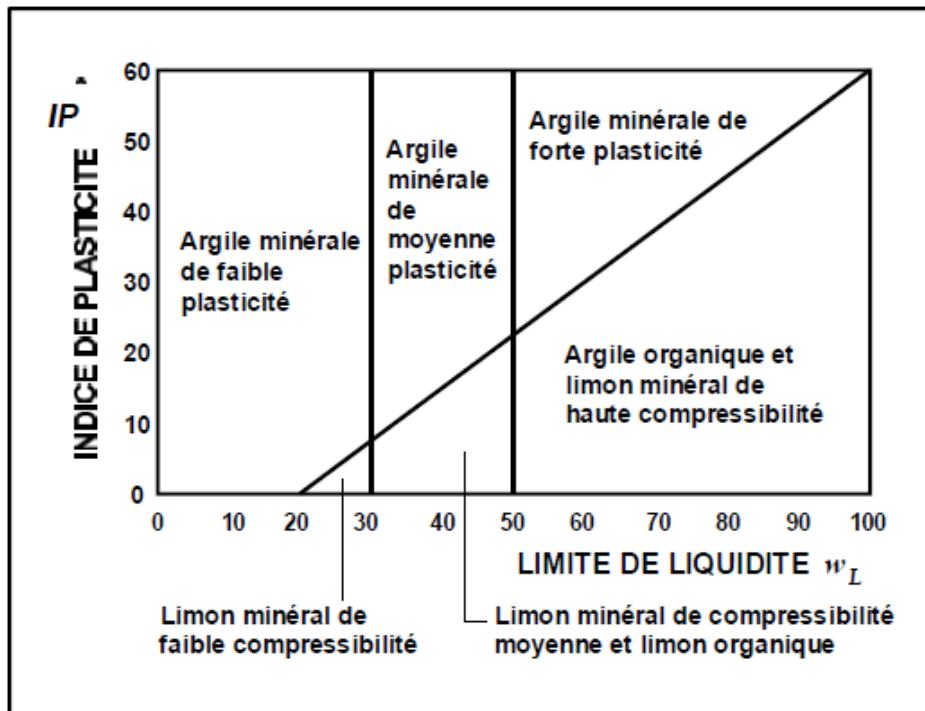
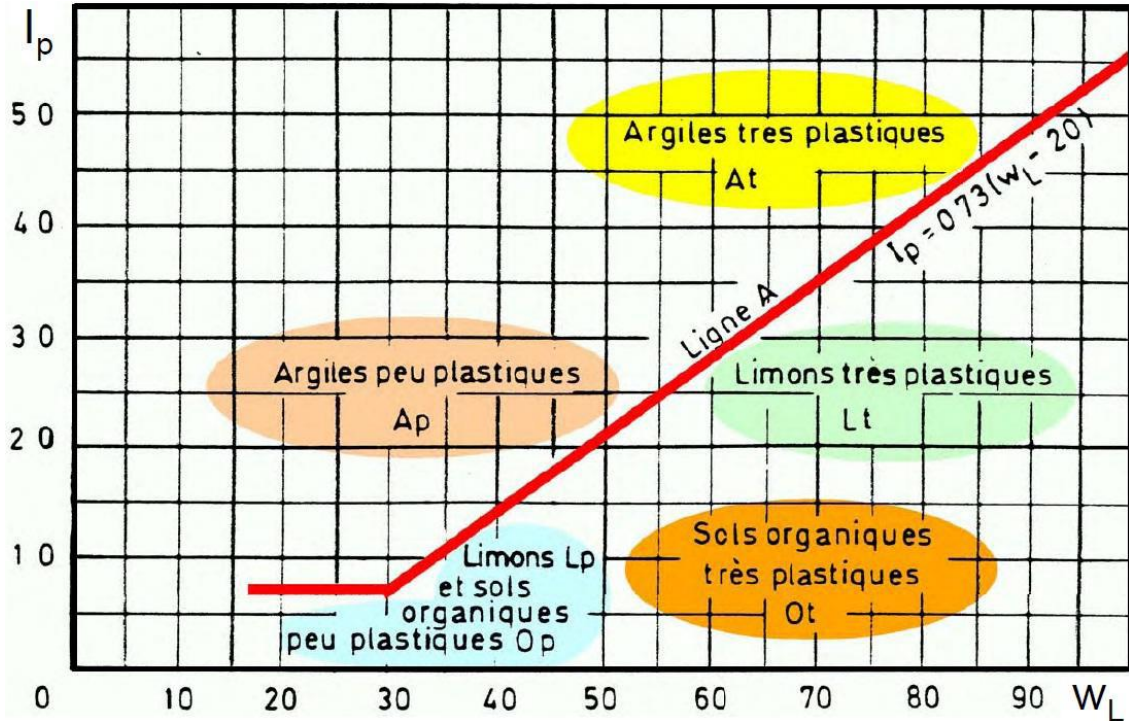
Classification des sols grenus (selon L.C.P.C).

Définitions		Symboles	Conditions	Désignation géotechnique	
GRAVES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ (*) et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée	
		moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée	
	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A (fig. 2)	grave limoneuse
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué	
		moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué	
	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A	sable limoneux
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	sable argileux

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % → on utilise un double symbole.

