

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur**  
**et de la Recherche Scientifique**

Université Ahmed Draïa - Adrar  
Faculté des Sciences et de Technologies  
Département Génie Civil



# **Mécanique des sols I**

## **Support de Cours et Travaux Dirigés**

**2<sup>ème</sup> année Génie Civil**

**Dr. AKACEM Mustapha**

**2022/2023**

## **AVANT-PROPOS**

Le travail actuel présente les éléments fondamentaux de mécanique des sols aux étudiants débutants de la 2<sup>ème</sup> année du socle commun spécialité Génie Civil. Il constitue une synthèse des bases de la mécanique des sols permettant aux étudiants de saisir l'essentielle de la matière dans les limites du programme.

Le contenu représente un aide-mémoire couvrant les quatre chapitres du programme officiel à savoir :

- 1- Introduction à la mécanique des sols
- 2- Identification et classification des sols
- 3- Compactage des sols
- 4- L'eau dans le sol

Chaque chapitre expose le cours, accompagnés par des exercices résolus à la fin du chapitre.

L'objectif de ce cours avec quelques applications, c'est d'aider l'étudiant de comprendre la mécanique des sols, et s'habituer à s'en servir et reconnaître ses points délicats.

Le document est organisé en chapitres. Chaque chapitre expose le cours, accompagnés par des exercices résolus à la fin du chapitre, mais il faut bien noter que la disponibilité de ce document ne doit en aucun cas décourager l'étudiant à assister au cours orale : l'écrit ne peut jamais remplacer l'apprentissage de main de maître.

Je souhaite que ce modeste travail présente un plus pour nos chers étudiants dans leur formation, pour cela je les invites à approfondir les notions diverses et leur connaissances à travers la consultation des références bibliographique citées à la fin de l'ouvrage, je tiens ici à remercier vivement leurs auteurs, notamment Mr Mekerta Belkacem, Mr Guettouche Amar, Mr Khaled Meftah et Mr Khelifa Harichane.

**AKACEM Mustapha**

# Sommaire

<b>AVANT PROPOS</b>	
<b>Chapitre 1. Introduction à la mécanique des sols</b>	
1.1 Objet de la mécanique des sols .....	1
1.2 - Domaines d'application .....	1
1.2.1 Milieux naturels .....	1
1.2.2 - Ouvrages en sol .....	1
1.2.3 - Ouvrages mixtes .....	2
1.2.4 - Fondations d'ouvrages ou de bâtiments .....	2
1.3 Disciplines de la mécanique des sols .....	3
1.4 Histoire de la mécanique des sols .....	3
1.5 Définitions des sols .....	3
1.5.1 Eléments constitutifs d'un sol .....	4
1.5.2 Origines et formation des sols .....	5
1.5.3 Structure des sols (sols grenus et sols fins) .....	6
1.5.4 Dimension des particules .....	6
1.5.5 Forme des particules .....	7
1.5.6 Types des sols .....	7
<b>Chapitre 2. Identification et classification des sols</b>	
2.1 Caractéristiques physiques .....	11
2. 1. 1 Modèle élémentaire d'un sol .....	11
2.1.2 Relations entre les paramètres .....	13
2.2 Caractéristiques granulométriques .....	14
2.2.1 La granulométrie (répartition granulométrique des particules)...	14
2.2.2 L'interprétation des courbes granulométriques .....	15
2.3 Consistance des sols fins (limites d'Atterberg) .....	17
2.3.1 Définition .....	17
2.3.2 Les états de consistance .....	17
2.3.3 Les limites d'Atterberg .....	18
2.3.4 Les indices de plasticité et de liquidité .....	18
2.3.5 L'activité des argiles .....	19
2.3.6 Le diagramme de plasticité .....	19
2.4 Classification géotechnique des sols .....	20

