
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université TAHRI Mohamed, Béchar



Faculté de Technologie

Département de Génie Civil & Hydraulique

Polycopié Pédagogique de
(Exercices)
Intitulé :

**"Exercices avec solutions en
mécanique des sols 1"**

Cours et exercices

Code de la Matière : - UEF 2.2.1 Niveau : Licence (S4)

Filière (s) : (Génie Civil)

Spécialité (s) : (Génie Civil)

Etabli par l'enseignant :
ZIZOUNI Khaled

Année Universitaire : 2022/2023.

Préface

Le présent document est destiné aux étudiants universitaires de deuxième année License en génie civil, afin de mettre entre leurs mains un outil qui facilite la compréhension, l'application du calcul de la mécanique des sols sous la forme de problèmes corrigés.

Une partie introductive ouvrera le document par un enchaînement d'un bref rappel de cours ainsi tous les abaques nécessaires pour le calcul et la compréhension du module de la mécanique des sols.

Un bref aperçu sur les chapitres proposés par le canevas de la formation des étudiants du deuxième année License en génie civil, le présent document expose plusieurs exercices et problèmes avec leurs solutions dont des étudiants de même niveau les avaient comme des examens et rattrapage au cours des années passées.

L'enchaînement proposé des exercices a été choisi après des années d'enseignement, testant dans chaque année une des parties du module de la mécanique des sols, ces tests ont aboutis à ce dernier permettant une meilleur compréhension, une meilleur préparation et, compatibilité du savoir requis pour chaque chapitre.

Finalement ce document est un support complémentaire à la formation et il ne remplace en aucun cas le cours de l'enseignant de la matière.

Sommaire

Chapitre I : Généralités	
I.1. Définition d'un sol	01
I.2. Définition de la mécanique des sols	01
I.3. L'origine des sols	01
Chapitre II : Caractéristiques physiques des sols	
II.1. Les types de sols	03
II.2. Identification des sols	03
II.3. Propriétés et caractéristiques physique des sols	04
II.3.1. Poids volumiques	04
II.3.2. Densités	05
II.3.3. Rapports des volumes	06
II.3.4. Rapports de l'eau	06
II.4. Propriétés et caractéristiques propres aux sols fins	06
III.1. Limites d'Atterberg	06
III.2. Indice de plasticité I_p	06
III.3. Indice de consistance I_c	07
III.4. Indice de liquidité I_L	07
Chapitre III : Classification des sols	
III.1. But	08
III.2. Systèmes de classification	08
III.3. Classification selon USCS	08
III.4. Classification selon LCPC	10
Chapitre IV : Compactage	
IV.1. Définition	12
IV.2. Facteurs d'influence	12
IV.3. Compactage au laboratoire	12
IV.4. Compactage in situ	13
IV.5. Degré de compactage	13
Chapitre V : L'eau dans le sol	
V.1. Introduction	14
V.2. Capillarité	14
V.3. Dynamique de l'écoulement	14
V.4. Perméabilité à charge constante (sols grenus)	15
V.5. Perméabilité à charge variable (sols fins)	15
V.6. Perméabilité équivalente horizontale	16
V.7. Perméabilité équivalente verticale	16
V.8. Principe de la contrainte effective	17
V.9. Réseaux d'écoulement	17
Sujet N° 01	18
Solution du sujet N° 01	20
Sujet N° 02	22
Solution du sujet N° 02	23

Sujet N° 03	25
Solution du sujet N° 03	26
Sujet N° 04	28
Solution du sujet N° 04	29
Sujet N° 05	31
Solution du sujet N° 05	32
Sujet N° 06	33
Solution du sujet N° 06	34
Sujet N° 07	35
Solution du sujet N° 07	36
Sujet N° 08	38
Solution du sujet N° 08	39
Sujet N° 09	45
Solution du sujet N° 09	46
Sujet N° 10	48
Solution du sujet N° 10	49
Sujet N° 11	51
Solution du sujet N° 11	52
Sujet N° 12	55
Solution du sujet N° 12	56
Sujet N° 13	59
Solution du sujet N° 13	60
Sujet N° 14	62
Solution du sujet N° 14	63
Sujet N° 15	66
Solution du sujet N° 15	67
Sujet N° 16	70
Solution du sujet N° 16	71
Sujet N° 17	73
Solution du sujet N° 17	75
Sujet N° 18	78
Solution du sujet N° 18	79
Sujet N° 19	81
Solution du sujet N° 19	82
Sujet N° 20	84
Solution du sujet N° 20	85
Sujet N° 21	87
Solution du sujet N° 21	88
Références bibliographiques	90

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des sols d'après la grosseur des grains	03
Tableau III.1. Classification des sols selon USCS	09
Tableau III.2. Classification des sols selon LCPC	11

Liste des figures

Figure I.1 Diagramme des phases des sols	04
Figure III. 1 Abaque de plasticité selon USCS	10
Figure III. 2 Abaque de plasticité selon LCPC	10
Figure IV. 1 Courbe de compactage	13
Figure V. 1 Essai de perméabilité à charge constante	15
Figure V. 2 Essai de perméabilité à charge variable	15
Figure V. 3 Perméabilité équivalente horizontale	16
Figure V. 4 Perméabilité équivalente verticale	16

Chapitre I

Définitions et généralités

I.1. Définition d'un sol

Le sol est un matériau granulaire naturel qui constitue la partie base qui supporte la totalité des charges des ouvrages en génie civil. D'autre part, le sol se constitue des particules solides (grains) entourées par des vides qui peuvent être remplis par de l'eau ou de l'air ou les deux à la fois.

I.2. Définition de la mécanique des sols

La mécanique des sols est la science qui s'intéresse à l'étude des propriétés physiques, chimiques, mécaniques et hydrauliques des sols en vue de leur application à la construction. Ces connaissances sont le résultat de plusieurs aspects d'analyses qui reposent sur :

Théorique : l'analyse des modèles mathématiques, principes, règles et lois qui décrivent les propriétés et le comportement du sol.

Numérique : l'analyse des sujets physiques réels par une simulation numérique en se reposant sur les modèles mathématiques définissant le sujet physique.

Expérimentale : analyse basée sur l'observation des effets, le contrôle des résultats, la répétition, discussion, interprétation et validation [1].

I.3. L'origine des sols

L'origine des sols est associée à l'érosion par la météorisation physico-chimique de la roche superficielle et ensuite le transport des débris. La météorisation comprend un processus de désagrégation physique par plusieurs actions telles que les variations de

température par exemple ou par un processus de désagrégation chimique telle que l'oxydation. Ces débris solides sont par la suite transportés et altérés selon plusieurs modes et agents généralement par le vent, l'eau ou les glaciers [2].

Chapitre II

Caractéristiques physiques des sols

II.1. Les types de sols

La méthode la plus fréquente est basée sur l'identification selon les dimensions des particules selon le tableau suivant

Tableau I.1 : Classification des sols d'après la grosseur des grains [2]

Type	Blocs	Cailloux	Graviers	Sables	Silts	Argiles
Dimension	>300mm	80-300mm	5-80mm	0.08-5mm	0.002-0.08mm	<0.002mm

II.2. Identification des sols

L'analyse granulométrique :

Cette analyse permet de déterminer les proportions de la répartition des particules selon leurs diamètres équivalents. Elle s'effectue par tamisage pour les sols à grains grossiers et par sédimentation pour les sols grains fins. Le résultat est une courbe de pourcentage de tamisât en fonction des diamètres des grains sur une échelle semi-logarithmique. Deux coefficient sont calculés le coefficient d'uniformité C_u et le coefficient de courbure C_c [3].

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{II.1})$$

Avec $C_u = [1-2]$ granulométrie très uniforme, $C_u = [2-5]$ uniforme, $C_u = [5-20]$ peu uniforme, $C_u > 20$ très étalé

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \quad (\text{II.2})$$

Avec $C_c = [1-3]$ granulométrie bien graduée, $C_c \neq [1-3]$ mal graduée.

Selon la grandeur des grains deux types de sols sont distingués :

Les sols pulvérulents (ou encore grenu : $D > 80\mu m$) tel que sable, gravier, cailloux, ect ou les effets capillaires dus à l'eau sont négligeables et les grains sont inertes.

Les sols cohérents (ou encore sol fin : $D < 80\mu m$) avec une telle dimension fine le sol est influencé par sa composition minéralogique, sa teneur en eau ainsi que sa structure.

II.3. Propriétés et caractéristiques physique des sols

Un volume de sol est composé de trois phases : solide, liquide et gaz (aire) don leurs volumes et masses sont décrites par le schéma suivant :

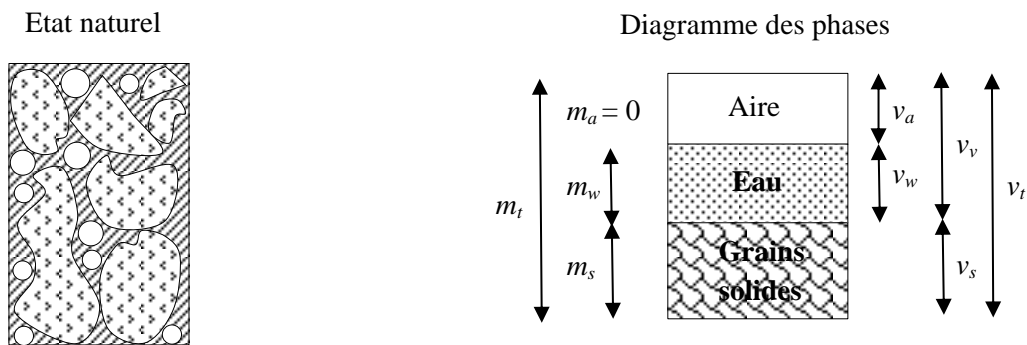


Figure I.1 Diagramme des phases des sols

Avec m_t et v_t sont la masse et le volume total de l'échantillon, m_w et v_w sont la masse et le volume de l'eau, m_s et v_s sont la masse et le volume des grains solides, v_a et v_v sont le volume de l'air et des vides respectivement par contre la masse de l'air m_a et négligeable [4].

II.3.1. Poids volumiques

Poids volumique apparent (humide) d'un sol γ_h

$$\gamma_h = \frac{w_t}{v_t} = \frac{w_s + w_w}{v_s + v_v} = \frac{w_s + w_w}{v_s + v_w + v_a} \quad (\text{II.3})$$

Avec w_t , w_s et w_w sont respectivement le poids total de l'échantillon, des grains solides et de l'eau. A la saturation il est désigné par γ_{sat}

Poids volumique sec d'un sol γ_d

$$\gamma_d = \frac{w_s}{v_t} \quad (\text{II.4})$$

Poids volumique des grains solides (spécifique) γ_s

$$\gamma_s = \frac{w_s}{v_s} \quad (\text{II.5})$$

Poids volumique de l'eau (spécifique) γ_w

$$\gamma_w = \frac{w_w}{v_w} \quad (\text{II.6})$$

Prise égale à 10 KN/m^3 afin de simplifier les calculs

Poids volumique déjaugé (spécifique) γ'

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (\text{II.7})$$

II.3.2. Densités

Densité humide

$$d_h = \frac{\gamma_h}{\gamma_w} \quad (\text{II.8})$$

Densité sèche

$$d_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (\text{II.9})$$

Densité des grains ou spécifique

$$d_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (\text{II.10})$$

Densité déjaugée

$$d' = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (\text{II.11})$$

II.3.3. Rapports des volumes

Porosité

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} \quad (\text{II.12})$$

Indice des vides

$$e = \frac{v_v}{v_s} \quad (\text{II.13})$$

Teneur en aire

$$a = \frac{v_a}{v_v} \quad (\text{II.14})$$

II.3.4. Rapports de l'eau

Teneur en eau

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (\text{II.15})$$

Degré de saturation

$$Sr = \frac{v_w}{v_v} \quad (\text{II.16})$$

II.4. Propriétés et caractéristiques propres aux sols fins

III.1. Limites d'Atterberg

Limite de liquidité W_L qui sépare l'état liquide de l'état plastique.

Limite de plasticité W_P qui sépare l'état plastique de l'état solide.

Limite de retrait W_R qui caractérise l'apparition du phénomène de retrait [1].

III.2. Indice de plasticité I_P

$$I_P = W_L - W_P \quad (\text{II.17})$$

III.3. Indice de consistance I_C

$$I_C = \frac{W_L - w}{I_P} \quad (\text{II.18})$$

III.4. Indice de liquidité I_L

$$I_L = \frac{w - W_P}{I_P} \quad (\text{II.19})$$

Chapitre III

Classification des sols

III.1. But

La classification des sols est un moyen de ranger et regrouper les sols de comportement et caractéristiques similaires dans une classe. Cette étape est réalisée en se basant sur les essais d'identification physique et mécanique généralement [4].

III.2. Systèmes de classification

Système AASHTO (American Association for State Highway and Transportation Officials): utilisé comme guide pour la classification des sols et des mélanges sol-granulats pour la construction des autoroutes. Le système de classification a été proposé pour la première fois par Hogentogler et Terzaghi en 1929.

Système GTR (Guide des Terrassements Routiers) : réalisé par AFNOR en 1992, ce système est un guide pratique pour la définition des sols utilisables dans la construction des remblais et couches de forme d'infrastructures.

Système USCS (Unified Soil Classification System) : réalisé par Casagrande en 1952 en USA, ce système est le fréquemment utilisé pour la classification des sols. *Système LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)* : Ce système est utilisé dans les pays francophones. Il a été réalisé en 1965 par le laboratoire central des ponts et chaussées français et elle est considérée comme une adaptation de la classification USCS [5].

III.3. Classification selon USCS

Elle se fait par le tableau suivant et l'abaque de plasticité dans la figure III.1 [5].

Tableau III.1. Classification des sols selon USCS

+ de 50 % des éléments de dimensions ≥ 0.08 mm Sol grenus	+ de 50 % des éléments de dimensions ≥ 0.08 mm sont retenus au tamis de 4.75 mm Grave	- de 5 % des éléments de dimensions < 0.08 mm	Cu > 4 et Cc dans [1 - 3]	Grave propre et uniforme (GP)
			Cu < 4 ou Cc < 1 ou Cc > 3	Grave propre bien étalée (GW)
		+ de 12 % des éléments < 0.08 mm et faire les limites d'Atterberg, déterminer W_L et W_P et situer le point $I_P - W_L$	Point situé au-dessous de la ligne A ou $I_p < 4$	Grave avec particules fines faible plasticité (GM)
			Point situé au-dessus de la ligne A et $I_p > 7$	Grave avec particules fines plastiques (GC)
			Point situé au-dessus de la ligne A et $4 < I_p < 7$	Grave avec particules fines moyenne plasticité (GM-GC)
	+ de 50 % des éléments de dimensions ≥ 0.08 mm sont passés au tamis de 4.75 mm Sable	- de 5 % des éléments de dimensions < 0.08 mm	Cu > 6 et Cc dans [1 - 3]	Sable propre et uniforme (SP)
			Cu < 6 ou Cc < 1 ou Cc > 3	Sable propre bien étalée (SW)
		+ de 12 % des éléments de dimensions < 0.08 mm	Point situé au-dessous de la ligne A ou $I_p < 4$	Sable avec particules fines faible plasticité (SM)
			Point situé au-dessus de la ligne A et $I_p > 7$	Sable avec particules fines plastiques (SC)
			Point situé au-dessus de la ligne A et $4 < I_p < 7$	Sable avec particules fines moyenne plasticité (SM-SC)
			Type	Description
de 50% des éléments de dimensions < 0.08 mm Sols fins	$W_L < 50$	ML	Silts et sables très fins, poussière de roche, sables fins silteux ou argileux, silts argileux peu plastiques	Aucune résistance au broyage, résistance rapide lente à la vibration avec aucune ténacité
		CL	Argiles de plasticité faible à moyenne, argile graveleuse, argiles sableuses, argiles silteuses	Résistance moyenne à élevée au broyage, absence de résistance à la vibration à lente avec moyenne ténacité
		OL	Silts et argiles silteuses organiques de faible plasticité	Résistance légère à moyenne au broyage, lente résistance à la vibration avec légère ténacité
	$W_L > 50$	MH	Silts, sables fins micasés ou diatomés	Résistance légère à moyenne au broyage, lente résistance ou aucune à la vibration avec légère à moyenne ténacité
		CH	Argiles de plasticité élevée, argiles grasses	Résistance élevée au broyage, aucune résistance à la vibration avec ténacité élevée
		OH	Argiles organiques de plasticité moyenne à élevée, silts organiques	Résistance moyenne à élevée au broyage, aucune résistance à la vibration avec ténacité moyenne à légère

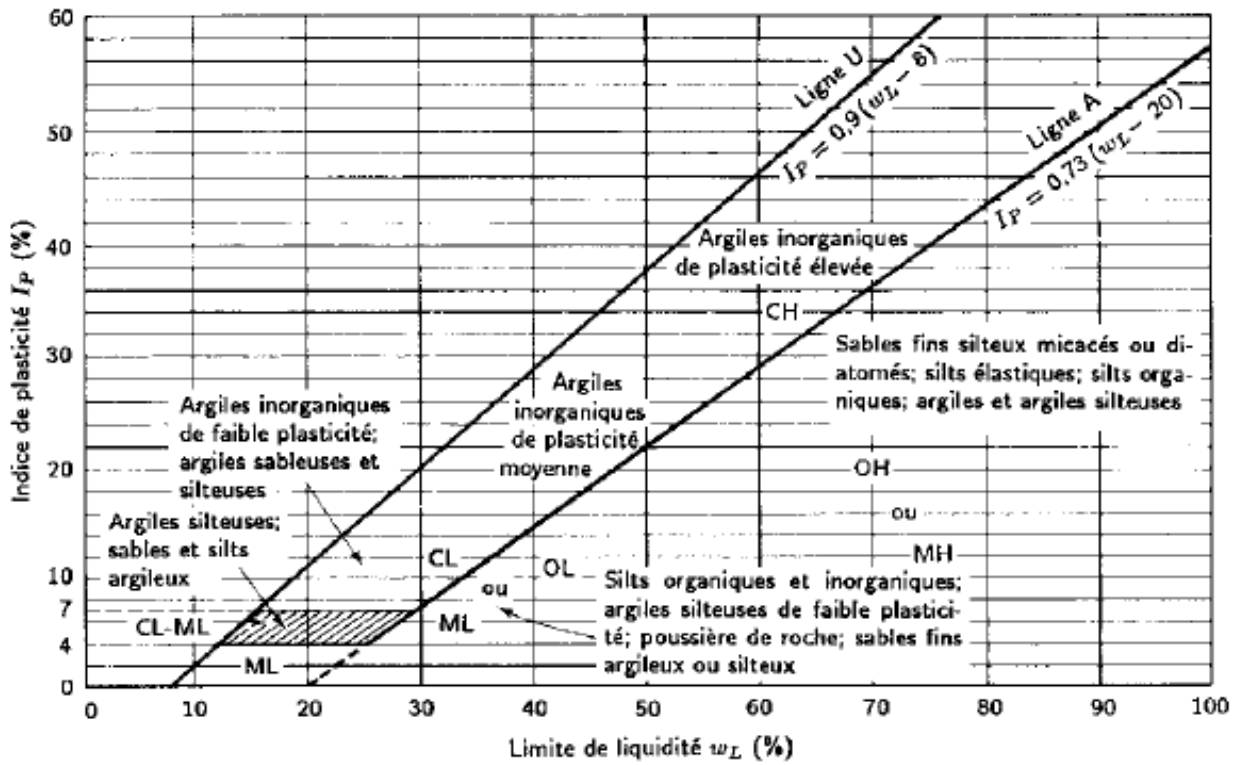


Figure III. 1 Abaque de plasticité selon USCS

III.4. Classification selon LCPC

La classification se fait par le tableau suivant et l'abaque de plasticité dans la figure III.2 [1, 2].