ANNEXES

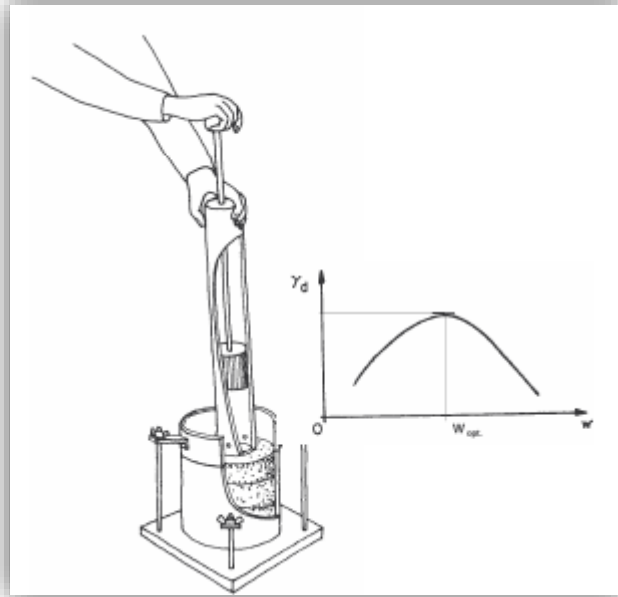
Classification des sols fins : Abaque de plasticité de Casagrande (simplifiée).



ANNEXES

Annexe 3

COMPACTAGE



Essai Proctor

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 ($\frac{\gamma_d}{\gamma_h}; w$); on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale en eau.

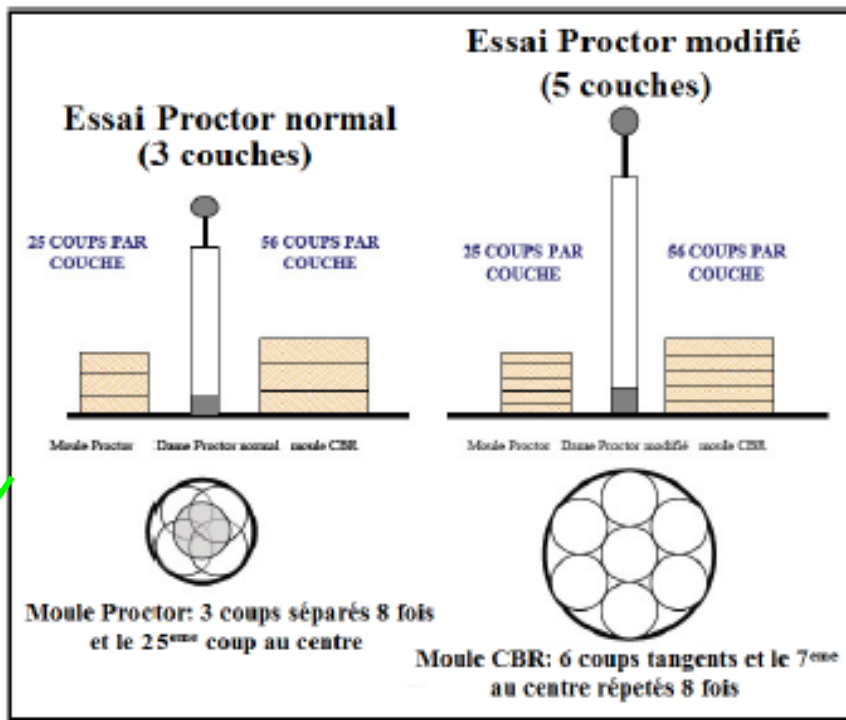
On utilise pour ces essais deux types de moules de dimensions différentes :

- ✚ Le moule Proctor ($\varnothing_{\text{moule}} = 101,6 \text{ mm}$ / $H_{\text{de sol}} = 117 \text{ mm}$) lorsque le matériau est suffisamment fin (pas d'éléments supérieurs 5mm),
- ✚ Le moule CBR (California Bearing Ratio) pour des matériaux de dimensions supérieures à 5mm et inférieures à 20mm ($\varnothing_{\text{moule}} = 152 \text{ mm}$ / $H_{\text{de sol}} = 152 \text{ mm}$).

	Masse de la dame (Kg)	Hauteur de chute (cm)	Nombre de coups par couche	Nombre de couches	Energie de compactage Kj/dm^3	
Essai Proctor	Normal	2,490	30,50	25 (moule Proctor)	3	0,59
				55 (moule CBR)	3	0,53
	Modifié	4,540	45,70	25 (moule Proctor)	5	2,71
				55 (moule CBR)	5	2,41

Conditions des essais Proctor normal et Modifié

ANNEXES



Position des coups dans le moule Proctor normal et modifié.

ANNEXES

Annexe 4

Densimètre à Membrane



Manomètre

Volume 3 litres

Tige graduée

Système de fixation

NF P 94-061-2

Pour la détermination de la masse volumique des sols en place

- > Lecture directe du volume de la cavité sur la tige graduée
- > Corps en laiton
- > Piston en alliage léger
- > Manomètre de lecture de la pression appliquée pour une bonne répétabilité des mesures
- > Orifice de remplissage par le haut
- > Poignée double pour une bonne répartition de l'effort
- > Base carrée avec système de fixation

10 kg

360 x 360 x 400 mm

Réf. 55.0370.701
Membranes

Accessoires complémentaires	Références
Membranes 3 l (x6)	55.0370.701
Tube et bouchon	55.0370.702