2.4.1 Principe des classifications des sols .....	20
2.4.2 Classification triangulaire .....	20
2.4.3 Classification (LPC/USCS) des sols .....	21
2.4.4 Classification LPC modifiée .....	22
2.4.5 Classification GTR .....	24
2.5 EXERCICES .....	25
2.6 EXERCICES SUPPLEMENTAIRES .....	29
2.6.1 Poids volumiques humides .....	29
2.6.2 Poids volumique sec .....	38
2.6.3 Poids volumique des grains solides .....	42
2.6.4 Poids volumique saturé .....	46
2.6.5 Teneur en eau .....	54
2.6.6 Porosité .....	58
2.6.7 Indice des vides .....	61
2.6.8 Degré de saturation .....	65
2.6.9 Teneur en eau à saturation .....	67
<b>Chapitre 3. Compactage des sols</b>	
3.1 Théorie de compactage .....	72
3.1.1 Introduction .....	72
3.1.2 Objectifs du compactage .....	72
3.1.3 Théorie de Proctor .....	73
3.2 Essais de compactage en laboratoire (essais Proctor et CBR) .....	75
3.2.1 Optimum Proctor .....	75
3.2.2 Principe de la méthode .....	76
3.2.3 Matériel nécessaire .....	77
3.2.4 Mode opératoire .....	77
3.2.5 Expression des résultats .....	80
3.2.6 Exemple de calcul pour essai Proctor Modifié (moule CBR) .....	80
3.3 Matériel et procédés de compactage in-situ .....	82
3.3.1 Matériels de compactage et procédés courants de compactage .....	82
3.3.2 Procédés spéciaux de compactage in situ .....	84
3.4 Prescriptions et contrôle du compactage .....	85
3.4.1. Influence de la vitesse de l'engin .....	85
3.4.2. Influence du nombre de passes .....	85
3.4.3. Efficacité d'un compactage .....	85
3.4.4. Densitomètre à membrane .....	86
3.5 EXERCICES .....	87

3.6 EXERCICES SUPPLEMENTAIRES .....	99
<b>Chapitre 4 : L'eau dans le sol</b>	
Introduction .....	100
4.1 Types d'eau dans le sol .....	100
4.2 Loi de Darcy .....	101
4.2.1 La charge hydraulique .....	102
4.3 Coefficient de perméabilité (K) .....	103
4.3.1 Mesure au laboratoire du coefficient de perméabilité .....	103
4.3.1.1 Perméamètre à charge constante .....	104
4.3.1.2 Perméamètre à charge variable .....	104
4.3.2 Perméabilité moyenne équivalente des terrains stratifiés .....	106
4.3.2.1 <i>Cas d'un écoulement horizontal</i> .....	106
4.3.2.2 <i>Cas d'un écoulement vertical</i> .....	107
4.4 Exercices .....	108
<b>Références bibliographiques</b>	

## **Chapitre 1. Introduction à la mécanique des sols**

I.1 Objet de la mécanique des sols (historique et domaine d'application)

I.2 Définitions des sols

I.3 Origine et formation des sols

I.4 Structure des sols

### **1.1 Objet de la mécanique des sols**

La mécanique des sols est l'application des lois mécaniques et hydrauliques au matériau sol. Comparé aux nombreux autres matériaux étudiés en mécanique, les bétons, les aciers, les plastiques, le bois..., le sol présente deux originalités. D'abord, c'est un milieu discontinu qu'il faudra donc étudié à la fois dans sa globalité et dans sa composition élémentaire. D'autre part, c'est un matériau tri phasique formé de grains solides, d'eau et d'air. Nous allons voir que les phases non solides jouent un rôle fondamental.

### **1.2 - Domaines d'application**

Les domaines d'application de la mécanique des sols sont nombreux et variés. Ils concernent la profession des travaux publics, ainsi que celle du bâtiment.