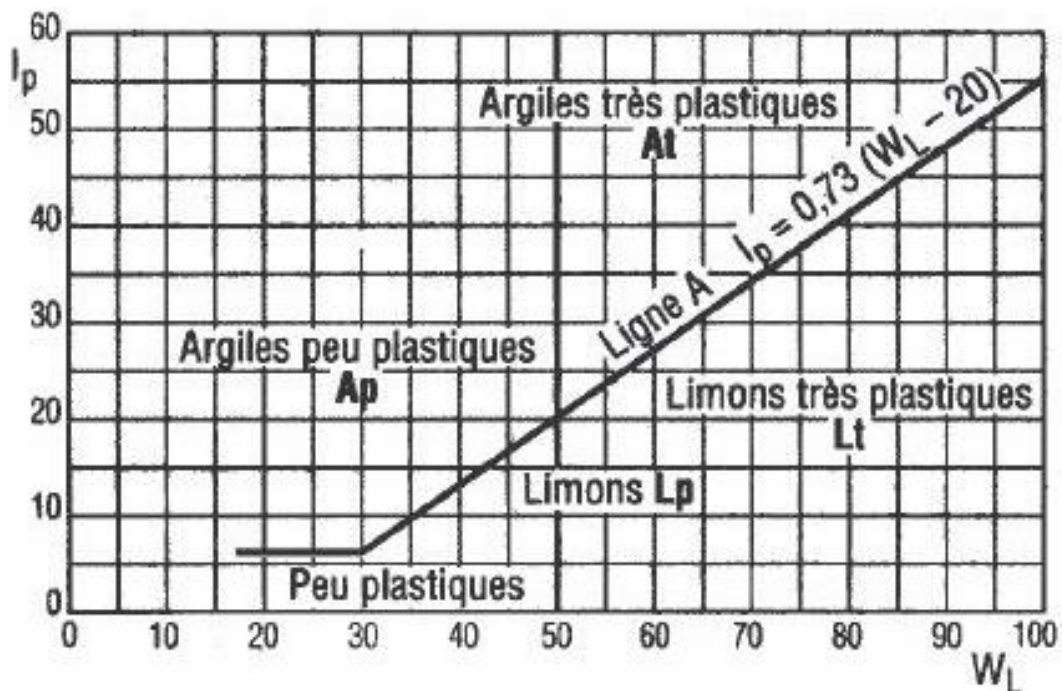


Figure III. 2 Abaque de plasticité selon LCPC

Tableau III.2. Classification des sols selon LCPC

<p>+ de 50 % des éléments de dimensions ≥ 0.08 mm</p> <p>Sol grenus</p>	<p>+ de 50 % des éléments de dimensions ≥ 0.08 mm sont retenus au tamis de 2 mm</p> <p align="center">Grave</p>	<p>- de 5 % des éléments de dimensions < 0.08 mm</p>	$C_U > 4$ et $1 < C_C < 3$	Grave bien graduée (Gb)
			$C_U < 4$ ou $C_C > 3$ ou $C_C < 1$	Grave mal graduée (Gm)
		<p>+ de 12 % des éléments < 0.08 mm et faire les limites d'Atterberg, déterminer W_L et W_P et situer le point $I_P - W_L$</p>	<p>Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité</p>	Grave limoneuse (GL)
				<p>Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité</p>
	<p>+ de 50 % des éléments de dimensions ≥ 0.08 mm sont passés au tamis de 2 mm</p> <p align="center">Sable</p>	<p>- de 5 % des éléments de dimensions < 0.08 mm</p>	$C_U > 6$ et $1 < C_C < 3$	Sable bien gradué (Sb)
			$C_U < 6$ ou $C_C > 3$ ou $C_C < 1$	Sable mal gradué (Sm)
<p>+ de 12 % des éléments < 0.08 mm et faire les limites d'Atterberg, déterminer W_L et W_P et situer le point $I_P - W_L$</p>		<p>Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité</p>	Sable limoneux (SL)	
		<p>Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité</p>	Sable argileux (SA)	
<p>+ de 50% des éléments de dimensions < 0.08 mm</p> <p>Sols fins</p>	<p align="center">Argile (A) Ou Limon (L)</p>	<p>Faire les limites d'Atterberg, déterminer W_L et W_P et situer le point $I_P - W_L$</p>	<p>Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L < 50$</p>	Limon peu plastique (Lp)
			<p>Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L > 50$</p>	Limon très plastique (Lt)
			<p>Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L < 50$</p>	Argile peu plastique (Ap)
			<p>Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L > 50$</p>	Argile très plastique (At)

Chapitre IV

Compactage

IV.1. Définition

Le compactage est l'ensemble des opérations qui ont pour but d'augmenter la densité sèche d'un sol, en chassant les vides qu'il contient, par une action mécanique de vibration ou percussion. Cette densification limite les tassements dans le sol, diminue la perméabilité et améliore la capacité portante et la résistance [3, 5].

IV.2. Facteurs d'influence

Teneur en eau: l'expérimentation a montré que la variation de la teneur en eau implique une influence sur densité sèche mais il existe une valeur de teneur en eau dite optimale qui en résulte la valeur de densité sèche maximale.

Nature du sol: l'expérimentation montre que la densité maximale est très marquée pour les cas des argiles ou sols fins en générale que pour les sables ou autres sols.

Energie de compactage: l'expérimentation montre que pour le même sol si l'énergie appliquée augmente la densité sèche augmente et la courbe devienne plus pointue [5].

IV.3. Compactage au laboratoire

L'essai établi par l'ingénieur américain Proctor en 1933 consiste à répéter plusieurs fois un processus de compactage d'un sol en variant la teneur en eau de ce sol dans des conditions normalisées. Le résultat est une courbe de forme de cloche ($d_d = f(w)$) appelée courbe de compactage ou courbe de Proctor [3].

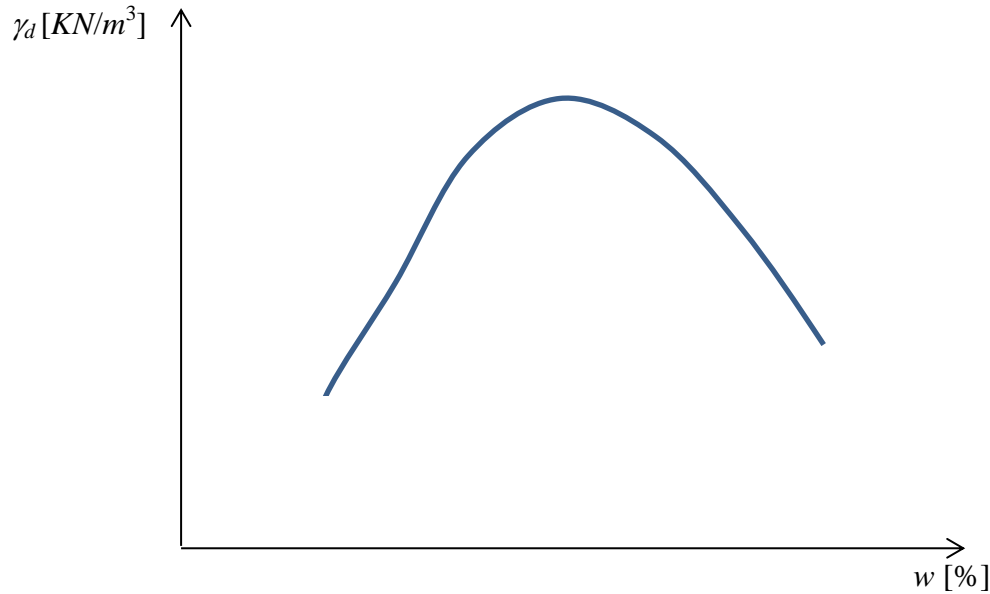


Figure IV. 1 Courbe de compactage

IV.4. Compactage in situ

Le compactage in situ s'effectue par des engins divers mais avec des couches de faibles épaisseurs de 20 à 30cm au maximum. Il existe une vitesse optimale déterminée en fonction l'épaisseur de la couche, type de compacteur et de la nature du sol généralement entre 5 à 8Km/h. de même il existe un nombre de passe optimale dépendant du type d'engin, son poids et sa pression de contact ce nombre varie de 3 à 8 fois mais il ne doit jamais dépasser 12 passes [1, 3].

IV.5. Degré de compactage

C'est un rapport de la densité sèche d_d (poids volumique sec γ_d) résultante du compactage in situ à celle (celui) déterminée par l'essai de Proctor. Ce rapport exprime le pourcentage du succès du compactage in situ [2].

$$D_c = \frac{\gamma_{d \text{ in-situ}}^{\max}}{\gamma_{d \text{ Proctor}}^{\max}} \geq 95\% \quad (\text{IV.1})$$

Chapitre V

L'eau dans le sol

V.1. Introduction

La présence de l'eau dans le sol est l'origine de plusieurs phénomènes tel que le gonflement. Il est aussi l'origine du changement du comportement des sols surtout les sols fins [5].

V.2. Capillarité

La capillarité est un phénomène physique par lequel un liquide tend à monter à travers un corps poreux tel que les sols. Ce phénomène découle de la tension superficielle des fluides développée à l'interface de gains [5].

V.3. Dynamique de l'écoulement

Gradient hydraulique : c'est la perte de charge Δh par unité de longueur définie par

$$i = \frac{\Delta h}{l} \quad (\text{V.1})$$

Loi de conservation de la masse : puisque l'écoulement est laminaire cette loi se traduit par un débit constant q avec

$$q = A_i \cdot v_i \quad (\text{V.2})$$

Charge hydraulique : l'équation dite de Bernoulli résultante du bilan énergétique d'un écoulement permanent d'un fluide incompressible

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{u_1}{\rho_w \cdot g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{u_2}{\rho_w \cdot g} + z_2 + \Delta h \quad (\text{V.3})$$

Loi de Darcy : dans le cas des sols l'écoulement est laminaire à faible vitesse donc v est proportionnelle au gradient hydraulique

$$v = k \cdot i \tag{V.4}$$

En utilisant la loi de conservation de masse

$$q = v \cdot A = k \cdot i \cdot A = k \frac{\Delta h}{l} A \tag{V.5}$$

Où k est la constante de proportionnalité ou coefficient de perméabilité [5].

V.4. Perméabilité à charge constante (sols grenus)

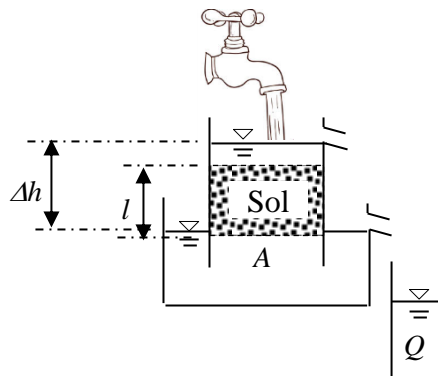


Figure V. 1 Essai de perméabilité à charge constante

$$v = k \cdot i = k \frac{\Delta h}{l} \text{ donc } k = \frac{Q \cdot l}{\Delta h \cdot A \cdot t} \tag{V.6}$$

V.5. Perméabilité à charge variable (sols fins)

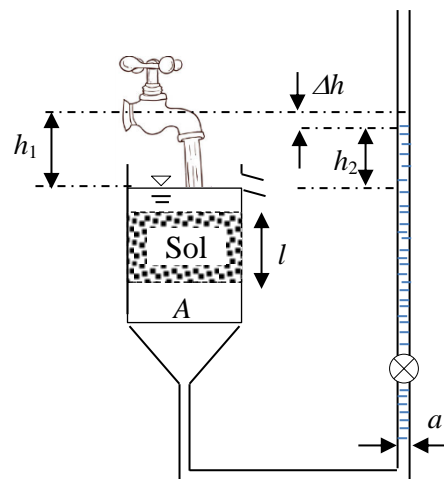


Figure V. 2 Essai de perméabilité à charge variable

L'abaissement du niveau d'eau dans le tube est

$$v = -\frac{dh}{dt} \tag{V.7}$$

En qualité de débit

$$q = -a \frac{dh}{dt} \quad (\text{V.8})$$

en utilisant la loi de Darcy on a

$$q = k \cdot i \cdot A = k \frac{h}{l} A \quad (\text{V.9})$$

En égalisant les deux équations $k \frac{h}{l} A = -a \frac{dh}{dt}$ et l'équation redevienne

$$k \frac{A}{l} \int_{t_1}^{t_2} dt = -a \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} \text{ donc } k = \frac{a \cdot l}{A \cdot \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (\text{V.10})$$

V.6. Perméabilité équivalente horizontale

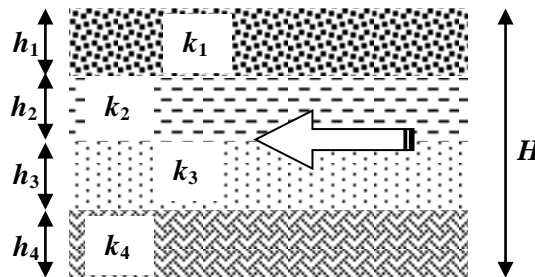


Figure V. 3 Perméabilité équivalente horizontale

$$k_h \cdot H = \sum_{i=0}^n k_{hi} \cdot h_i \quad (\text{V.11})$$

V.7. Perméabilité équivalente verticale

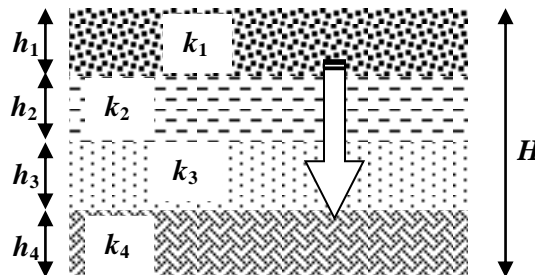


Figure V. 4 Perméabilité équivalente verticale

$$k_v = \frac{H}{\sum_{i=0}^n \frac{h_i}{k_{vi}}} \quad (\text{V.12})$$

V.8. Principe de la contrainte effective

Le principe est basé sur la notion que la résistance du sol dépend réellement de la contrainte effective ou pression de contact. D'après la loi de Terzaghi [2]:

$$\sigma = \sigma' + u \quad \text{et} \quad \tau = \tau' \quad (\text{V.13})$$

Dans un écoulement linéaire la force volumique est donnée par

$$f_v = i \cdot \gamma_w \quad (\text{V.14})$$

Donc la contrainte effective pour un écoulement descendant

$$\sigma' = (\gamma' + i \cdot \gamma_w) h \quad (\text{V.15})$$

Pour un écoulement ascendant

$$\sigma' = (\gamma' - i \cdot \gamma_w) h \quad (\text{V.16})$$

V.9. Réseaux d'écoulement

L'étude des réseaux d'écoulement est une étude des infiltrations des eaux dans le sol.

Le phénomène est gouverné par l'équation du potentiel d'écoulement suivante [5]

$$\Delta \varphi = 0 \quad (\text{V.17})$$

Le gradient hydraulique est calculé par différence finie

$$i = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{dl} \quad (\text{V.18})$$

Sujet N° 01

Dans le but de définir les conditions de compactage d'un échantillon de sol pour un chantier de remblai routier, des essais ont été réalisés au laboratoire et ont permis de dresser les tableaux ci-dessous :

Tableau d'analyse granulométrique par tamisage :

Diamètre du tamis [mm]	4.75	2.0	0.425	0.150	0.075
Passant [%]	95	90	85	70	63

$$C_c = 1 \quad ; \quad C_u = 1.5$$

Limites de consistance : $W_L = 47\%$; $W_P = 27\%$

1. Afin de ranger le sol dans une classe quelles sont les méthodes de classification que vous connaissez ?
2. Classer le sol selon la méthode USCS

Une étude de compactage au laboratoire a été réalisée afin de définir les conditions de compactage a donné le tableau suivant :

Tableau de résultats d'essai de compactage

w [%]	10.6	12.0	13.5	14.8	15.6	16.2	17.0
γ_d [kN/m^3]	16.0	17.3	18.2	18.1	17.6	17.0	16.4

3. Nommer l'essai effectué
4. Tracer la courbe
5. Déterminer les caractéristiques de l'optimum

L'échantillon pèse à son état sec $15 kN/m^3$ et la densité des grains solide est de 2.26 et $\gamma_w = 10 kN / m^3$

6. Calculer l'indice des vides

Si l'indice des vides du sol en question devient après compactage 0.25 et le volume nécessaire compacté est de $180150 m^3$ en utilisant des camions pouvant transporter $10 m^3$ chacun

7. Combien de camion nous faut-il ?
8. A la fin des travaux comment peut-on vérifier notre compactage ?

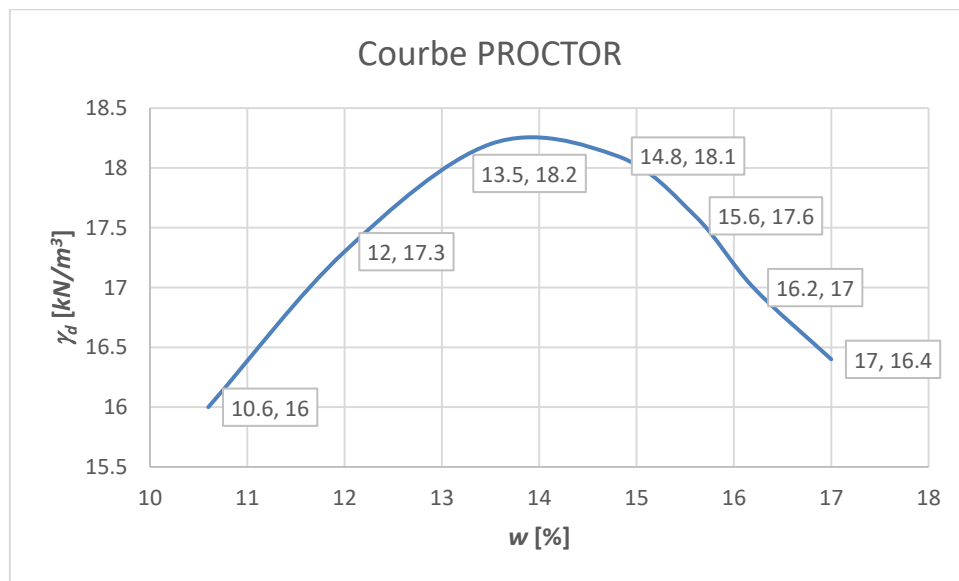
9. Donner le nom de l'essai à effectuer

10. Peut-on avoir le rapport $D_C = 105\%$? (cocher la réponse juste)

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Impossible pratiquement et théoriquement | <input type="checkbox"/> Impossible pratiquement et possible théoriquement |
| <input type="checkbox"/> Possible pratiquement et théoriquement | <input type="checkbox"/> Possible pratiquement et impossible Théoriquement |

Solution du sujet N° 01

1. Les méthodes de classification des sols sont :
 - a- USCS
 - b- LPC
 - c- GTR
 - d- AASHTO
2. Le sol selon USCS est un : CL
3. L'essai effectué est : essai de Proctor
4. Tracer la courbe :



5. Les caractéristiques de l'optimum sont :

a- $w_{opt} = 13.9 \%$ b- $\gamma_d = 18.3 \text{ kN} / \text{m}^3$

6. L'indice des vides :

$\gamma_s = G_s \cdot \gamma_w = 22.6 \text{ kN} / \text{m}^3$; on calcule par 1 m^3 ou :

$1 \text{ m}^3 \rightarrow 22.6 \text{ kN}$ d'où $V_s = 0.664 \text{ m}^3$ et $V_v = 0.336 \text{ m}^3$ donc $e = 0.51$
 $V_s \rightarrow 15 \text{ kN}$

7. Le nombre de camion nécessaire :

$e_1 = \frac{V_{v1}}{V_s} = 0.51$; $e_2 = \frac{V_{v2}}{V_s} = 0.25$ donc $V_{v2} = 0.165 \text{ m}^3$

$\Delta V / \text{m}^3 = 0.336 - 0.165 = 0.171 \text{ m}^3$; $V_{t1} = V_{t2} + V_t = V_{t2} (1 + \Delta V / \text{m}^3) = 210\,955.65 \text{ m}^3$;

$V_{t1} = 180150 \times (1 + 0.171) = 210\,955.65 \text{ m}^3$

$$N_{camion}^{br} = \frac{V_{t1}}{V_{camion}} = \frac{210955.65}{10} = 21095.565 \approx 21\,096 \text{ camions}$$

8. A la fin des travaux on peut vérifier notre compactage par le calcul du degré de compactage par la relation suivante

$$D_C = \frac{\gamma_d^{chantier}}{\gamma_d^{proctor}} \geq 0.95$$

9. L'essai effectué est : densitomètre à membrane ou gamma-densitomètre

10. $D_C = 105\%$:

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Impossible pratiquement et théoriquement | <input checked="" type="checkbox"/> Impossible pratiquement et possible théoriquement |
| <input type="checkbox"/> Possible pratiquement et théoriquement | <input type="checkbox"/> Possible pratiquement et impossible théoriquement |

Sujet N° 02

Exercice 01:

Un échantillon de sol pèse avec son tare 462g, ils étaient séchés toute une nuit dans un étuve sa masse redevient 364g, si la tare pèse 39g. Calculer la teneur en eau de l'échantillon.

Exercice 02:

Soit un sol de poids volumique $\gamma_h = 17.6 \text{ KN} / \text{m}^3$, $d_s = 2.7$ et, sa teneur en eau $w = 10\%$. Calculer γ_d , e , η , Sr et, γ_{sat} avec $\gamma_w = 10 \text{ KN} / \text{m}^3$

Exercice 03:

Un essai de densitomètre à membrane a été effectué in situ pour vérification de compactage ou on a eu les résultats suivants :

Masse du sol excavé + tare = 1590g

Masse de la tare = 125g

Lectures des volumes au densitomètre :

Finale = 1288000 mm^3

Initiale = 538000 mm^3

On a pris une quantité de ce sol afin de le passer en étuve

Masse du sol humide + tare = 407.9g

Masse du sol sec + tare = 368.9g

1. Calculer la masse volumique du sol sec et sa teneur en eau si on vous donne

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1+w}$$

2. Calculer le degré de compactage si l'essai de Proctor a donné $\rho_d = 1.87 \text{ g} / \text{cm}^3$
3. Es ce que ce compactage est vérifié ?

Solution du sujet N° 02**Exercice 01:**

$$w = \frac{462 - 364}{364 - 39} \times 100 = 30.15\%$$

Exercice 02:

$$w = 10\% = \frac{m_w}{m_s} \rightarrow m_w = 0.1m_s$$

$$\gamma_h = \frac{p_t}{v_t} = \frac{p_w + p_s}{v_t} = \frac{1.1p_s}{1m^3} = 17.6kN / m^3$$

$$p_s = 16kN \text{ donc } v_s = \frac{p_s}{d_s \cdot \gamma_w} = 0.593m^3$$

$$p_w = 1.6kN \text{ donc } v_w = 0.160m^3$$

$$v_a = 1 - 0.160 - 0.593 = 0.247m^3$$

$$\gamma_d = \frac{16}{1} = 16kN / m^3$$

$$e = \frac{1 - 0.593}{0.593} = 0.686$$

$$\eta = \frac{1 - 0.593}{1} = 0.407$$

$$Sr = \frac{0.160}{0.160 + 0.247} \times 100 = 39.31\%$$

$$\gamma_{sat} = \frac{16 + 1.6 + 2.47}{1} = 20.1kN / m^3$$

Exercice 03:

$$\rho_h = \frac{1590 - 125}{1288000 - 538000} = 1.95g / cm^3$$

$$w = \frac{407.9 - 368.9}{368.9} \times 100 = 10.57\%$$

$$\rho_d = \frac{1.95}{1+0.11} = 1.76 \text{ g / cm}^3$$

$$D_c = \frac{1.76}{1.87} \times 100 = 94.12\%$$

$D_c = 94.12\% < 95\%$ donc le compactage n'est pas vérifié.

Sujet N° 03

Question de cours:

Dans une vérification d'un compactage d'une couche de sol qui forme la couche de base d'un ouvrage routier, le degré de compactage a donné une faible valeur.

A votre avis quels sont les étapes que vous proposez à suivre afin de déterminer la cause de ce sujet.

Exercice 01:

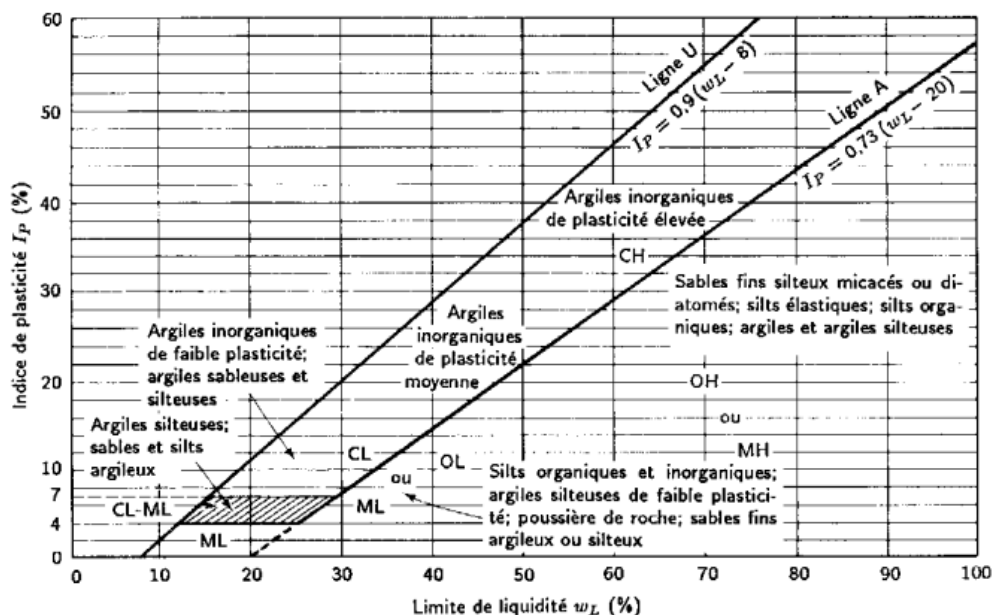
Un échantillon de sol après passage à l'étuve pendant 24h il a perdu 18g de son poids initial, si sa teneur en eau était 3.7% et son degré de saturation était 36% avant passage à l'étuve et son indice des vides est 0.285

Calculer sa masse initiale avant passage à l'étuve, son volume total, sa porosité, la densité des grains solides, la densité humide et la densité sèche.

Que sera le nouveau volume et la nouvelle masse si on ramène cet échantillon à la saturation.

Exercice 02:

Classer par USCS le sol fin suivant en justifiant votre réponse dont $I_p = 35\%$ et $W_p = 55\%$



Solution du sujet N° 03

Question de cours:

La vérification touche les facteurs qui influent sur le compactage tel que:

- ✓ La teneur en eau optimale
- ✓ La nature de sol
- ✓ L'épaisseur de chaque couche
- ✓ L'engin utilisé (fréquence et pression de contact)
- ✓ La vitesse de passe
- ✓ Le nombre de passe

Exercice 01

$$\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3 \text{ donc } m_w = 18 \text{ g} \rightarrow v_w = 18 \text{ cm}^3$$

$$v_v = \frac{v_w}{S_r} = \frac{18}{0.36} = 50 \text{ cm}^3$$

$$m_s = \frac{m_w}{\omega} = \frac{18}{0.037} = 486.49 \text{ g}$$

$$m_t = 18 + 486.49 = 504.49 \text{ g}$$

$$v_s = \frac{v_v}{e} = \frac{50}{0.285} = 175.44 \text{ cm}^3$$

$$v_t = 175.44 + 50 = 225.44 \text{ cm}^3$$

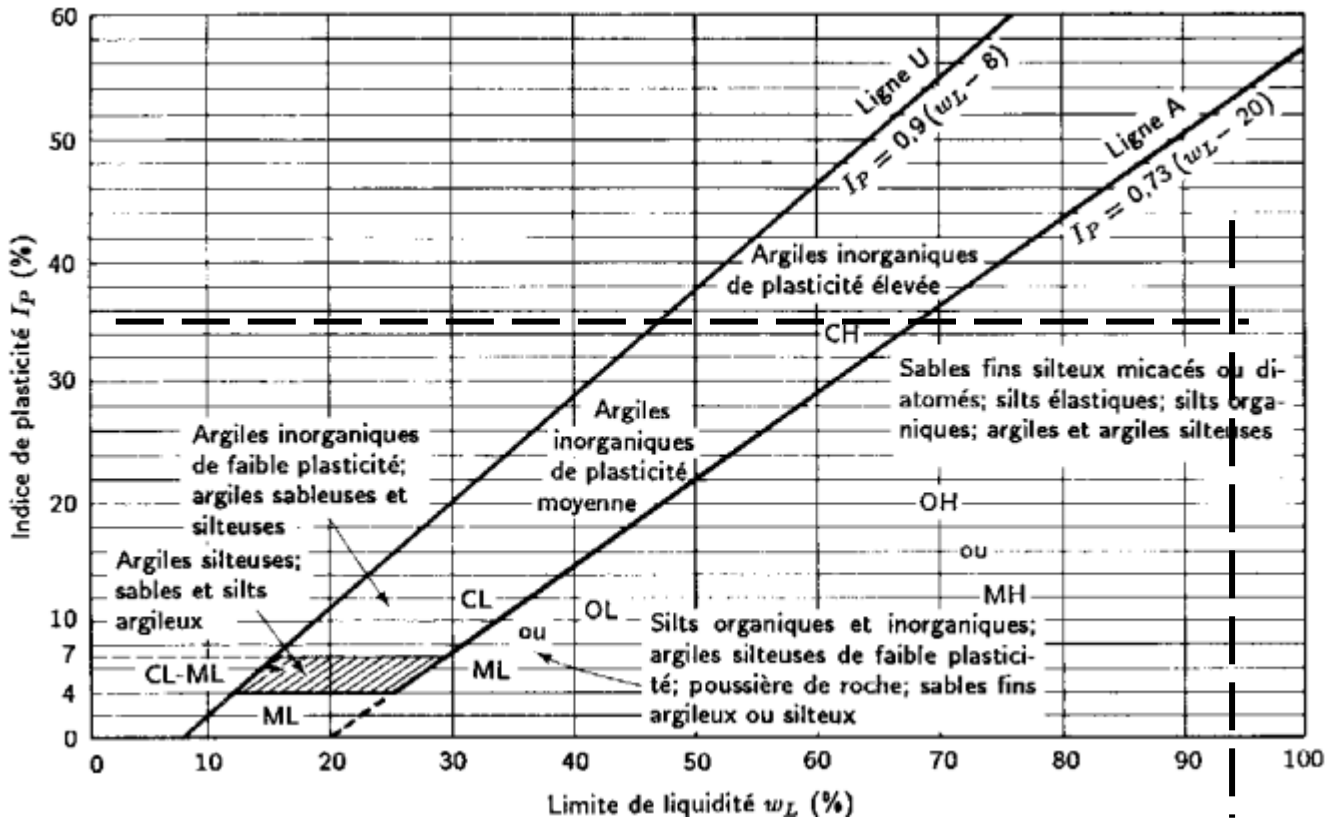
A la saturation :

$$v_t = 225.44 \text{ cm}^3$$

$$m_t = 486.49 + 50 = 536.49 \text{ g}$$

Exercice 02:

$$I_p = 35\% \text{ et } W_p = 55\% \text{ donc } W_L = I_p + W_p = 90\%$$



De l'abaque c'est un sol fin OH (sable fin silteux micacé ou diatomé ; silts élastiques ; silts organiques ; argiles et argiles silteuses)

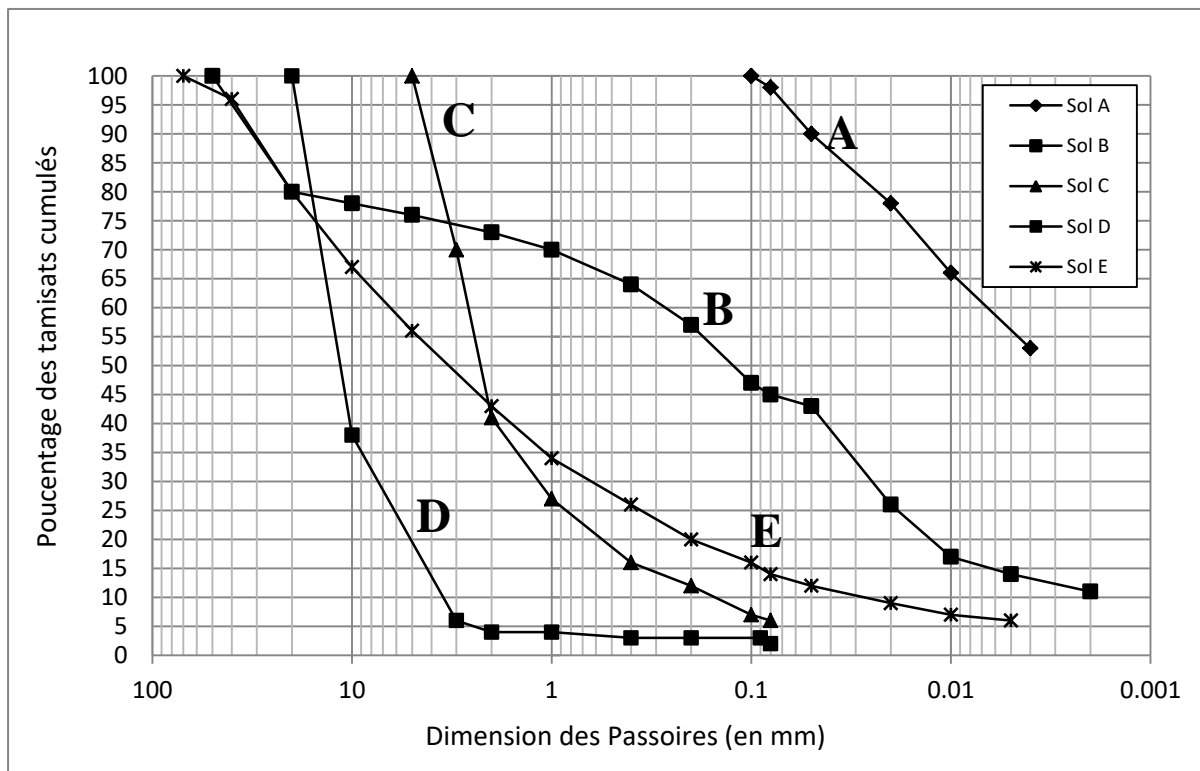
Sujet N° 04**Question de cours:**

Exprimer la porosité en fonction de l'indice des vides.

Exercice:

En vous reportant courbes granulométriques de la figure au-dessous, nommez chacun des sols selon le système de classification du USCS.

Sol	W_L %	W_P %
A	43	20
B	57	27
C	35	20
D	--	--
E	40	30



Solution du sujet N° 04

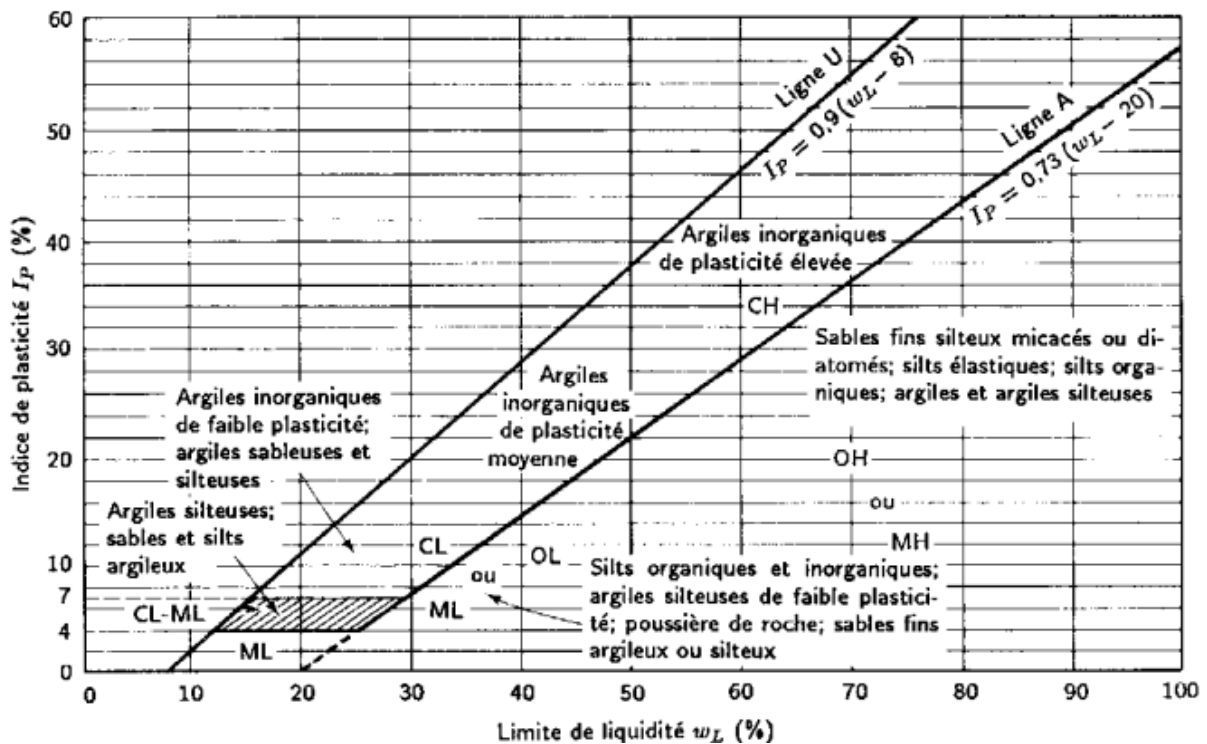
Question de cours:

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = \frac{v_v}{v_s + v_v} \times \frac{1/v_v}{1/v_v} = \frac{1}{v_s/v_v + 1} = \frac{1}{1/e + 1} \times \frac{e}{e}$$

$$\eta = \frac{e}{1+e}$$

Exercice:

Selon USCS



➤ Sol A

Passant par 0.075mm est plus de 50% donc c'est un sol fin, $W_L = 43$ et $W_p = 20$ donc $I_p = 23$ de l'abaque ce sol est un CL (Argiles inorganiques de plasticité faible à moyenne)

➤ Sol B

Passant par 0.075mm est $45\% < 50\%$ donc c'est un sol grenu, le passant par 4.75mm est $76\% > 50\%$ donc c'est un sable avec des particules fines plastiques donc c'est un SC (Sables argileux)

➤ *Sol C*

Passant par 0.075mm est $6\% < 50\%$ donc c'est un sol grenu, le passant par 4.75mm est $100\% > 50\%$ donc c'est un sable, de la courbe $D_{10} \approx 0.15\text{mm}$, $D_{30} \approx 1.2\text{mm}$ et $D_{60} \approx 2.6\text{mm}$ d'où $C_u = 17.33$, $C_c = 3.69$ donc c'est un SW-SM (Sables étalés avec des particules fines non plastiques ou de faible plasticité).

➤ *Sol D*

Passant par 0.075mm est $2\% < 50\%$ donc c'est un sol grenu, le passant par 4.75mm est $20\% < 50\%$ donc c'est un gravier, de la courbe $D_{10} \approx 3.5\text{mm}$, $D_{30} \approx 7.5\text{mm}$ et $D_{60} \approx 10.3\text{mm}$ d'où $C_u = 2.94$, $C_c = 1.56$ donc c'est un GW (Graviers bien étalés, mélange graviers-sables, pas particules fines).

➤ *Sol E*

Passant par 0.075mm est $6\% < 50\%$ donc c'est un sol grenu, le passant par 4.75mm est $57\% > 50\%$ donc c'est un sable, de la courbe $D_{10} \approx 0.15\text{mm}$, $D_{30} \approx 0.63\text{mm}$ et $D_{60} \approx 6.7\text{mm}$ d'où $C_u = 44.66$, $C_c = 0.39$ donc c'est un SW-SC (Sables étalés, sables graveleux, Particules fines très plastiques).