#### **1.2.1 Milieux naturels**

Le domaine d'application de la mécanique des sols ne se limite pas aux constructions ; il comprend également des milieux naturels tels que les versants (problèmes de glissement de terrain) et les berges de cours d'eau ou de retenues.

#### **1.2.2 - Ouvrages en sol**

Les ouvrages où le sol est le matériau de base sont aussi bien : - des remblais (routes, voies ferrées, barrages, digues de bassins en terre, plates-formes maritimes...) ; - ou des déblais (talus, canaux, bassins...).

## 1.2.3 - Ouvrages mixtes

Dans les ouvrages mixtes, le sol intervient en relation avec un autre matériau, le béton ou l'acier par exemple. Les conditions d'ancrage dans le sol sont souvent primordiales pour des ouvrages tels que :

- les murs de soutènements (béton, terre armée, sol renforcé par géotextile...) ;
- les palplanches utilisées dans les canaux, les ports, les constructions urbaines... ;
- les parois moulées (à fonction étanchéité ou à fonction soutènement).

## 1.2.4 - Fondations d'ouvrages ou de bâtiments

Dans l'étude des fondations, le sol et l'ouvrage ne constituent pas un ensemble mixte, mais deux ensembles dont il s'agit de connaître les interactions.

Les mécaniciens des sols distinguent :

- les fondations superficielles (semelles ou radiers) ;
- les fondations profondes (pieux, puits, barrettes).

Tous les ouvrages tels que châteaux d'eau, stations d'épuration, silos, barrages en terre ou en béton, murs de soutènement, doivent faire impérativement l'objet d'une étude de fondation qui permettra de déterminer la profondeur de la fondation et les dimensions de la base de l'ouvrage. Ceci est trop souvent négligé et de nombreux désordres graves en ont résulté.

Les ouvrages utilisent le sol autant qu'un élément de l'infrastructure qui transmet la charge globale de l'ouvrage vers une couche du sol suffisamment stable et résistante. De ce fait, la réussite de l'ouvrage relève de la réussite du projet de fondation. Selon le type de l'ouvrage et son mode de conception, le sol peut constituer une base d'appuis pour l'ensemble de l'ouvrage tel que route, tunnel, barrage poids, mur de soutènement, aéroport, ou un point d'appuis pour quelques éléments seulement tel que bâtiment, pont, barrage en arc .etc. La mécanique des sols (et des roches) est la science qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques qui permettent d'effectuer les tâches suivantes :

- Identifier les caractéristiques qui régissent le comportement mécanique du sol.
- Analyser de l'interaction sol-structure

- Réaliser d'une façon correcte des ouvrages enterrés.

## 1.3 Disciplines de la mécanique des sols

Afin de réaliser les objectifs cités ci-dessus, plusieurs disciplines seront nécessaires tel que :

Géologie du terrain - Caractéristiques physico-chimiques - Caractéristiques mécaniques - Recherche théorique et modélisation numérique - Conception et mise en œuvre.

## 1.4 Histoire de la mécanique des sols

La mécanique des sols est une science jeune, les premiers fondements peuvent être attribués à COULOMB (1773), mais TERZAGHI (1883-1963) a véritablement initié la mécanique des sols moderne.

On peut suivre l'évolution de la mécanique des sols à travers son apparition autant qu'une science à part entière et le développement de ses grandes théories (voir le tableau 1.1).

*Tab.1.1 : La mécanique des sols à travers ses grandes théories.*

Siècle	Auteur	Théorie
18 <sup>ème</sup>	Coulomb	Résistance au cisaillement
19 <sup>ème</sup>	Collin	Rupture dans les talus d'argile
	Darcy	Ecoulement de l'eau dans le sable
	Rankine	Pression des terres sur les murs de soutènement
	Gregory	Drainage horizontal. Remblai compact avec contrefort pour stabiliser la pente des tranchées de voies ferrées
20 <sup>ème</sup>	Atterberg	Limites de consistance de l'argile
	Terzaghi	Premier manuel moderne de mécanique des sols
	Casagrande	Essai sur la limite de liquidité

## 1.5 Définitions des sols

Qu'appelle-t-on sol ? - Les sols peuvent être définis comme des agrégats dans lesquels les particules sont faiblement liées et peuvent être séparées par une action mécanique légère - Un sol en place est constitué de grains solides baignant dans l'eau, dans l'air ou dans un mélange (eau + air), le sol est un matériau à 3 phases : solide, liquide (eau) et gaz (air).