Sujet N° 05

Cocher les réponses justes et sauter les réponses justes

- La mécanique des sols est une science qui s'intéresse à l'étude des caractéristiques du sol
 Hydrauliques Mécaniques Physiques Chimiques
- Dans une analyse granulométrique par tamisage le coefficient d'uniformité C_u est donné par
 $\frac{D_{10}}{D_{60}}$ $\frac{D_{60}}{D_{10}}$ $\frac{D_{50}}{D_{30}}$ $\frac{D_{10}}{D_{30}}$
- Pour une granulométrie considérée bien étalée le coefficient C_c doit être
 $C_c < 1$ $C_c > 4$ $1 < C_c < 3$ $C_c \cong 6$
- Le poids volumique déjaugé γ' est égal à
 $\gamma_{sat} + \gamma_w$ $\gamma_d + \gamma_w$ $\gamma_{sat} - \gamma_w$ $\frac{\gamma_d - \gamma_w}{\gamma_w}$
- La porosité est un(e)
 Résistance Volume Inertie Rapport des volumes
- Laquelle de ces formules est juste
 $I_d = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$ $e = \frac{V_s}{V_v}$ $\eta = 1 - e$ $e = \frac{\eta}{1 - \eta}$
- Les limites d'Atterberg sont des
 Indices des vides Des teneurs en eau Des contraintes limites Des volumes
- Lequel est un système de classification de sol
 AASHTO GTR TDI DCI
- Selon la classification USCS lesquelles désignent des sols fins
 SP GP CL SL
- Le poids volumique à l'état sec est donné par
 $\gamma_d = \gamma_w \frac{1}{1 + w}$ $\gamma_d = \frac{\eta}{1 + \eta}$ $\gamma_d = \gamma_h \frac{1}{1 + w}$ $\gamma_d = \gamma' \frac{1 + \alpha}{1 + e}$
- Lequel est un sol fin
 Quartz Argile Sable des dunes Sable des plages
- A la saturation nous avons
 $w = 0.5$ $w = 100\%$ $S_r = 0.001$ $S_r = 1$
- Les caractéristiques qui jouent un rôle important dans le comportement des sols
 Dimension Forme des grains Volume d'échantillon Intempérie

Solution du sujet N° 05

1. La mécanique des sols est une science qui s'intéresse à l'étude des caractéristiques du sol
Hydrauliques Mécaniques Physiques Chimiques
2. Dans une analyse granulométrique par tamisage le coefficient d'uniformité C_u est donné par
 $\frac{D_{10}}{D_{60}}$ $\frac{D_{60}}{D_{10}}$ $\frac{D_{50}}{D_{30}}$ $\frac{D_{10}}{D_{30}}$
3. Pour une granulométrie considérée bien étalée le coefficient C_c doit être
 $C_c < 1$ $C_c > 4$ $1 < C_c < 3$ $C_c \cong 6$
4. Le poids volumique déjaugé γ' est égal à
 $\gamma_{sat} + \gamma_w$ $\gamma_d + \gamma_w$ $\gamma_{sat} - \gamma_w$ $\frac{\gamma_d}{\gamma_w} - \gamma_w$
5. La porosité est un(e)
 Résistance Volume Inertie Rapport des volumes
6. Laquelle de ces formules est justes
 $I_d = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$ $e = \frac{V_s}{V_v}$ $\eta = 1 - e$ $e = \frac{\eta}{1 - \eta}$
7. Les limites d'Atterberg sont des
 Indices des vides Des teneurs en eau Des contraintes limites Des volumes
8. Lequel est un système de classification de sol
 AASHTO GTR TDI DCI
9. Selon la classification USCS lesquelles désignent des sols fins
 SP GP CL SL
10. Le poids volumique à l'état sec est donné par
 $\gamma_d = \gamma_w \frac{1}{1+w}$ $\gamma_d = \frac{\eta}{1+\eta}$ $\gamma_d = \gamma_h \frac{1}{1+w}$ $\gamma_d = \gamma' \frac{1+\alpha}{1+e}$
11. Lequel est un sol fin
 Quartz Argile Sable des dunes Sable des plages
12. A la saturation nous avons
 $w = 0.5$ $w = 100\%$ $S_r = 0.001$ $S_r = 1$
13. Les caractéristiques qui jouent un rôle important dans le comportement des sols
 Dimension Forme des grains Volume d'échantillon Intempérie

Sujet N° 06**Question de cours :**

À la saturation, vérifier la relation suivante

$$\gamma_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{\gamma_s} + \frac{w}{\gamma_w}\right)}$$

Exercice 01:

Classer selon USCS le sol suivant :

Diamètre du tamis [mm]	4.75	2.0	0.425	0.15	0.08
Passant [%]	95	90	85	70	63

$C_c = 1$, $C_u = 1.5$, $W_L = 47\%$ et
 $W_p = 27\%$

Exercice 02:

Calculer le coefficient de perméabilité en cm/s d'un bloc de sol de hauteur de $30cm$ et de largeur de $8cm$ et d'une longueur de $10cm$ soumis à une charge d'eau de $50cm$ si on vous informe qu'après une minute la quantité d'eau ressortis était de 0.956 litre.

Solution du sujet N° 06**Question de cours :**

$$\gamma_d = \frac{P_s}{v_t} \times \frac{P_w/v_s \cdot v_w}{P_w/v_s \cdot v_w} = \frac{\frac{P_s \cdot P_w}{v_s \cdot v_w}}{P_w \frac{v_t}{v_s \cdot v_w}} = \frac{\gamma_s \times \gamma_w}{P_w \frac{v_s + v_v}{v_s \cdot v_w}}$$

À la saturation $v_v = v_w$ donc

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s \times \gamma_w}{P_w \frac{v_s + v_w}{v_s \cdot v_w}} = \frac{\gamma_s \times \gamma_w}{\frac{P_w}{v_w} \times \frac{v_s + v_w}{v_s}} = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{v_w}{v_s}} = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{P_w/\gamma_w}{P_s/\gamma_s}}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{P_w/\gamma_w}{P_s/\gamma_s}} = \frac{1}{\frac{1}{\gamma_s} \left(1 + \frac{\gamma_s}{\gamma_w} w \right)}$$

$$\gamma_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{\gamma_s} + \frac{w}{\gamma_w} \right)}$$

Exercice 01:

Le passant par le tamis 0.08mm est 63% > 50% donc c'est un sol fin, de l'abaque et le tableau de classement $W_L = 47\% < 50\%$ donc c'est un CL (Argiles sableuse de plasticité moyenne)

Exercice 02:

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot \Delta h \cdot t} = \frac{956 \times 30}{(8 \times 10) \times 50 \times 60} = 0.12 \text{ cm/s}$$

Sujet N° 07

Question de cours :

Vérifier la relation suivante

$$w = \frac{e \cdot Sr}{d_s}$$

Exercice 01:

Soit un échantillon de sol de volume de 600cm^3 , sa masse volumique apparente est de 1.79g/cm^3 , sa teneur en eau est de 10% et la densité des constituants solides est 2.7. Calculer la masse volumique du sol sec ρ_d , la porosité η , l'indice des vides e , le degré de saturation Sr .

Si on ramené l'échantillon à la saturation, calculer le volume d'eau ajouté, le poids volumique déjaugé γ' et la nouvelle teneur en eau w .

Exercice 02:

Trois couches de différents sols empilés horizontalement de même épaisseur dont leurs coefficients de perméabilité respectivement sont $2 \times 10^{-3}\text{cm/s}$, 10^{-2}cm/s et $6 \times 10^{-3}\text{cm/s}$. Calculer les coefficients de perméabilité horizontale et verticale de la couche entière.

Solution du sujet N° 07**Question de cours :**

$$w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{v_w \cdot \gamma_w}{v_s \cdot \gamma_s} = \frac{v_w \cdot \gamma_w \cdot \frac{1}{\gamma_w}}{v_s \cdot \gamma_s \cdot \frac{1}{\gamma_w}} = \frac{v_w}{v_s \cdot d_s}$$

$$w = \frac{Sr \cdot v_v}{v_s \cdot d_s} = \frac{Sr \cdot v_v \cdot \frac{1}{v_s}}{v_s \cdot d_s \cdot \frac{1}{v_s}} = \frac{Sr \cdot e}{d_s}$$

$$w = \frac{e \cdot Sr}{d_s}$$

Exercice 01:

$$m_t = \rho_h \cdot v_t = 600 \times 1.79 = 1074 \text{ g}$$

$$m_t = w \cdot m_s + m_s \rightarrow m_s = \frac{m_t}{w+1} = \frac{1074}{1.1} = 976.36 \text{ g}$$

$$\rho_d = \frac{976.36}{600} = 1.63 \text{ g/cm}^3$$

$$v_s = \frac{m_s}{d_s \cdot \rho_w} = \frac{976.36}{2.7 \times 1} = 361.61 \text{ cm}^3$$

$$v_v = 600 - 361.61 = 238.39 \text{ cm}^3$$

$$\eta = \frac{238.39}{600} = 0.397$$

$$e = \frac{238.39}{361.61} = 0.659$$

$$m_w = 0.1 \times 976.36 = 97.64 \text{ g} \rightarrow v_w = 97.64 \times 1 = 97.64 \text{ cm}^3$$

$$Sr = \frac{97.64}{238.39} \times 100 = 40.96\%$$

A la saturation

$$v_v = v_w \rightarrow \Delta v_w = 238.39 - 97.64 = 140.75 \text{ cm}^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{(238.39 \times 1) + 976.36}{600} \times 9.81 = 19.86 \text{ KN/m}^3$$

$$\gamma' = 19.86 - 10 = 9.86 \text{ KN/m}^3$$

Exercice 02:

Perméabilité horizontale

$$k_H \cdot \sum_1^n h_i = \sum_1^n k_i \cdot h_i$$

$$k_H \cdot \sum_1^3 h_i = \sum_1^3 k_i \cdot h_i$$

$$k_H \cdot (h_1 + h_2 + h_3) = k_1 \cdot h_1 + k_2 \cdot h_2 + k_3 \cdot h_3$$

$$\text{Avec } h_1 = h_2 = h_3 = h$$

$$3k_H \cdot h = h \cdot (k_1 + k_2 + k_3)$$

$$k_H = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{3} = \frac{2 \times 10^{-3} + 10^{-2} + 6 \times 10^{-3}}{3} = 6 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

Perméabilité verticale

$$\frac{\sum_1^n h_i}{k_v} = \sum_1^n \frac{h_i}{k_i}$$

$$\frac{\sum_1^3 h_i}{k_v} = \sum_1^3 \frac{h_i}{k_i}$$

$$\frac{3h}{k_v} = \frac{h}{k_1} + \frac{h}{k_2} + \frac{h}{k_3}$$

$$k_v = \frac{3}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}} = \frac{3}{\frac{1}{2 \times 10^{-3}} + \frac{1}{10^{-2}} + \frac{1}{6 \times 10^{-3}}}$$

$$k_v = 0.39 \times 10^{-2}$$

Sujet N° 08**Question de cours :**

Vérifier la relation suivante

$$\gamma_h = \gamma_s \cdot \frac{(1+w)}{(1+e)}$$

Exercice 01:

Complétez le tableau suivant

Sol	γ_h	γ_s	γ_d	ω	e	η	γ_{sat}	Sr	ω_{sat}
1	18	26.42		9	0.6				
2	20	26		7.7	0.4				
3		26				0.6		90	
4		27				0.7		85	
5	20				0.53			100	
6	22				0.8			79	

Avec : $\gamma_h, \gamma_s, \gamma_d$ et γ_{sat} [kN/m^3], $\gamma_w = 10$ [kN/m^3], ω, Sr et ω_{sat} [%]

Solution du sujet N° 08**Question de cours :**

$$\gamma_h = \frac{P_t}{v_t} = \frac{P_s + P_w}{v_s + v_v}$$

$$\gamma_h = \frac{P_s + P_w}{v_s + v_v} \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_s} = \gamma_s \cdot \frac{P_s + P_w}{(v_s + v_v) \cdot \gamma_s}$$

$$\gamma_h = \gamma_s \cdot \frac{(P_s + P_w) \cdot \frac{1}{P_s}}{(v_s + v_v) \cdot \frac{\rho_s}{v_s} \cdot \frac{1}{\rho_s}} = \gamma_s \cdot \frac{(\frac{\rho_s}{P_s} + \frac{P_w}{P_s})}{(\frac{\rho_s}{v_s} + \frac{v_v}{v_s})}$$

$$\gamma_h = \gamma_s \cdot \frac{(1+w)}{(1+e)}$$

Exercice 01:Calculant par $1m^3$ **Sol 01 :**

$$\gamma_h = 18 \text{ KN}/m^3, \gamma_s = 26.42 \text{ KN}/m^3, w = 9\%, e = 0.6$$

$$e = \frac{v_v}{v_s} \rightarrow v_v = e \cdot v_s = 0.6 \cdot v_s$$

$$v_t = v_v + v_s = 1.6 \cdot v_s \rightarrow v_s = \frac{1}{1.6} = 0.625 m^3$$

$$v_v = v_t - v_s = 1 - 0.625 = 0.375 m^3$$

$$w = \frac{P_w}{P_s} \rightarrow P_w = w \cdot P_s = 0.09 \cdot P_s$$

$$P_t = P_w + P_s = 1.09 \cdot P_s \rightarrow P_s = \frac{18}{1.09} = 16.51 \text{ KN}$$

$$P_w = P_t - P_s = 18 - 16.51 = 1.49 \text{ KN}$$

$$v_w = \frac{p_w}{\gamma_w} = \frac{1.49}{10} = 0.149 m^3$$

$$\gamma_d = \frac{p_s}{v_t} = \frac{16.51}{1} = 16.51 \text{ KN}/m^3$$

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = \frac{0.375}{1} = 0.375$$

$$Sr = \frac{v_w}{v_v} = \frac{0.149}{0.375} \times 100 = 39.73\%$$

A la saturation

$$v_v = v_w = 0.375 m^3 \rightarrow p_w = v_w \cdot \gamma_w = 0.375 \times 10 = 3.75 \text{ KN}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{p_s + p_w}{v_s + v_w} = \frac{16.51 + 3.75}{1} = 20.26 \text{ KN}/m^3$$

$$w_{sat} = \frac{p_w}{p_s} = \frac{3.75}{16.51} \times 100 = 22.71\%$$

Sol 02 :

$$\gamma_h = 20 \text{ KN}/m^3, \gamma_s = 26 \text{ KN}/m^3, w = 7.7\%, e = 0.4$$

$$e = \frac{v_v}{v_s} \rightarrow v_v = e \cdot v_s = 0.4 \cdot v_s$$

$$v_t = v_v + v_s = 1.4 \cdot v_s \rightarrow v_s = \frac{1}{1.4} = 0.714 m^3$$

$$v_v = v_t - v_s = 1 - 0.714 = 0.286 m^3$$

$$w = \frac{p_w}{p_s} \rightarrow p_w = w \cdot p_s = 0.077 \cdot p_s$$

$$p_t = p_w + p_s = 1.077 \cdot p_s \rightarrow p_s = \frac{20}{1.077} = 18.57 \text{ KN}$$

$$p_w = p_t - p_s = 20 - 18.57 = 1.43 \text{ KN}$$

$$v_w = \frac{p_w}{\gamma_w} = \frac{1.43}{10} = 0.143 m^3$$

$$\gamma_d = \frac{p_s}{v_t} = \frac{18.57}{1} = 18.57 \text{ KN}/m^3$$

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = \frac{0.286}{1} = 0.286$$

$$Sr = \frac{v_w}{v_v} = \frac{0.143}{0.286} \times 100 = 50\%$$

A la saturation

$$v_v = v_w = 0.286 m^3 \rightarrow p_w = v_w \cdot \gamma_w = 0.286 \times 10 = 2.86 \text{ KN}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{p_s + p_w}{v_s + v_w} = \frac{18.57 + 2.86}{1} = 21.43 \text{ KN/m}^3$$

$$w_{sat} = \frac{p_w}{p_s} = \frac{2.86}{18.57} \times 100 = 15.40\%$$

Sol 03 :

$$\gamma_s = 26 \text{ KN/m}^3, \eta = 0.6, Sr = 90\%$$

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} \rightarrow v_v = \eta \cdot v_t = 0.6 \times 1 = 0.6 m^3$$

$$v_t = v_v + v_s \rightarrow v_s = 1 - 0.6 = 0.4 m^3$$

$$v_w = Sr \cdot v_v = 0.9 \times 0.6 = 0.540 m^3$$

$$p_w = v_w \cdot \gamma_w = 0.54 \times 10 = 5.4 \text{ KN}$$

$$p_s = v_s \cdot \gamma_s = 0.4 \times 26 = 10.4 \text{ KN}$$

$$\gamma_h = \frac{p_s + p_w}{v_t} = \frac{10.4 + 5.4}{1} = 15.8 \text{ KN/m}^3$$

$$\gamma_d = \frac{p_s}{v_t} = \frac{10.4}{1} = 10.4 \text{ KN/m}^3$$

$$w = \frac{p_w}{p_s} = \frac{5.4}{10.4} \times 100 = 51.92\%$$

$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{0.6}{0.4} = 1.50$$

A la saturation

$$v_v = v_w = 0.6 m^3 \rightarrow p_w = v_w \cdot \gamma_w = 0.6 \times 10 = 6 \text{ KN}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{p_s + p_w}{v_s + v_w} = \frac{10.4 + 6}{1} = 16.4 \text{ KN/m}^3$$

$$w_{sat} = \frac{p_w}{p_s} = \frac{6}{10.4} \times 100 = 57.69\%$$

Sol 04 :

$$\gamma_s = 27 \text{ KN/m}^3, \eta = 0.7, Sr = 85\%$$

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} \rightarrow v_v = \eta \cdot v_t = 0.7 \times 1 = 0.7 \text{ m}^3$$

$$v_t = v_v + v_s \rightarrow v_s = 1 - 0.7 = 0.3 \text{ m}^3$$

$$v_w = Sr \cdot v_v = 0.85 \times 0.7 = 0.595 \text{ m}^3$$

$$p_w = v_w \cdot \gamma_w = 0.595 \times 10 = 5.95 \text{ KN}$$

$$p_s = v_s \cdot \gamma_s = 0.3 \times 27 = 8.1 \text{ KN}$$

$$\gamma_h = \frac{p_s + p_w}{v_t} = \frac{8.1 + 5.95}{1} = 14.05 \text{ KN/m}^3$$

$$\gamma_d = \frac{p_s}{v_t} = \frac{8.1}{1} = 8.1 \text{ KN/m}^3$$

$$w = \frac{p_w}{p_s} = \frac{5.95}{8.1} \times 100 = 73.46\%$$

$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{0.7}{0.3} = 2.33$$

A la saturation

$$v_v = v_w = 0.7 \text{ m}^3 \rightarrow p_w = v_w \cdot \gamma_w = 0.7 \times 10 = 7 \text{ KN}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{p_s + p_w}{v_s + v_w} = \frac{8.1 + 7}{1} = 15.1 \text{ KN/m}^3$$

$$w_{sat} = \frac{p_w}{p_s} = \frac{7}{8.1} \times 100 = 86.42\%$$

Sol 05 :

$$\gamma_h = 20 \text{ KN/m}^3, e = 0.53, Sr = 100\%$$

$$e = \frac{v_v}{v_s} \rightarrow v_v = e \cdot v_s = 0.53 \cdot v_s$$

$$v_t = v_v + v_s \rightarrow v_t = 1.53 \cdot v_s \rightarrow v_s = \frac{1}{1.53} = 0.654 \text{ m}^3$$

$$v_t = v_v + v_s \rightarrow v_v = 1 - 0.654 = 0.346 m^3$$

$$v_w = Sr \cdot v_v = 1 \times 0.346 = 0.346 m^3$$

$$p_w = v_w \cdot \gamma_w = 0.346 \times 10 = 3.46 KN$$

$$\gamma_h = \frac{p_s + p_w}{v_t} \rightarrow p_s = \gamma_h \cdot v_t - p_w = 20 \times 1 - 3.46 = 16.54 KN$$

$$\gamma_s = \frac{p_s}{v_s} = \frac{16.54}{0.654} = 25.29 KN/m^3$$

$$\gamma_d = \frac{p_s}{v_t} = \frac{16.54}{1} = 16.54 KN/m^3$$

$$w = \frac{p_w}{p_s} = \frac{3.46}{16.54} \times 100 = 20.92\%$$

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = \frac{0.346}{1} = 0.346$$

A la saturation

$$\gamma_{sat} = \frac{p_s + p_w}{v_s + v_w} = \frac{16.54 + 3.46}{1} = 20 KN/m^3$$

$$w_{sat} = \frac{p_w}{p_s} = \frac{3.46}{16.54} \times 100 = 20.92\%$$

Sol 06 :

$$\gamma_h = 22 KN/m^3, e = 0.8, Sr = 79\%$$

$$e = \frac{v_v}{v_s} \rightarrow v_v = e \cdot v_s = 0.8 \cdot v_s$$

$$v_t = v_v + v_s \rightarrow v_t = 1.8 \cdot v_s \rightarrow v_s = \frac{1}{1.8} = 0.556 m^3$$

$$v_t = v_v + v_s \rightarrow v_v = 1 - 0.556 = 0.444 m^3$$

$$v_w = Sr \cdot v_v = 0.79 \times 0.444 = 0.351 m^3$$

$$p_w = v_w \cdot \gamma_w = 0.351 \times 10 = 3.51 KN$$

$$\gamma_h = \frac{p_s + p_w}{v_t} \rightarrow p_s = \gamma_h \cdot v_t - p_w = 22 \times 1 - 3.51 = 18.49 KN$$

$$\gamma_s = \frac{p_s}{v_s} = \frac{18.49}{0.556} = 33.26 \text{ KN/m}^3$$

$$\gamma_d = \frac{p_s}{v_t} = \frac{18.49}{1} = 18.49 \text{ KN/m}^3$$

$$w = \frac{p_w}{p_s} = \frac{3.51}{18.49} \times 100 = 18.98\%$$

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = \frac{0.444}{1} = 0.444$$

A la saturation

$$v_v = v_w = 0.444 \text{ m}^3 \rightarrow p_w = v_w \cdot \gamma_w = 0.444 \times 10 = 4.44 \text{ KN}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{p_s + p_w}{v_s + v_w} = \frac{18.49 + 4.44}{1} = 22.93 \text{ KN/m}^3$$

$$w_{sat} = \frac{p_w}{p_s} = \frac{4.44}{18.49} \times 100 = 24.01\%$$

Donc le tableau redevient :

Sol	γ_h	γ_s	γ_d	ω	e	η	γ_{sat}	Sr	ω_{sat}
1	18	26.42	16.51	9	0.6	0.375	20.26	39.73	22.71
2	20	26	18.57	7.7	0.4	0.286	21.43	50	15.4
3	15.8	26	10.4	51.92	1.5	0.6	16.4	90	57.69
4	14.05	27	8.1	73.46	2.33	0.7	15.1	85	86.42
5	20	25.29	16.54	20.92	0.53	0.346	20	100	20.92
6	22	33.26	18.49	18.98	0.8	0.444	22.93	79	24.01

Sujet N° 09

Question de cours :

Vérifier la relation suivante

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{(1+e)}$$

Exercice 01:

Soit une argile humide de teneur en eau estimée de 10% si on vous informe que sa masse volumique est égale à 1.82 g/cm^3 et la densité des grains solides est de 2.7

Calculer son indice des vides, sa porosité, son degré de saturation.

Calculer la masse volumique de cette argile à l'état sec et à l'état saturé.

Exercice 02:

Calculer le coefficient de perméabilité déduit par un essai de perméabilité à charge variable effectué pour une argile sableuse si la hauteur du sol est 15 cm , la section du sol est de 25 cm^2 , l'aire du tube de mesure est de 2.3 cm^2 et les deux hauteurs du niveau de l'eau enregistrés au début de l'essai et après 24 h sont respectivement 7.02 cm et 10.4 cm .

Solution du sujet N° 09**Question de cours :**

$$\gamma_d = \frac{P_s}{v_t} = \frac{P_s}{v_s + v_v}$$

$$\gamma_d = \frac{p_s \cdot \frac{1}{v_s}}{(v_s + v_v) \cdot \frac{1}{v_s}} = \frac{\frac{p_s}{v_s}}{\left(\frac{v_s}{\gamma_s} + \frac{v_v}{v_s}\right)}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{(1+e)}$$

Exercice 01:

Calculant pour une unité de volume de 1cm^3 donc :

$$w = \frac{m_w}{m_s} = 0.1 \rightarrow m_w = 0.1 \cdot m_s$$

$$\rho_h = \frac{m_t}{v_t} = \frac{m_s + m_w}{v_s + v_v} = \frac{m_s + 0.1 \cdot m_s}{1} = 1.82 \text{ g/cm}^3$$

$$m_s = \frac{1.82 \times 1}{1.1} = 1.65 \text{ g}$$

$$m_w = 0.1 \cdot m_s = 0.1 \times 1.65 = 0.17 \text{ g}$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_s} \rightarrow v_s = \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{m_s}{\rho_w \cdot d_s} = \frac{1.65}{1 \times 2.7} = 0.611 \text{ cm}^3$$

$$\rho_w = \frac{m_w}{v_w} \rightarrow v_w = \frac{m_w}{\rho_w} = \frac{0.17}{1} = 0.170 \text{ cm}^3$$

$$v_t = v_s + v_w + v_a = 1 \text{ cm}^3$$

$$v_a = v_t - v_s - v_w = 1 - 0.611 - 0.170 = 0.219 \text{ cm}^3$$

$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{0.219 + 0.170}{0.611} = \frac{0.389}{0.611} = 0.637$$

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = \frac{0.389}{1} = 0.389$$

$$Sr = \frac{v_w}{v_v} \times 100 = \frac{0.170}{0.389} \times 100 = 43.70\%$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{v_t} = \frac{1.65}{1} = 1.65 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_t^{sat}}{v_t} = \frac{m_s + m_w^{sat}}{v_t} = \frac{m_s + v_v \cdot \rho_w}{v_t} = \frac{1.65 + 0.389 \times 1}{1} = 2.04 \text{ g/cm}^3$$

Exercice 02:

$$k = \frac{a \cdot l}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$$

$$k = \frac{2.3 \times 15}{25 \times 24 \times 3600} \cdot \ln\left(\frac{10.4}{7.02}\right) = 6.278 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

Sujet N° 10**Question de cours :**

Vérifier la relation suivante

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{(1+w)}$$

Exercice 01:

Un camion de transport de $10m^3$ transporte un sol pour remblaiement de densité de grains solides de 2.66, si le poids total de la garnison à l'état sec pesée sur un pont-bascule routier est de $190KN$ et $\gamma_w = 10 KN/m^3$, déterminer à la saturation :

1. Le volume d'eau nécessaire à ajouter
2. Le poids volumique
3. L'indice des vides et la porosité
4. La teneur en eau.

Exercice 02:

Dans un essai de Proctor sur une couche de sol destiné pour une couche de base pour un projet routier, l'essai a donné les résultats suivants :

d_d	w (%)
1.647	12
1.679	14
1.683	16
1.672	18
1.634	20
1.596	22

1. Tracer le diagramme de compactage.
2. Déterminer les caractéristiques optimales du compactage.
3. Si le cahier de charge exige un degré de compactage de $97\pm 1\%$ calculer l'intervalle de la densité sèche acceptée par ce cahier de charge.

Solution du sujet N° 10

Question de cours :

$$\gamma_d = \frac{p_s}{v_t} = \frac{p_s \cdot p_t}{v_t \cdot p_t} = \frac{p_s}{p_t} \cdot \gamma_h$$

$$\gamma_d = \frac{p_s}{p_t} \cdot \gamma_h = \frac{p_s}{p_s + p_w} \cdot \gamma_h = \frac{\cancel{p_s} \cdot \frac{1}{\cancel{p_s}}}{(p_s + p_w) \cdot \frac{1}{p_s}} \cdot \gamma_h$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{\left(\frac{\cancel{p_s}}{\cancel{p_s}} + \frac{p_w}{p_s}\right)}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{(1 + w)}$$

Exercice 01:

$$\gamma_d = \frac{p_s}{v_t} = \frac{190}{10} = 19 \text{ KN/m}^3$$

Par une unité de volume nous avons :

$$p_s = 19 \text{ KN}$$

$$\gamma_s = \frac{p_s}{v_s} \rightarrow v_s = \frac{p_s}{\gamma_s} = \frac{p_s}{\gamma_w \cdot d_s} = \frac{19}{10 \times 2.66} = 0.714 \text{ cm}^3$$

$$v_t = v_s + v_v \rightarrow v_v = v_t - v_s = 1 - 0.714 = 0.286 \text{ m}^3$$

A la saturation :

$$\Delta v = 0.286 \text{ m}^3$$

$$p_w = \gamma_w \cdot v_v = 10 \times 0.286 = 2.86 \text{ KN}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{p_t}{v_t} = \frac{19 + 2.86}{1} = 21.86 \text{ KN/m}^3$$

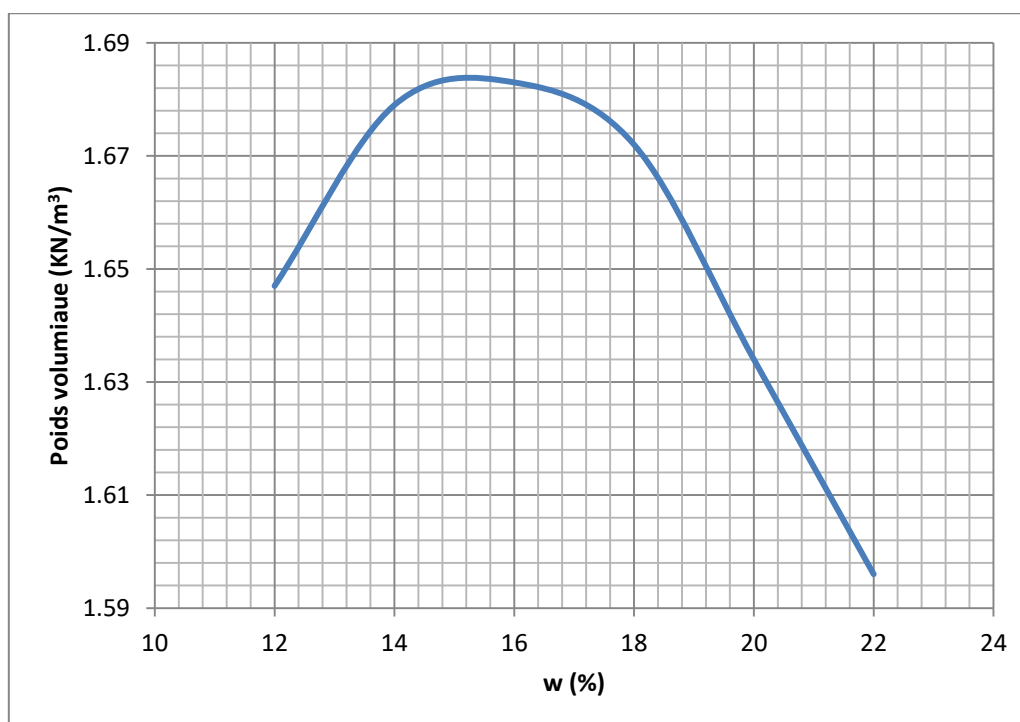
$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{0.286}{0.714} = 0.401$$

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = \frac{0.286}{1} = 0.286$$

$$w_{sat} = \frac{p_w}{p_s} \times 100 = \frac{2.86}{19} \times 100 = 15.05\%$$

Exercice 02:

1. Le diagramme de compactage :



2. Les caractéristiques optimales du compactage sont :

$$d_d^{\max} = 1.685, w^{\text{opt}} = 15.3\%$$

3. L'intervalle accepté est :

$$[96\% \times d_d ; 98\% \times d_d] = [1.618 ; 1.651]$$

Sujet N° 11**Question de cours :**

Vérifier la relation suivante

$$\gamma_h = \gamma_w \cdot \eta \cdot \left(\frac{d_s}{e} + Sr \right)$$

Exercice 01:

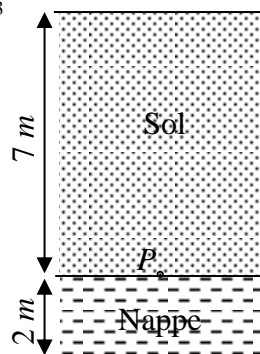
Complétez le tableau suivant

Diamètre des tamis [mm]	Passant [%]			
	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
4.75	100	84	33	100
2.0	100	72	20	100
0.425	100	55	10	100
0.15	95	19	5	100
0.075	92	10	2	95
D ₆₀	/	1.23	31	/
D ₃₀	/	0.345	5.12	/
D ₁₀	/			/
W _P	34	/	/	22
W _L	79	/	/	49
Classification USCS				

Exercice 02:

Calculer la contrainte effective du point P présenté dans la figure suivante si on vous informe que le sol en question est saturé et son poids volumique est de

$$\gamma_{sat} = 21.3 \text{ KN/m}^3 \text{ et } \gamma_w = 10 \text{ KN/m}^3$$



Solution du sujet N° 11

Question de cours :

$$\gamma_h = \frac{p_t}{v_t} = \frac{(p_s + p_w) \cdot \frac{1}{v_s}}{v_t \cdot \frac{1}{v_s}} = \frac{p_s + p_w}{\frac{v_t}{v_s}}$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s + \frac{\gamma_w \cdot v_w}{v_s}}{\frac{v_t}{v_s}} = \frac{\gamma_s + \frac{\gamma_w \cdot Sr \cdot v_v}{v_s}}{\frac{v_t}{v_s}}$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s + \frac{\gamma_w \cdot v_w}{v_s}}{\frac{v_t}{v_s}} = \frac{\gamma_s \cdot v_s + \frac{\gamma_w \cdot Sr \cdot v_v \cdot \gamma_s}{\gamma_s}}{v_t}$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s \cdot v_s \cdot \frac{v_v}{v_v} + \gamma_w \cdot Sr \cdot v_v}{v_t} = \gamma_s \cdot \frac{1}{e} \cdot \eta + \gamma_w \cdot Sr \cdot \eta$$

$$\gamma_h = \eta \cdot \gamma_w \left(\frac{\gamma_s}{e \cdot \gamma_w} + Sr \right)$$

$$\gamma_h = \gamma_w \cdot \eta \cdot \left(\frac{d_s}{e} + Sr \right)$$

Exercice 01:

Sol 01 :

Le passant par le tamis 0.075mm est 92% > 50% donc c'est un sol fin, $W_L = 79\%$ et la projection sur l'abaque de Casagrande avec $I_p = W_L - W_p = 79 - 34 = 45\%$ donc c'est un CH (Argiles inorganiques de plasticité élevée)

Sol 02 :

Le passant par le tamis 0.075mm est 10% < 50% donc c'est un sol grenu, le passant par le tamis 4.75mm est 84% > 50% donc c'est un sable,

$$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1.23}{0.075} = 16.4 > 6, \quad c_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{0.345^2}{1.23 \times 0.075} = 1.29 \in [1 - 3] \text{ donc c'est un}$$

SP, la présence des fines est de $10\% \in [5\% - 12\%]$ donc un double symbole avec un absence de plasticité donc c'est un SM, de cet effet le sol en question est un SM-SP (Sables uniformes, particules fines non plastiques)

Sol 03 :

Le passant par le tamis 0.075mm est $2\% < 50\%$ donc c'est un sol grenu, le passant par le tamis 4.75mm est $33\% < 50\%$ donc c'est un gravier, $c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{31}{0.425} = 72.94 > 4$

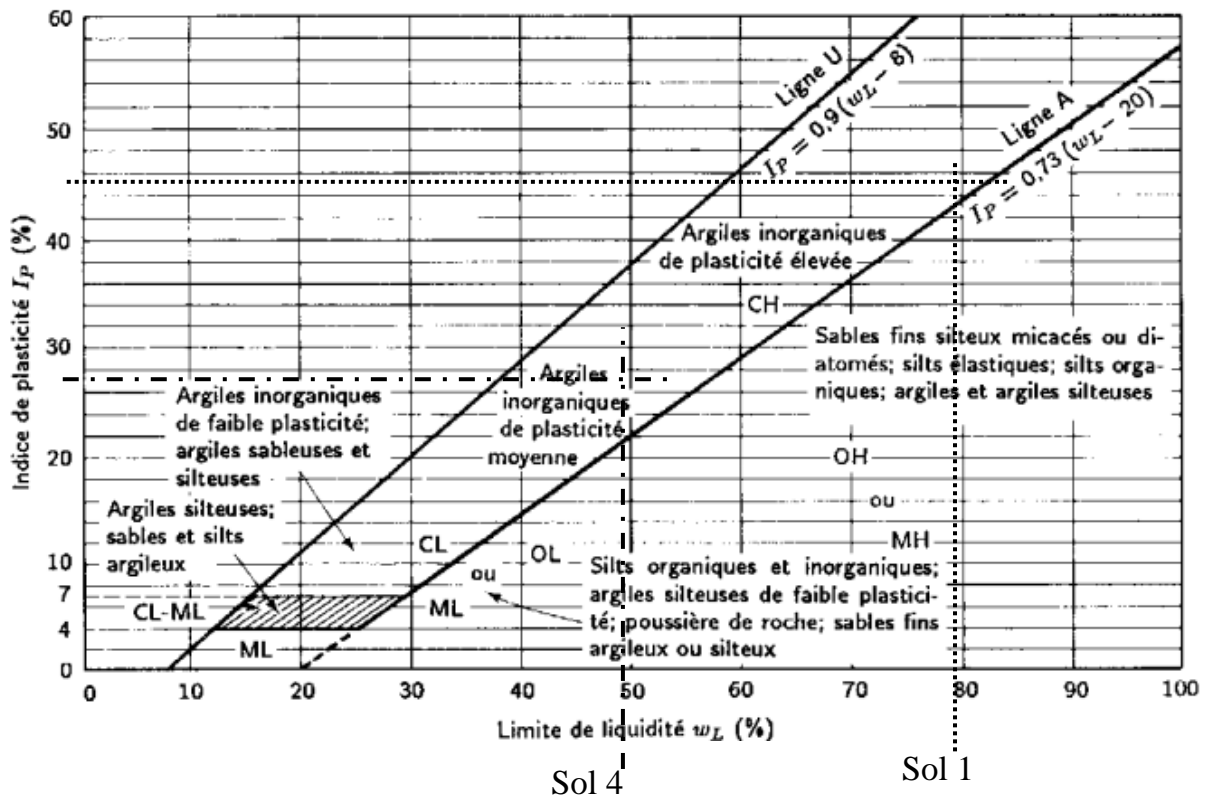
, $c_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{5.12^2}{31 \times 0.425} = 1.99 \in [1 - 3]$ donc c'est un GP (mélange graviers-sables avec peu de particules fines)

Sol 04 :

Le passant par le tamis 0.075mm est $95\% > 50\%$ donc c'est un sol fin, $W_L = 49\%$ et la projection sur l'abaque de Casagrande avec $I_p = W_L - W_P = 49 - 22 = 27\%$ donc c'est un CL (Argiles inorganiques de plasticité faible à moyenne)

Donc le tableau soit :

Diamètre des tamis [mm]	Passant [%]			
	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
4.75	100	84	33	100
2.0	100	72	20	100
0.425	100	55	10	100
0.15	95	19	5	100
0.075	92	10	2	95
D ₆₀	/	1.23	31	/
D ₃₀	/	0.345	5.12	/
D ₁₀	/	0.075	0.425	/
W _P	34	/	/	22
W _L	79	/	/	49
Classification USCS	CH	SM-SP	GP	CL



Exercice 02:

$$\sigma_t = \sigma' + u \rightarrow \sigma' = \sigma_t - u$$

$$\sigma_t = \gamma_{sat} \cdot h = 21.3 \times 7 = 149.1 \text{ KN/m}^2$$

$$u = \gamma_w \cdot h = 10 \times 0 = 0 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma' = 149.1 - 0 = 149.1 \text{ KN/m}^2$$

Sujet N° 12**Question de cours :**

Vérifier la relation suivante

$$\gamma' = (\gamma_s - \gamma_w) \cdot (1 - \eta)$$

Exercice 01:

Un remblaiement de 3.5m de hauteur et un indice de vide de 0.48 subit un compactage qui accroît l'indice de densité par 50% si on vous donne que l'indice des vides à l'état le plus lâche est de 0.85 et à l'état le plus dense est de 0.4.

Calculer l'indice de densité du sol

Calculer le changement de la hauteur du matériau après le compactage (aucune déformation dans les deux autres sens)

Calculer le changement de la hauteur entre les deux états du sol pour $I_D = 30\%$

Exercice 02:

Compléter le tableau suivant selon la classification LCPC:

Diamètre des tamis [mm]	Passant [%]			
	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
2.0	95	100	40	100
0.425	7	100	15	100
0.15	5	97	9	100
0.08	1	90	7	92
D ₆₀	0.67	0.06	3.5	0.064
D ₃₀	0.55	0.054	0.325	0.033
D ₁₀	0.47	0.032	0.165	0.012
W _P	/	8	24	34
W _L	/	12	36	55
Classification LCPC				

Solution du sujet N° 12**Question de cours :**

$$\gamma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w) = \gamma_w \cdot \left(\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} - 1 \right)$$

$$\gamma' = \gamma_w \cdot \left(\frac{P_t/v_t}{P_w/v_w} - 1 \right) = \gamma_w \cdot \left(\frac{P_t \cdot v_w}{P_w \cdot v_t} - 1 \right)$$

A la saturation $v_v = v_w$

$$\gamma' = \gamma_w \cdot \left(\frac{P_t \cdot v_v}{P_w \cdot v_t} - 1 \right) = \gamma_w \cdot \left(\frac{P_t}{P_w} \cdot \eta - 1 \right)$$

$$\gamma' = \gamma_w \cdot \left(\frac{P_s + P_w}{P_w} \cdot \eta - 1 \right) = \gamma_w \cdot \left(\frac{P_s}{P_w} \cdot \eta + \eta - 1 \right)$$

$$\gamma' = \gamma_w \cdot \left(\frac{\gamma_s \cdot v_s}{\gamma_w \cdot v_v} \cdot \eta + \eta - 1 \right) = \gamma_w \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w \cdot e} \cdot \eta + \eta - 1 \right)$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s}{e} \cdot \eta + \gamma_w \cdot (\eta - 1) = \frac{\gamma_s}{v_v/v_s} \cdot \eta + \gamma_w \cdot (\eta - 1)$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s}{v_v \cdot v_t/v_s \cdot v_t} \cdot \eta + \gamma_w \cdot (\eta - 1) = \frac{\gamma_s}{\eta \cdot v_t/v_s} \cdot \eta + \gamma_w \cdot (\eta - 1)$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s}{v_t/v_t - v_v} + \gamma_w \cdot (\eta - 1) = \gamma_s \frac{\eta - v_v}{\eta} + \gamma_w \cdot (\eta - 1)$$

$$\gamma' = \frac{\gamma_s}{v_t/v_t - v_v} + \gamma_w \cdot (\eta - 1) = \gamma_s (1 - \eta) + \gamma_w \cdot (\eta - 1)$$

$$\gamma' = (\gamma_s - \gamma_w) \cdot (1 - \eta)$$

Exercice 01:

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 = \frac{0.85 - 0.48}{0.85 - 0.4} \times 100 = 82.22\%$$

$$\Delta e = \frac{\Delta v_v}{v_s} \text{ avec } v_s = cst$$

$$\Delta v_v = \Delta h \cdot S \text{ avec } S = cst$$

$$\Delta e = \frac{\Delta h}{h} \rightarrow \Delta h = \Delta e \cdot h$$

$$\Delta h = 0.45 \times 2.5 = 1.125 m$$

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 = 30\%$$

$$e = e_{\max} - I_D \frac{e_{\max} - e_{\min}}{100} = 0.85 - 30 \times \frac{0.85 - 0.4}{100} = 0.715$$

$$\Delta h = \Delta e \cdot h$$

$$\Delta h = (0.715 - 0.48) \times 2.5 = 0.59 m$$

Exercice 02:

Sol 01 :

Le passant par le tamis $0.08mm$ est $1\% < 50\%$ donc c'est un sol grenu, le passant par le tamis $2mm$ est $95\% > 50\%$ donc c'est un sable, $c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1.23}{0.075} = 16.4 > 6$ avec

absence des particules fines donc c'est un SM (Sable mal gradué)

Sol 02 :

Le passant par le tamis $0.08mm$ est $90\% > 50\%$ donc c'est un sol fin, $W_L = 12\% < 50\%$ et la projection sur l'abaque de plasticité avec $I_p = W_L - W_P = 12 - 8 = 4\%$ donc c'est un AP (Argiles peu plastique)

Sol 03 :

Le passant par le tamis $0.08mm$ est $7\% < 50\%$ donc c'est un sol grenu, le passant par le tamis $2mm$ est $40\% < 50\%$ donc c'est un gravier, $c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{3.5}{0.165} = 21.21 > 4$,

$c_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{0.325^2}{3.5 \times 0.165} = 0.18 \notin [1-3]$ donc c'est un GM avec la présence des fines est de 7% et $W_L = 36\%$ donc double symbole, la projection sur l'abaque de plasticité avec $I_p = W_L - W_P = 36 - 24 = 12\%$ donc c'est un GA delà c'est un GM-GA (Gravier argileuse mal graduée)

Sol 04 :

Le passant par le tamis 0.08mm est $92\% > 50\%$ donc c'est un sol fin, $W_L = 55\%$ et la projection sur l'abaque de plasticité avec $I_p = W_L - W_P = 55 - 34 = 21\%$ don c'est un LT (Limon très plastique)

Diamètre des tamis [mm]	Passant [%]			
	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4
2.0	95	100	40	100
0.425	7	100	15	100
0.15	5	97	9	100
0.08	1	90	7	92
D₆₀	0.67	0.06	3.5	0.064
D₃₀	0.55	0.054	0.325	0.033
D₁₀	0.47	0.032	0.165	0.012
W_P	/	8	24	34
W_L	/	12	36	55
Classification LCPC	SM	AP	GM-GA	LT

Sujet N° 13**Question de cours :**

Vérifier la relation suivante

$$Sr = \frac{d_s \cdot w \cdot \gamma_h}{\gamma_s (1 + w) - \gamma_h}$$

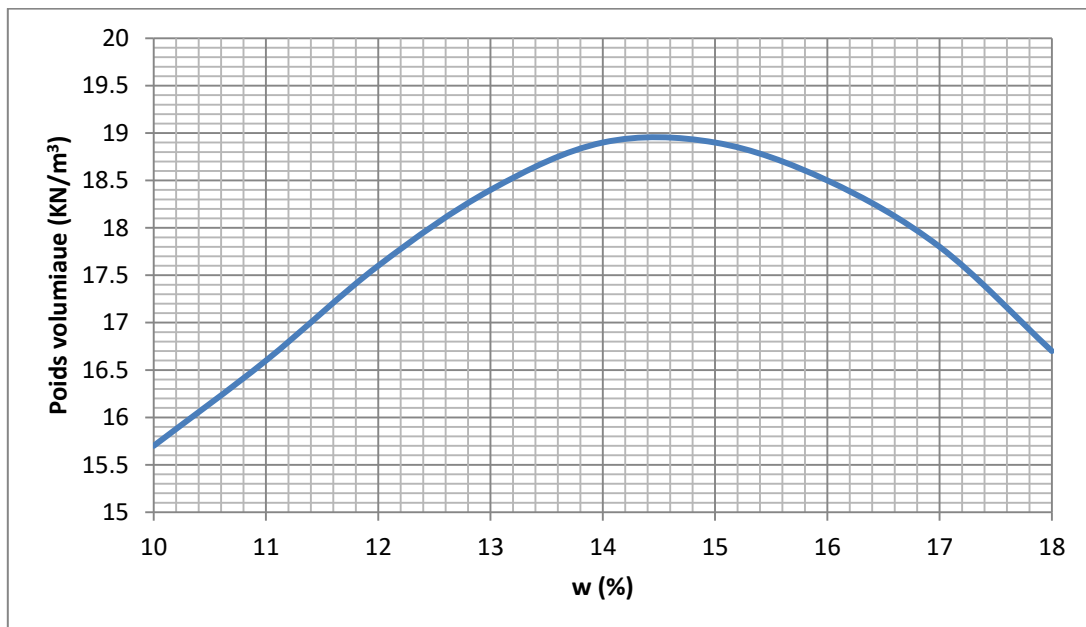
Exercice 01:

Le poids volumique spécifique d'un sol est de 26.8 KN/m^3 , si à une teneur en eau de 42% son poids volumique est de 15.2 KN/m^3 . Calculer son poids volumique sec γ_d et son degré de saturation si $\gamma_h = 10 \text{ KN/m}^3$.

Calculer à la saturation sa teneur en eau et son poids volumique humide.

Exercice 02:

Soit la courbe de compactage tracer après un essai de Proctor d'une argile sableuse représentée en $\gamma_d = f(w)$ suivante :



1. Déterminer les caractéristiques optimales du compactage pour ce sol
2. Que serai le volume d'eau à ajouter pour atteindre l'état optimal si le sol à un poids volumique sec de $\gamma_d = 17 \text{ KN/m}^3$

Solution du sujet N° 13

Question de cours :

$$Sr = \frac{v_w}{v_v} = \frac{p_w/\gamma_w}{v_t - v_s} = \frac{p_w}{\gamma_w \cdot (p_t/\gamma_h - p_s/\gamma_s)}$$

$$Sr = \frac{1}{\gamma_w \cdot (p_t/p_w \cdot \gamma_h - p_s/\gamma_s) \cdot 1/p_w} = \frac{1}{\gamma_w \cdot (p_t/\gamma_h - 1/w \cdot \gamma_s)}$$

$$Sr = \frac{1}{\gamma_w \cdot (p_t \cdot w \cdot \gamma_s - \gamma_h \cdot p_w) / \gamma_h \cdot p_w \cdot w \cdot \gamma_s} = \frac{\gamma_h \cdot p_w \cdot w \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot (p_t \cdot w \cdot \gamma_s - \gamma_h \cdot p_w)}$$

$$Sr = \frac{\gamma_h \cdot \rho_w \cdot w \cdot \gamma_s \cdot \frac{1}{\rho_w}}{\gamma_w \cdot ((\rho_w + p_s) \cdot \frac{1}{\rho_w} \cdot w \cdot \gamma_s - \gamma_h \cdot \rho_w \cdot \frac{1}{\rho_w})} = \frac{\gamma_h \cdot w \cdot d_s}{(1 + \frac{1}{w}) \cdot w \cdot \gamma_s - \gamma_h}$$

$$Sr = \frac{d_s \cdot w \cdot \gamma_h}{\gamma_s(1 + w) - \gamma_h}$$

Exercice 01:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + w} = \frac{15.2}{1 + 0.42} = 10.7 \text{ KN/m}^3$$

Pour le degré de saturation on utilise la relation précédente :

$$Sr = \frac{\frac{26.6}{10} \times 0.42 \times 15.2}{26.8 \times (1 + 0.42) - 15.2} \times 100 = 74.30\%$$

A la saturation $Sr = 1$ donc
$$\frac{d_s \cdot w^{sr} \cdot \gamma_{sat}}{\gamma_s(1 + w^{sr}) - \gamma_{sat}} = 1$$

$$d_s \cdot w^{sr} \cdot \gamma_{sat} = \gamma_s(1 + w^{sr}) - \gamma_{sat}$$

$$d_s \cdot w^{sr} \cdot \gamma_{sat} - \gamma_s \cdot w^{sr} = \gamma_s - \gamma_{sat}$$

$$(d_s \cdot \gamma_{sat} - \gamma_s) \cdot w^{sr} = \gamma_s - \gamma_{sat}$$

$$(d_s \cdot \gamma_d \cdot (1 + w^{sr}) - \gamma_s) \cdot w^{sr} = \gamma_s - \gamma_d \cdot (1 + w^{sr})$$

$$(d_s \cdot \gamma_d + d_s \cdot \gamma_d \cdot w^{sr} - \gamma_s) \cdot w^{sr} = \gamma_s - \gamma_d - \gamma_d \cdot w^{sr}$$

$$(d_s \cdot \gamma_d + \gamma_d - \gamma_s + d_s \cdot \gamma_d \cdot w^{sr}) \cdot w^{sr} = \gamma_s - \gamma_d$$

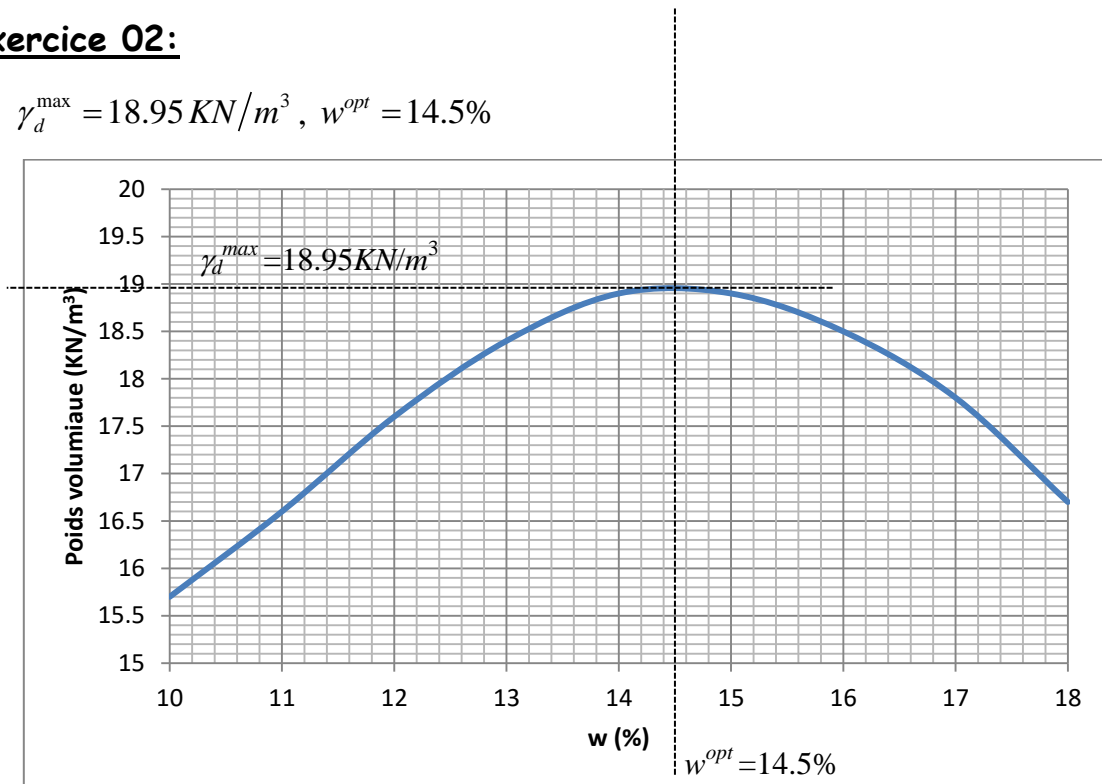
$$d_s \cdot \gamma_d \cdot (w^{sr})^2 + (\gamma_d \cdot (d_s + 1) - \gamma_s) \cdot w^{sr} + (\gamma_d - \gamma_s) = 0$$

$$28.462 \times (w^{sr})^2 + 12.562 \times w^{sr} - 15.9 = 0 \text{ donc } w^{sr} \approx 55.87\%$$

$$\gamma_{sat} = \gamma_d \cdot (1 + w^{sr}) = 10.7 \times (1 + 0.56) = 16.96 \text{ KN/m}^3$$

Exercice 02:

1. $\gamma_d^{max} = 18.95 \text{ KN/m}^3$, $w^{opt} = 14.5\%$



2. De la courbe de compactage

$$\gamma_d = 17 \text{ KN/m}^3 \rightarrow w = 11.4\%$$

$$\gamma_{h1} = (1 + w) \cdot \gamma_d = (1 + 0.114) \times 17 = 18.94 \text{ KN/m}^3$$

$$\gamma_d^{max} = 18.95 \text{ KN/m}^3 \rightarrow w^{opt} = 14.5\%$$

$$\gamma_{h2} = (1 + w^{opt}) \cdot \gamma_d^{max} = (1 + 0.145) \times 18.95 = 21.70 \text{ KN/m}^3$$

$$\gamma_h = \frac{p_t}{v_t} = \frac{p_s + p_w}{v_t} \text{ avec } v_t = 1 \text{ m}^3 \text{ et } p_s = cst \text{ donc}$$

$$\Delta \gamma_h = \frac{\Delta p_w}{v_t} = 21.07 - 18.94 = 2.13 \text{ KN/m}^3$$

Par 1 m^3 la quantité d'eau est de 2.13 KN donc $\Delta v_w = \frac{p_w}{\gamma_w} = \frac{2.13}{9.81} = 0.217 \text{ m}^3 = 217 \text{ litres}$

Sujet N° 14

Question de cours :

Vérifier la relation suivante

$$w = \frac{\gamma_h}{\gamma_d} - 1$$

Exercice 01:

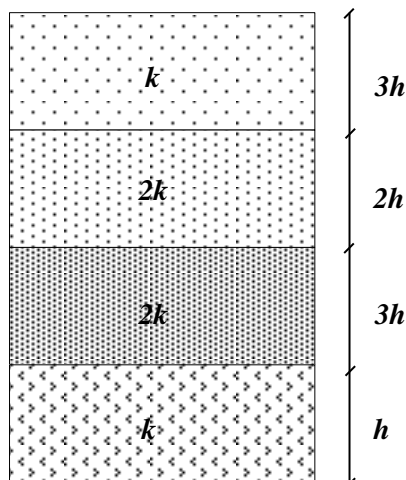
Lors d'un prélèvement d'un échantillon de sol saturé son poids était de $0.83 \times 10^{-3} \text{ KN}$ avec un volume de 55.33 cm^3 . Après passage à l'étuve son poids est devenu $0.45 \times 10^{-3} \text{ KN}$. Calculer :

1. Sa teneur en eau et son poids volumique à la saturation
2. Son indice des vides et la densité sèche des grains solides

Exercice 02:

Un massif de sol composé de quatre couches de sols différents superposées l'unes aux autres. Les dimensions et les coefficients de perméabilité de chaque couche sont représentés à la figure suivante :

1. Si le coefficient de perméabilité horizontal du massif entier est estimé de $0.4 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, calculer le coefficient de perméabilité de chaque couche.
2. Calculer le coefficient de perméabilité horizontal du massif entier



Solution du sujet N° 14**Question de cours :**

$$w = \frac{\gamma_h}{\gamma_d} - 1$$

$$w = \frac{P_w}{P_s} = \frac{P_t - P_s}{P_s} = \frac{(P_t - P_s) \times \frac{1}{v_t}}{P_s \times \frac{1}{v_t}} = \frac{P_t/v_t - P_s/v_t}{P_s/v_t}$$

$$w = \frac{\gamma_h - \gamma_d}{\gamma_d} = \frac{\gamma_h}{\gamma_d} - 1$$

Exercice 01:

$$P_t = 0.83 \times 10^{-3} \text{ KN}$$

$$P_s = 0.45 \times 10^{-3} \text{ KN}$$

$$v_t = 55.33 \text{ cm}^3$$

1. Calcul de w et γ_{sat}

$$w = \frac{P_w}{P_s}, P_w = P_t - P_s = 0.83 - 0.45 = 0.38 \times 10^{-3} \text{ KN}$$

$$w = \frac{0.38}{0.45} \times 100 = 84.44\%$$

$$\gamma_{sat} = \frac{P_t}{v_t} = \frac{0.83 \times 10^{-3}}{55.33 \times 10^{-6}} = 15 \text{ KN/m}^3$$

2. Calcul de e et d_s

$$e = \frac{v_v}{v_s}, \text{ à la saturation } v_v = v_w = \frac{P_w}{\gamma_w} = \frac{0.38 \times 10^{-3}}{10} = 0.38 \times 10^{-4} \text{ m}^3 = 38 \text{ cm}^3$$

$$v_s = v_t - v_w = 55.33 - 38 = 17.33 \text{ cm}^3 = 17.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$e = \frac{38}{17.33} = 2.19$$

$$d_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}, \gamma_s = P_s / 1 m^3$$

$$\Rightarrow \begin{array}{ccc} 0.45 \times 10^{-3} & \rightarrow & 17.33 \times 10^{-6} \\ \gamma_s & \rightarrow & 1 \end{array}$$

$$\gamma_s = \frac{0.45 \times 10^{-3}}{17.33 \times 10^{-6}} = 25.96 \text{ KN/m}^3$$

$$d_s = \frac{25.96}{10} = 2.596$$

Exercice 02:

$$k_H \cdot \sum_1^n h_i = \sum_1^n k_i \cdot h_i$$

$$k_H \cdot \sum_1^4 h_i = \sum_1^4 k_i \cdot h_i$$

$$k_H \cdot (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) = k_1 \cdot h_1 + k_2 \cdot h_2 + k_3 \cdot h_3 + k_4 \cdot h_4$$

$$k_H \cdot (3h + 2h + 3h + h) = k \cdot 3h + 2k \cdot 2h + 2k \cdot 3h + k \cdot h$$

$$9 \cdot k_H \cdot h = 14 \cdot k \cdot h$$

$$9k_H \cdot \mathcal{H} = 14 \cdot k \cdot \mathcal{H}$$

$$k = \frac{9k_H}{14} = \frac{9 \times 0.4 \times 10^{-3}}{14} = 0.26 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

Donc : $k_1 = k_4 = 0.26 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ et $k_2 = k_3 = 0.52 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$

Perméabilité verticale

$$\frac{\sum_1^n h_i}{k_v} = \sum_1^n \frac{h_i}{k_i}$$

$$\frac{\sum_1^4 h_i}{k_v} = \sum_1^4 \frac{h_i}{k_i}$$

$$\frac{9\mathcal{H}}{k_v} = \frac{3\mathcal{H}}{k} + \frac{2\mathcal{H}}{2k} + \frac{3\mathcal{H}}{2k} + \frac{\mathcal{H}}{k}$$

$$\frac{9}{k_v} = \frac{1}{k} \left(3 + 1 + \frac{3}{2} + 1 \right)$$

$$k_v = \frac{9 \cdot k}{\frac{13}{2}} = \frac{18 \cdot k}{13}$$

$$k_v = 0.36 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$

Sujet N° 15**Question de cours :**

Vérifier la relation suivante

$$\eta = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

Exercice 01:

Deux échantillons de sol sont analysés au laboratoire, avec une teneur en eau de 0.65 le premier échantillon a donné $\omega_l = 72\%$ et $I_p = 35$, tandis que le second échantillon avec une teneur en eau de 0.3 a donné $\omega_l = 72\%$ et $\omega_p = 37$. Calculer ω_p du premier échantillon et I_p du second. Calculer les indices de consistance des deux échantillons I_c . Que peut-on déduire de ces résultats.

Exercice 02:

Un massif de sol saturé et émergé dans une nappe phréatique, si le sol à une surface horizontale plane et ça profondeur est de $8m$ par contre la profondeur de la nappe est de $3m$. Si on considère que $\gamma_w = 10 \text{ KN} / m^3$ et $\gamma_{sat} = 18.4 \text{ KN} / m^3$

1. Calculer la contrainte totale et effective à la profondeur de la couche ;
2. Tracer le diagramme des contraintes u , σ' et σ_T sur la profondeur de la couche entière (nappe et sol)

Solution du sujet N° 15

Question de cours :

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = \frac{v_t - v_s}{v_t} = 1 - \frac{v_s}{v_t} = \frac{v_s}{v_s} - \frac{v_s}{v_t} = v_s \left(\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_t} \right)$$

On introduisant $\frac{1}{v_s}$ dans l'équation on aura

$$\eta = v_s \left(\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_t} \right) \times \frac{1/v_s}{1/v_s} = \frac{\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_t}}{1/v_s} = \frac{P_s}{P_s} \times \frac{\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_t}}{1/v_s}$$

$$\eta = \frac{P_s/v_s - P_s/v_t}{P_s/v_s} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s}$$

$$\eta = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

Exercice 01:

$$1. \quad I_p = \omega_l - \omega_p$$

Pour l'échantillon 1 :

$$\omega_{p1} = \omega_{l1} - I_{p1} = 72 - 35 = 37\%$$

Pour l'échantillon 1 :

$$I_{p2} = \omega_{l2} - \omega_{p2} = 72 - 37 = 35\%$$

2. Les indices de consistance :

$$I_{C1} = \frac{\omega_{L1} - \omega_1}{\omega_{L1} - \omega_{p1}} = \frac{72 - 65}{72 - 37} = 0.2 \text{ (état plastique)}$$

$$I_{C2} = \frac{\omega_{L2} - \omega_2}{\omega_{L2} - \omega_{p2}} = \frac{72 - 30}{72 - 37} = 1.2 \text{ (état solide)}$$

$$3. \quad \omega_{p1} = \omega_{p2} = 37\%, \quad \omega_{l1} = \omega_{l2} = 72\%, \quad \omega_1 = 65\% \neq \omega_2 = 30\%$$

Les deux échantillons ont les mêmes limites de consistance mais dans deux états différents.

Exercice 02:

1. Contrainte totale et effective à la profondeur

$$\sigma_T = \gamma_w \cdot h_{nappe} + \gamma_{sat} \cdot h_{sol}$$

$$\sigma_T = 10 \times 3 + 18.4 \times 8 = 177.2 \text{ KN} / \text{m}^2$$

$$\sigma' = \sigma_T - u = \sigma_T - (h_{sol} + h_{nappe}) \cdot \gamma_w$$

$$\sigma' = 177.2 - (8 + 3) \times 10 = 67.2 \text{ KN} / \text{m}^2$$

2. Représentation des contraintes à la profondeur (0, 3 et 11m)

 $u :$

$$\text{à } 0\text{m} \rightarrow u = 0 \text{ KN} / \text{m}^2$$

$$\text{à } 3\text{m} \rightarrow u = 10 \times 3 = 30 \text{ KN} / \text{m}^2$$

$$\text{à } 11\text{m} \rightarrow u = 10 \times 11 = 110 \text{ KN} / \text{m}^2$$

 $\sigma' :$

$$\text{à } 0\text{m} \rightarrow \sigma' = 0 \text{ KN} / \text{m}^2$$

$$\text{à } 3\text{m} \rightarrow \sigma' = 0 \text{ KN} / \text{m}^2$$

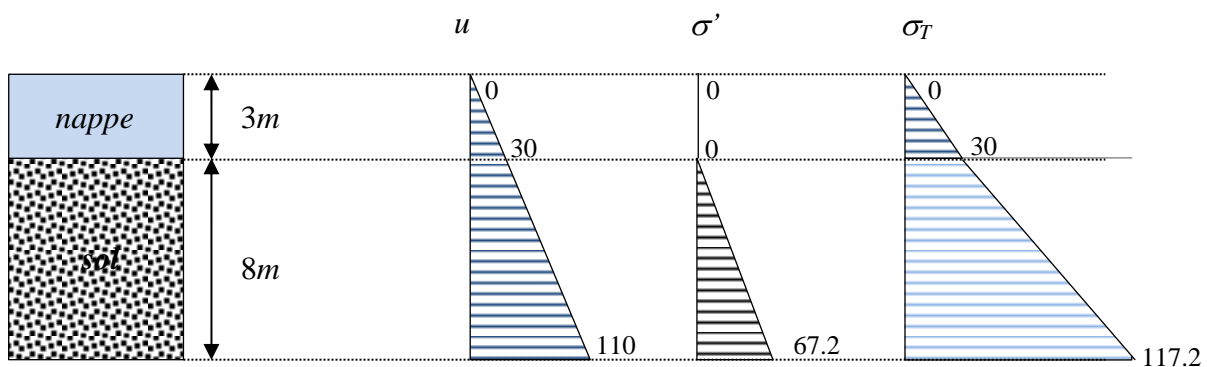
$$\text{à } 11\text{m} \rightarrow \sigma' = 67.2 \text{ KN} / \text{m}^2$$

 $\sigma_T :$

$$\text{à } 0\text{m} \rightarrow \sigma_T = 0 \text{ KN} / \text{m}^2$$

$$\text{à } 3\text{m} \rightarrow \sigma_T = 10 \times 3 = 30 \text{ KN} / \text{m}^2$$

$$\text{à } 11\text{m} \rightarrow \sigma_T = 177.2 \text{ KN} / \text{m}^2$$



Sujet N° 16

Question de cours :

Vérifier la relation suivante

$$e = \frac{d_s}{d_d} - 1$$

Exercice 01:

Selon la classification LCPC classer le sol suivant si on vous informe que la totalité de ces grains passe par le tamis 2mm et 86% sont retenus sur le tamis 0.08mm. Avec 60% des particules passent par le tamis 1.6mm et 30% passent par le amis 1mm tandis que 10% passent par le tamis 0.05mm. L'analyse des particules fines a montré que le sol est non plastique avec $W_l = 40\%$.

Exercice 02:

Calculer le poids volumique humide d'un sol argileux dans les deux états distinctes $w = 18\%$ et $w = 34\%$ si on vous informe que sa porosité est de 64% et la densité des grains solide est de 2.66

Solution du sujet N° 16

Question de cours :

$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{v_t - v_s}{v_s} = \frac{v_t}{v_s} - 1 = \frac{v_t/v_s}{v_t/v_s} \times \left(\frac{v_t}{v_s} - 1 \right)$$

$$e = \frac{1/v_s}{1/v_t} - 1 = \frac{P_s}{P_s} \times \left(\frac{1/v_s}{1/v_t} - 1 \right) = \frac{P_s/v_s}{P_s/v_t} - 1 = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 = \frac{d_s \times \gamma_w}{d_d \times \gamma_w} - 1$$

$$e = \frac{d_s}{d_d} - 1$$

Exercice 01:

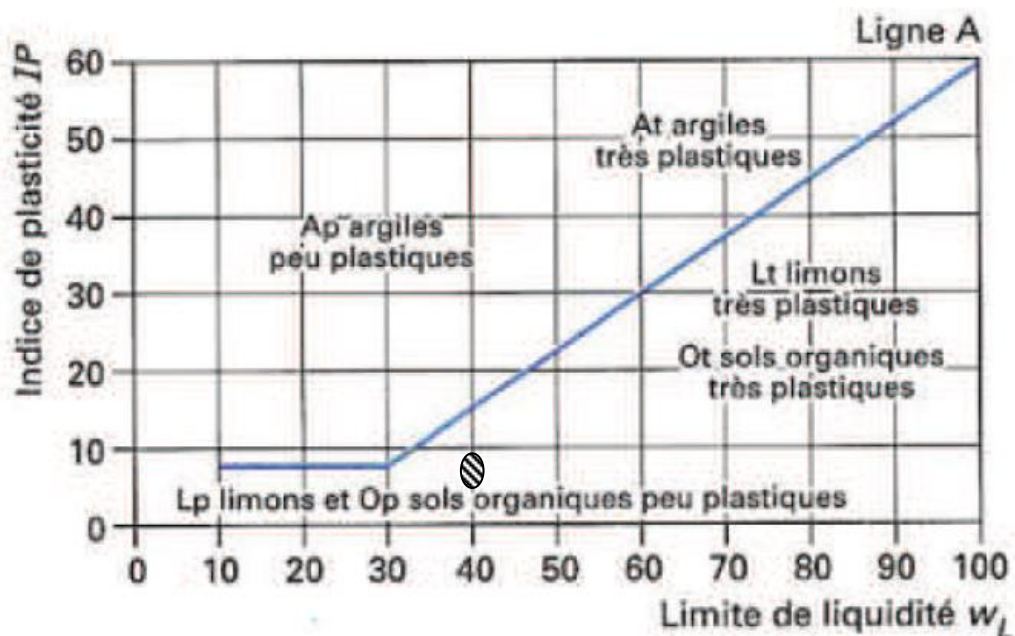
Selon la classification LCPC :

86% retenus par 0.08mm → sol grenu

100% passent par 2mm → Sable (SB, SM, SL ou SA)

100 – 86 = 14% > 12% des particules fines donc c'est un sable non propre (SL ou SA)

Pas de plasticité → I_p entre 0 et 5 et $W_l = 40\%$ donc le sol est au-dessous de la ligne A



Le sol est un Sable limoneux (SL).

Exercice 02:

$$\gamma_h = \frac{P_t}{v_t} = \frac{P_w + P_s}{v_v + v_s} \dots\dots\dots (1)$$

$$w = \frac{P_w}{P_s} \Rightarrow P_w = w \cdot P_s \dots\dots\dots (2)$$

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} \Rightarrow v_v = \eta \cdot v_t = \eta \cdot (v_v + v_s)$$

$$(1 - \eta) \cdot v_v = \eta \cdot v_s \Rightarrow v_v = \frac{\eta}{1 - \eta} \cdot v_s$$

$$v_v = 1.78v_s \dots\dots\dots (3)$$

$$\gamma_s = \frac{P_s}{v_s} \Rightarrow v_s = \frac{P_s}{\gamma_s} = \frac{P_s}{\gamma_w \cdot d_s} = 0.0376P_s \dots\dots\dots (4)$$

Remplaçant (3) et (2) en (1)

$$\gamma_h = \frac{w \cdot P_s + P_s}{1.78v_s + v_s} = \frac{(w+1)P_s}{2.78v_s} \dots\dots\dots (5)$$

Remplaçant (4) en (5)

$$\gamma_h = \frac{(w+1)P_s}{2.78 \times 0.0376P_s} = \frac{w+1}{0.1045}$$

Pour $w = 18\%$, $\gamma_h = \frac{1.18}{0.1045} = 11.29 \text{ KN} / \text{m}^3$

et $w = 34\%$, $\gamma_h = \frac{1.34}{0.1045} = 12.82 \text{ KN} / \text{m}^3$

Sujet N° 17**Question de cours :**

Vérifier la relation suivante

$$\gamma_h = (1 - \eta)(1 + w)\gamma_s$$

Exercice 01:

1. Compléter le tableau

Module	Diamètre de tamis [mm]	Refus [g]	Refus cumulé [g]	Tamisât [g]	% Tamisât
1	12.5	0			
2	10	14			
3	8	9.2			
4	5	29.3			
5	4	35.2			
6	3.15	47.2			
7	2.5	63.3			
8	2	126.8			
9	1.6	155.6			
10	1.25	167.2			
11	1	236			
12	0.8	273.2			
13	0.63	240.4			
14	0.5	219.2			
15	0.4	180.8			
16	0.315	120			
17	0.25	55.2			
18	0.2	16.4			
19	0.16	5.2			
20	0.125	1.2			
21	0.1	0.8			
22	0.08	0.6			
23	0	3.2			

2. Tracer la courbe granulométrique
3. Calculer les coefficients C_u et C_c
4. Classer le sol

Exercice 02:

Pour l'exécution d'un tronçon de route nous avons besoin d'un volume de 195000 m^3 de sol compacté. Le sol choisi pour cette opération est un gisement décapé à une proximité du chantier. Les résultats de l'essai de Proctor au laboratoire ont donné les résultats récapitulés dans le tableau suivant :

$\gamma_d \text{ (KN/m}^3\text{)}$	16.5	16.8	17.0	17.15	17.18	17	16.7
$\omega \text{ (\%)}$	10	11	12	13	14	15	16

1. Tracer la courbe de compactage
2. Donner les valeurs optimales de la courbe

Si on vous informe que le sol sur le terrain a une valeur de $\gamma_d = 16.1 \text{ KN / m}^3$ et une teneur en eau estimée à 10%

3. Calculer le volume de sol nécessaire du gisement pour exécuter les travaux désirés
4. Calculer le volume global nécessaire pour l'exécution.

Solution du sujet N° 17**Question de cours :**

$$\gamma_h = \frac{P_t}{v_t}$$

On introduisant γ_s dans l'équation on aura

$$\gamma_h = \frac{P_t}{v_t} \times \frac{\gamma_s}{\gamma_s} = \frac{P_t}{v_t} \times \frac{P_s}{v_s} \times \frac{v_s}{P_s} = \frac{v_s}{v_t} \times \frac{P_t}{P_s} \times \frac{P_s}{v_s}$$

$$\gamma_h = \left(\frac{v_t - v_v}{v_t} \right) \times \left(\frac{P_s + P_w}{P_s} \right) \times \frac{P_s}{v_s} = \left(1 - \frac{v_v}{v_t} \right) \times \left(1 + \frac{P_w}{P_s} \right) \times \frac{P_s}{v_s}$$

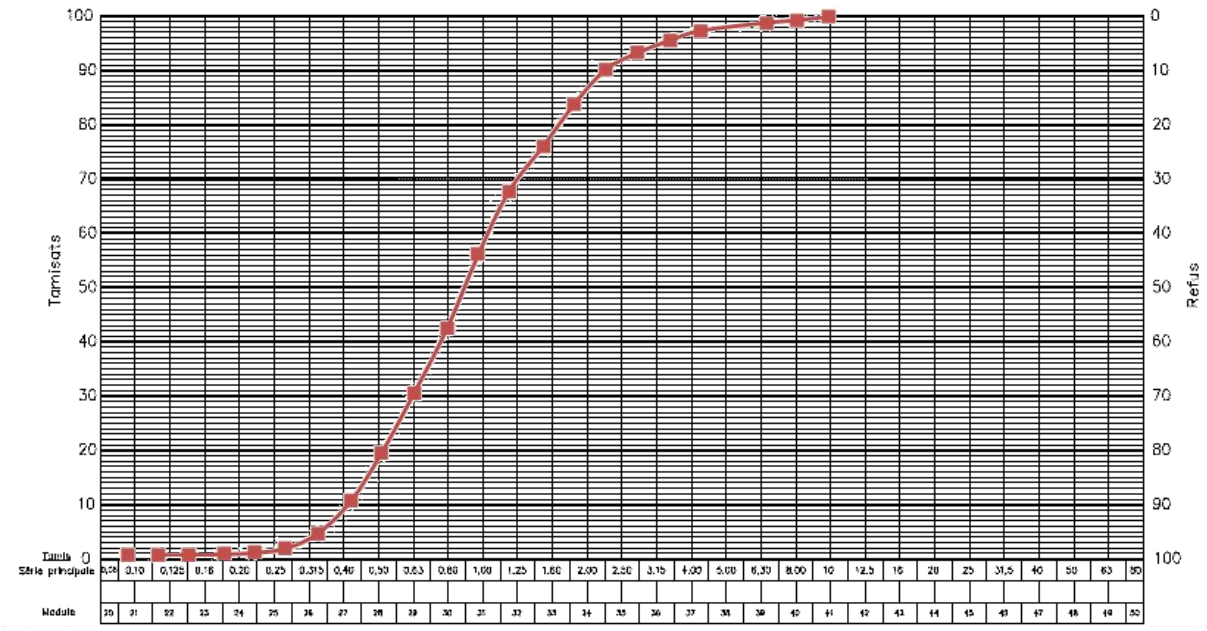
$$\gamma_h = (1 - \eta)(1 + w)\gamma_s$$

Exercice 01:

1. Tableau :

Module	Diamètre de tamis [mm]	Refus [g]	Refus cumulé [g]	Tamisât [g]	% Tamisât
1	12.5	0	0	2000	100
2	10	14	14	1986	99.3
3	8	9.2	23.2	1976.8	98.84
4	5	29.3	52.5	1947.5	97.375
5	4	35.2	87.7	1912.3	95.615
6	3.15	47.2	134.9	1865.1	93.255
7	2.5	63.3	198.2	1801.8	90.09
8	2	126.8	325	1675	83.75
9	1.6	155.6	480.6	1519.4	75.97
10	1.25	167.2	647.8	1352.2	67.61
11	1	236	883.8	1116.2	55.81
12	0.8	273.2	1157	843	42.15
13	0.63	240.4	1397.4	602.6	30.13
14	0.5	219.2	1616.6	383.4	19.17
15	0.4	180.8	1797.4	202.6	10.13
16	0.315	120	1917.4	82.6	4.13
17	0.25	55.2	1972.6	27.4	1.37
18	0.2	16.4	1989	11	0.55
19	0.16	5.2	1994.2	5.8	0.29
20	0.125	1.2	1995.4	4.6	0.23
21	0.1	0.8	1996.2	3.8	0.19
22	0.08	0.6	1996.8	3.2	0.16
23	0	3.2	2000	0	0

2. Courbe granulométrique

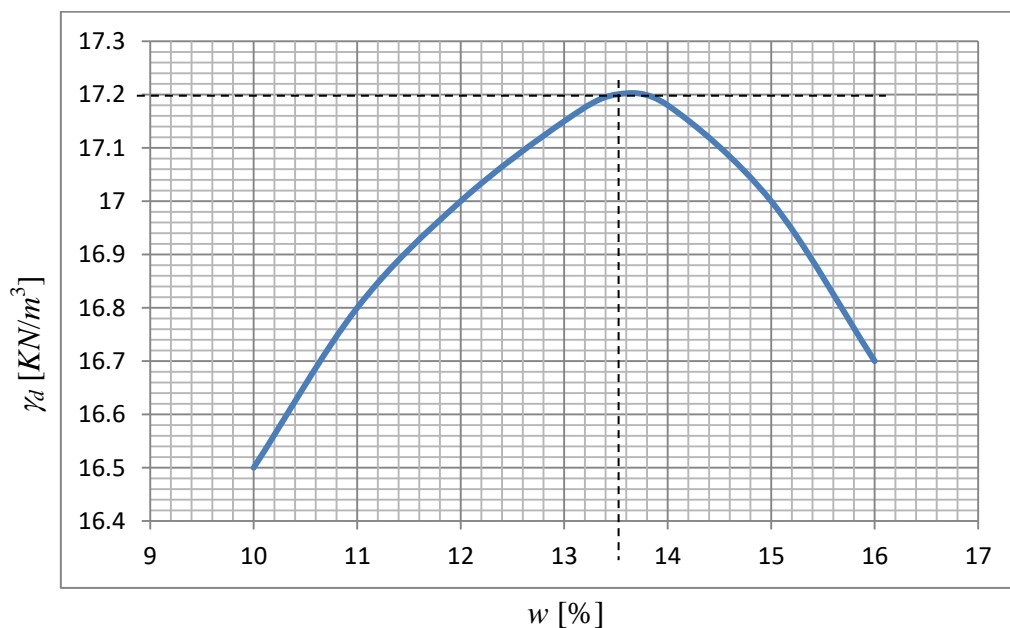


3. $C_u = 0.9$ et $C_c = 2.75$

4. Sable grossier (contenant du gravier) avec une granulométrie serrée et une courbure bien graduée

Exercice 02:

1. La courbe de compactage :



2. Les valeurs optimales sont : $\gamma_d^{\max} = 17.2 \text{ KN} / \text{m}^3$ et $\omega_{opt} = 13.5\%$

3. Pour calculer le volume nécessaire on calcule par unité de 1m^3

$$\text{Dans } 1\text{m}^3 \text{ nous avons : } \gamma_d = \frac{P_s}{1\text{m}^3} = 17.2 \text{ KN} / \text{m}^3 \Rightarrow P_s = 17.2 \text{ KN}$$

Afin d'avoir cette quantité nous devons avoir du terrain décapé un volume de :

$$\begin{aligned} P_{s1} = 16.3 \text{ KN} &\rightarrow 1\text{m}^3 \\ P_{s2} = 17.2 \text{ KN} &\rightarrow v_i \end{aligned} \quad \text{donc } v_i = \frac{17.2}{16.3} = 1.055 \text{ m}^3$$

Donc pour chaque 1m^3 de sol compacté nous avons besoin de 1.055m^3 du sol du terrain décapé et le volume nécessaire du gisement pour l'exécution est :

$$V_t = 195000 \times 1.055 = 205725 \text{ m}^3$$

4. Le volume d'eau nécessaire :

$$\Delta w = 13.5 - 10 = 3.5\%$$

$$w = \frac{P_w}{P_s} \Rightarrow P_w = w \cdot P_s$$

$$\text{Donc pour } 1\text{m}^3 : \Delta P_w = \Delta w \cdot P_s \Rightarrow \Delta P_w = 0.035 \times 16.3 = 0.5705 \text{ m}^3$$

$$\text{Le volume total est donné par : } V_w = 0.5705 \times 205725 = 117366.1125 \text{ m}^3$$

Sujet N° 18

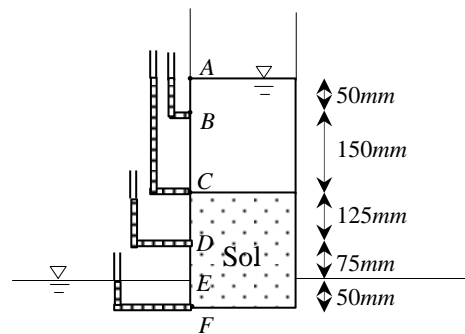
Question de cours :

À la saturation, vérifier la relation suivante

$$e = w \cdot d_s$$

Exercice 01:

Dans un essai de perméabilité un sol est placé dans un tube et mis sous une pression d'eau comme montre la figure suivante



Déterminer aux points A, B, C, D et F la charge de pression, la charge de position, la charge totale et la perte de charge.

Exercice 02:

Un échantillon de sol saturé a pour poids volumique la saturation de 20 KN/m^3 et à l'état humide de 18 KN/m^3 . Calculer son degré de saturation si on vous informe que la densité spécifique des grains solides est de 2.66

Solution du sujet N° 18**Question de cours :**

$$e = \frac{v_v}{v_s}$$

À la saturation $v_v = v_w$ donc

$$e = \frac{v_w}{v_s} = \frac{1/v_s}{1/v_w} \times \frac{P_w}{P_w} \times \frac{P_s}{P_s} = \frac{v_s/P_s}{v_w/P_w} \times \frac{P_w}{P_s} = \frac{P_w}{P_s} \times \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

$$e = w \cdot d_s$$

Exercice 01:

La charge de pression (en *mm*) est la charge du soulèvement de l'eau dans le piézomètre donc

Points	A	B	C	D	F
Distance de charge	A-A	A-B	A-C	C-D	E-F
Valeur de la charge	0	50	200	125	50

La charge de position (en *mm*) est la charge du soulèvement par rapport à l'eau donc le point E

Points	A	B	C	D	F
Distance de charge	A-E	B-E	C-E	D-E	E-F
Valeur de la charge	400	350	200	75	-50

La charge totale (en *mm*) est la somme des deux charges de pression et de position

Points	A	B	C	D	F
Valeur de la charge	400	400	400	200	0

La perte de est charge (en mm) est la soustraction de la charge de pression et de la charge appliquée (différence des deux niveaux d'eau $A-E$)

Points	A	B	C	D	F
Valeur de la charge	0	0	0	200	400

Exercice 02:

$$\begin{cases} P_s + P_w = 20 \\ v_s + v_w = 1 \end{cases}$$

$$P_s = d_s \cdot v_s \cdot \gamma_w = 2.66 \times 10 \times v_s = 26.6v_s$$

$$P_w = v_w \cdot \gamma_w = 10 \times v_w = 10v_w$$

$$\begin{cases} 26.6v_s + 10v_w = 20 \\ v_s + v_w = 1 \end{cases}$$

Dés deux équations on a

$$26.6v_s + 10(1 - v_s) = 20$$

$$26.6v_s - 10v_s = 20 - 10$$

$$16.6v_s = 10$$

$$v_s = 0.602 \text{ m}^3$$

$$v_w = 0.398 \text{ m}^3$$

Le volume d'aire est le volume de l'eau perdu entre les deux états

$$\Delta P_w = 20 - 18 = 2 \text{ KN}$$

$$\Delta v_w = v_a = \frac{2}{10} = 0.200 \text{ m}^3$$

$$Sr = \frac{v_w}{v_v} = \frac{0.398 - 0.2}{0.398} \times 100 = 49.47\%$$

Sujet N° 19

Question de cours :

Vérifier la relation suivante

$$w = \frac{\eta \cdot Sr}{(1 - \eta) \cdot d_s}$$

Exercice 01:

Une couche de sol parfaitement homogène et complètement saturée d'eau et d'une profondeur de 10m. Déterminer par rapport à la surface horizontale du sol qui est le niveau de la nappe phréatique la distribution de la pression interstitielle, la contrainte totale et la contrainte effective au bas de la couche. On vous donne

$$\gamma_{sat} = 20 \text{ KN} / \text{m}^3$$

Exercice 02:

Un récipient est partiellement rempli d'eau, l'échelle indique que le volume d'eau est de 312cm^3 . Le poids de l'eau et du récipient est de 568g. Du sable est soigneusement versé dans l'eau et le niveau d'eau dans le récipient monte à un niveau de 400cm^3 de matière (sable et eau). Le poids du récipient est maintenant de 800g. Déterminer la masse volumique du matériau particulaire, en kg/m^3 .

Solution du sujet N° 19**Question de cours :**

$$w = \frac{P_w}{P_s} = \frac{\frac{P_w}{v_w} \times v_w}{\frac{P_s}{v_s} \times v_s} = \frac{\frac{P_w}{v_w} \times v_w}{\frac{P_s}{v_s} \times v_s} \times \frac{1}{v_t} = \frac{\gamma_w \times \frac{v_w}{v_t}}{\gamma_s \times \frac{v_s}{v_t}}$$

$$w = \frac{\frac{v_w}{v_t}}{\frac{v_s}{v_t} \times \frac{\gamma_s}{\gamma_w}} = \frac{\frac{v_w}{v_t} \times \frac{v_v}{v_v}}{\left(\frac{v_t - v_v}{v_t}\right) \times \frac{\gamma_s}{\gamma_w}} = \frac{\frac{v_w}{v_t} \times \frac{v_v}{v_t}}{\left(1 - \frac{v_v}{v_t}\right) \times d_s}$$

$$w = \frac{\eta \cdot Sr}{(1 - \eta) \cdot d_s}$$

Exercice 01:

Pression interstitielle $u = \gamma_w \cdot h$

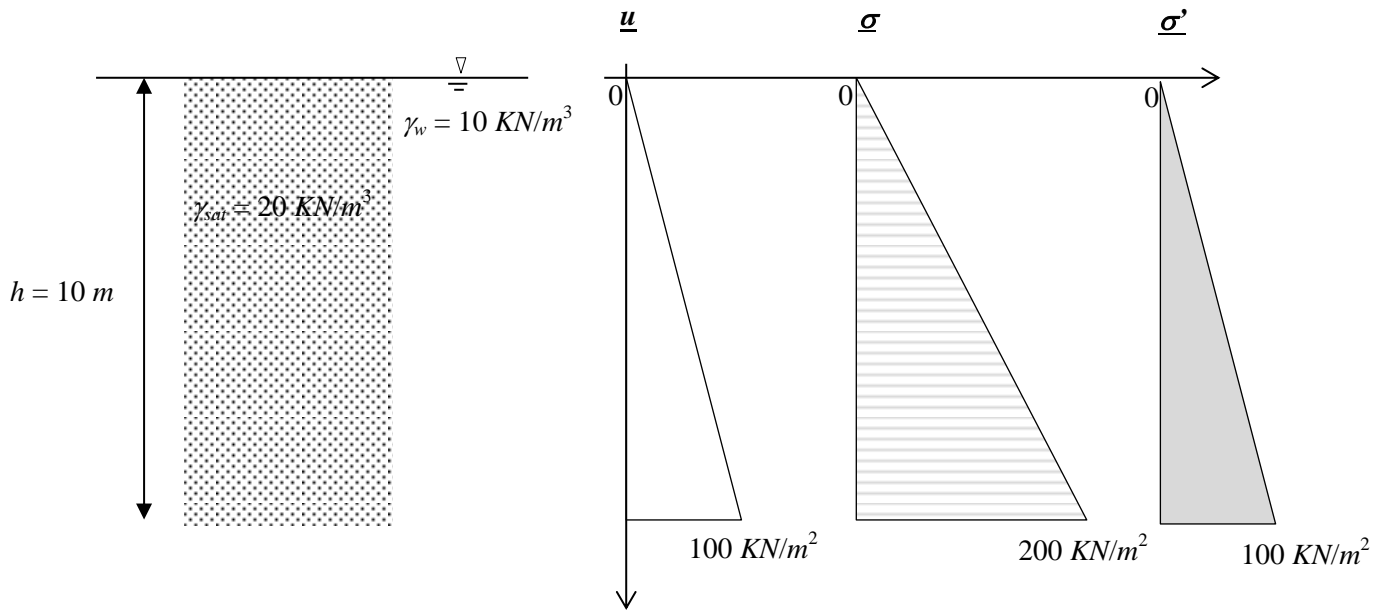
$$u = \begin{cases} 0 \times 10 = 0 \text{ KN} / \text{m}^2 \\ 10 \times 10 = 100 \text{ KN} / \text{m}^2 \end{cases}$$

Contrainte totale $\sigma = \gamma_{sat} \cdot h$

$$\sigma = \begin{cases} 0 \times 20 = 0 \text{ KN} / \text{m}^2 \\ 10 \times 20 = 200 \text{ KN} / \text{m}^2 \end{cases}$$

Contrainte effective $\sigma' = \gamma' \cdot h$

$$\sigma' = \begin{cases} 0 \times (20 - 10) = 0 \text{ KN} / \text{m}^2 \\ 10 \times (20 - 10) = 100 \text{ KN} / \text{m}^2 \end{cases}$$



Exercice 02:

$$v_w^{\text{int}} = 312 \text{ cm}^3 \Rightarrow m_w^{\text{int}} = v_w^{\text{int}} \cdot \rho_w = 312 \times 1 = 312 \text{ g}$$

$$m_t^{\text{int}} = m_{\text{rec}} + m_w^{\text{int}} = 568 \text{ g} \Rightarrow m_{\text{rec}} = m_t^{\text{int}} - m_w^{\text{int}} = 568 - 312 = 256 \text{ g}$$

$$v_t^{\text{fin}} = 400 \text{ cm}^3 \Rightarrow v_t^{\text{fin}} = v_w^{\text{int}} + v_s \Rightarrow v_s = v_t^{\text{fin}} - v_w^{\text{int}} = 400 - 312 = 88 \text{ cm}^3$$

$$m_t^{\text{fin}} = 800 \text{ g} \Rightarrow m_t^{\text{fin}} = m_t^{\text{int}} + m_s \Rightarrow m_s = m_t^{\text{fin}} - m_t^{\text{int}} = 800 - 568 = 232 \text{ g}$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_s} = \frac{232}{88} = 2.636 \text{ g / cm}^3$$

$$\rho_s (\text{Kg / m}^3) = 2.636 \times \frac{10^{-3}}{10^{-6}} = 2636 \text{ Kg / m}^3$$

Sujet N° 20

Question de cours :

Vérifier la relation suivante

$$\eta = 1 - \frac{\gamma_h}{(1+w) \cdot \gamma_s}$$

Exercice 01:

Le sol dans une petite rivière est constitué d'une couche d'argile de 5 mètres d'épaisseur, avec une porosité de 50%, la couche d'argile se place au-dessus d'une couche profonde de sable rigide. Le niveau de l'eau dans l'argile est abaissé de 1,5 mètre. L'expérience montre qu'alors la porosité de l'argile est réduite à 40 %. Quel est l'affaissement du sol ?

Exercice 02:

Dans un essai de perméabilité, une différence de charge de 20cm est maintenue entre les extrémités supérieure et inférieure d'un échantillon de 40cm de hauteur.

Le diamètre intérieur du tube circulaire est de 10cm. Il a été mesuré qu'en une minute une quantité d'eau de 35cm³ est recueillie dans un verre doseur. Quelle est la valeur du coefficient de perméabilité?

Solution du sujet N° 20**Question de cours :**

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = \frac{v_t - v_s}{v_t} = 1 - \frac{v_s}{v_t} = 1 - \frac{\frac{1}{\gamma_s}}{\frac{1}{\gamma_t}} = 1 - \frac{1}{\gamma_s} \times \frac{P_t}{P_t} = 1 - \frac{v_t}{\frac{P_t}{\gamma_s}} = 1 - \frac{\gamma_h}{\frac{P_t}{\gamma_s} \times \frac{P_s}{P_s}}$$

$$\eta = 1 - \frac{\gamma_h}{\frac{P_t}{P_s} \times \frac{P_s}{\gamma_s}} = 1 - \frac{\gamma_h}{\left(\frac{P_s + P_w}{P_s}\right) \times \gamma_s} = 1 - \frac{\gamma_h}{\left(1 + \frac{P_w}{P_s}\right) \times \gamma_s}$$

$$\eta = 1 - \frac{\gamma_h}{(1 + w) \cdot \gamma_s}$$

Exercice 01:

On calcul par un carré de 1 mètre

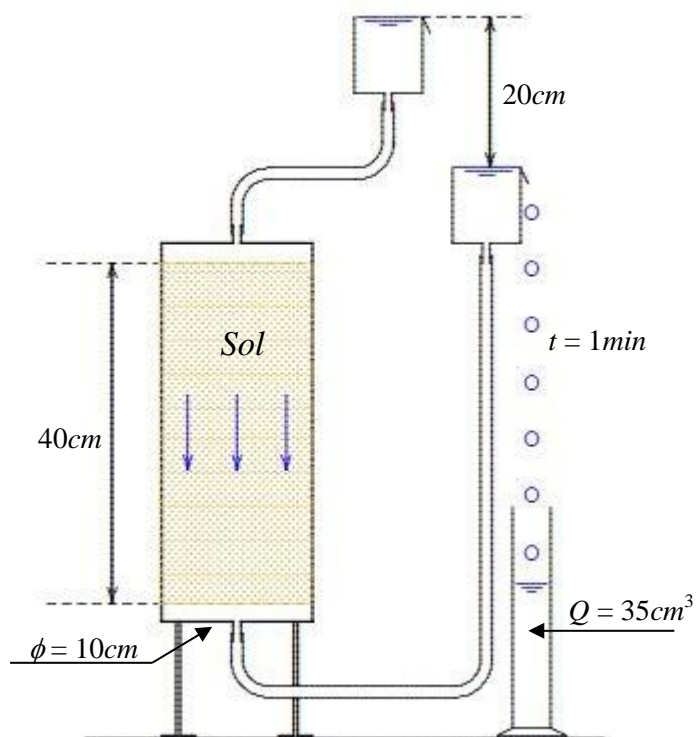
Dans ce cas on s'intéresse que de la hauteur dans laquelle l'eau a abaissée (1.5m)

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = 0.5 \text{ donc pour } 1.5m \text{ de profondeur } v_v = 1.5 \times 0.5 = 0.75 m^3$$

$$\eta = \frac{v_v}{v_t} = 0.4 \text{ donc pour } 1.5m \text{ de profondeur } v_v = 1.5 \times 0.4 = 0.6 m^3$$

$$\Delta h = \frac{\Delta v_v}{1 m^2} = \frac{0.75 - 0.6}{1} = 0.15 m$$

Exercice 02:



$$A = \pi \frac{\phi^2}{4} = 3.14 \times \frac{10^2}{4}$$

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot \Delta h \cdot t} = \frac{35 \times 40 \times 4}{3.14 \times 10^2 \times 20 \times 60} = 0.0149 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Sujet N° 21**Question de cours :**

À la saturation, vérifier la relation suivante

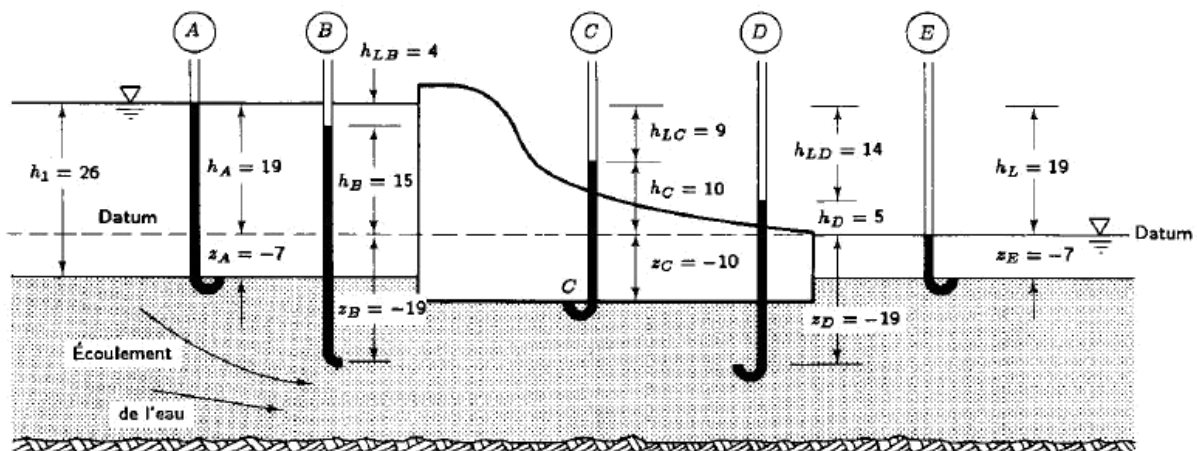
$$\gamma_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{\gamma_s} + \frac{w}{\gamma_w}\right)}$$

Exercice 01:

Un échantillon de sol avec des grains solides de densité égale à 2,7. Sa porosité dans l'état le plus lâche est de 42% et dans l'état le plus dense elle redevient 31%. Quel est la valeur de sa densité relative si sa porosité à l'état naturel est de 37%.

Exercice 02:

Soit un barrage d'eau équipé des piézomètres comme indiqué la figure suivante. Déterminer aux points A, B, C, D et E la charge de pression, la charge de position, la charge totale et la perte de charge. Déterminer la pression de soulèvement agissant sur le point C.



Solution du sujet N° 21**Question de cours :**

$$\gamma_d = \frac{P_s}{v_t} \times \frac{P_w/v_s \cdot v_w}{P_w/v_s \cdot v_w} = \frac{P_s \cdot P_w}{v_s \cdot v_w} = \frac{\gamma_s \times \gamma_w}{P_w \frac{v_t}{v_s \cdot v_w}} = \frac{\gamma_s \times \gamma_w}{P_w \frac{v_s + v_v}{v_s \cdot v_w}}$$

À la saturation $v_v = v_w$ donc

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s \times \gamma_w}{P_w \frac{v_s + v_w}{v_s \cdot v_w}} = \frac{\gamma_s \times \gamma_w}{\frac{P_w}{v_w} \times \frac{v_s + v_w}{v_s}} = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{v_w}{v_s}} = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{P_w/\gamma_w}{P_s/\gamma_s}}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{P_w/\gamma_w}{P_s/\gamma_s}} = \frac{1}{\frac{1}{\gamma_s} \left(1 + \frac{\gamma_s}{\gamma_w} w \right)}$$

$$\gamma_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{\gamma_s} + \frac{w}{\gamma_w} \right)}$$

Exercice 01:

$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{v_v}{v_t - v_v} = \frac{v_v}{v_t - v_v} \times \frac{v_t}{v_t} = \frac{v_v}{v_t - v_v} \times \frac{v_t}{v_t} = \frac{v_t}{v_t - v_v} = \frac{\eta}{1 - \eta}$$

A l'état le plus lâche

$$e_{\max} = \frac{0.42}{1 - 0.42} = 0.72$$

A l'état le plus dense

$$e_{\min} = \frac{0.31}{1 - 0.31} = 0.45$$

A l'état naturel

$$e = \frac{0.37}{1-0.37} = 0.59$$

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{0.72 - 0.59}{0.72 - 0.45} = 0.48$$

A l'état naturel le sol est presque à la moitié de sa compacité (48%)

Exercice 02:

La charge de pression (en m) est la charge du soulèvement de l'eau dans le piézomètre donc

Points	A	B	C	D	E
Valeur de la charge	26	34	20	24	7

La charge de position (en m) est la charge du soulèvement par rapport à l'eau donc le point E

Points	A	B	C	D	E
Valeur de la charge	-7	-19	-10	-19	-7

La charge totale (en m) est la somme des deux charges de pression et de position

Points	A	B	C	D	E
Valeur de la charge	19	15	10	5	0

La perte de est charge (en m) est la soustraction de la charge de pression et de la charge appliquée ($\Delta h = 26 - 7 = 19m$)

Points	A	B	C	D	E
Valeur de la charge	0	4	9	14	19

La pression de soulèvement agissant sur le point C est

$$P = h_s \cdot \gamma_w = 20 \times 10 = 200 \text{ KN} / m^2$$

Références bibliographiques

- [1]. COSTET J. et SANGLERAT G, "Cours pratique de mécanique des sols", Tome 1, Dunod, 1981.
- [2]. SANGLERAT G., CAMBOU B., OLIVARI G. "Problèmes pratiques de Mécanique des sols, Tome 1, Dunod, 1983.
- [3]. AMAR S. et MAGNAN J.P. "Essais de mécanique des sols en laboratoire et en place,", publié par LCPC, 1980.
- [4]. SCHLOSSER F. "Éléments de mécanique des sols, 2e Ed., Presses de l'E.N.P.C.", 1997.
- [5]. BERGA A. "Éléments de mécanique des sols, U.T.M.B.", 2004.