Dans les études géotechniques les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux grandes catégories:

- **les roches:** agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, même après immersion prolongée dans l'eau  $\Rightarrow$  Mécanique des roches.
- **les sols:** Un sol est un assemblage hétérogène de particules ou de cristaux aux propriétés très variables : dimensions, formes, propriétés physicochimiques, etc..., pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles  $\Rightarrow$  Mécanique des sols.

Donc, on peut dire que le sol est défini par opposition au mot roche, dans sa définition géotechnique. C'est un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère. Le sol est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. On conçoit donc que la limite entre un sol et une roche altérée ne soit pas définie nettement. Le sol est un matériau meuble, ce caractère étant fondamental. Il ne suffit cependant pas à définir un sol naturel car certains matériaux produits par l'homme présentent aussi ce caractère. Par exemple les sous-produits miniers et les granulats concassés (sable, gravier, ballast...) sont aussi des matériaux meubles. Le mécanicien des sols étudie donc aussi bien des sols naturels que des matériaux fabriqués artificiellement à partir de sols ou de roches et présentant un caractère meuble.

## 1.5.1 Eléments constitutifs d'un sol

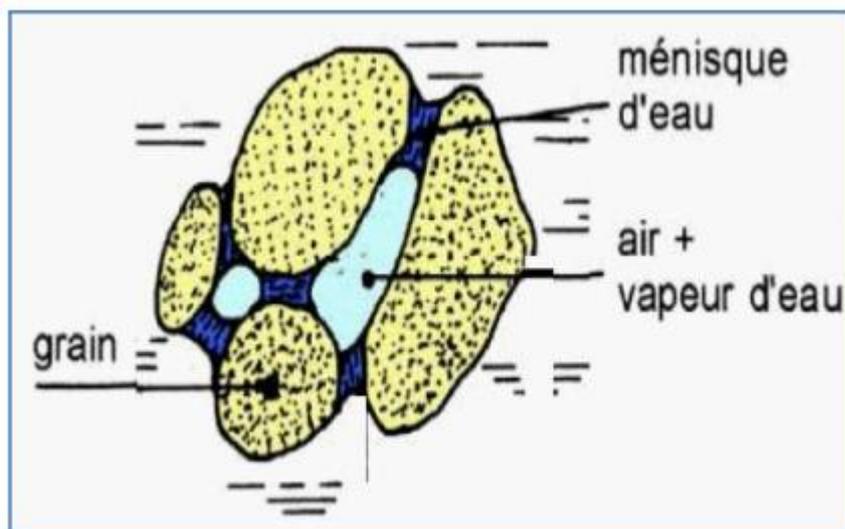
Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases:

**Sol = phase solide + phase liquide + phase gazeuse**

Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par de l'eau, par un gaz ou les deux à la fois.

Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide (cas le plus fréquent). Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé. Dans les régions tempérées, la plupart des sols en

place, à quelques mètres de profondeur sont saturés. Lorsqu'il n'y a pas d'eau, le sol est dit sec.



*Fig. 1.1 : Constituants d'un sol*

## 1.5.2 Origines et formation des sols

D'où proviennent les sols ? Tout simplement des roches, mais ils peuvent contenir aussi des matières organiques.

Les sols ont deux origines principales : - la désagrégation des roches par altération mécanique ou physicochimique sous l'effet des agents naturels - la décomposition d'organismes vivants : végétaux (tourbes) ou animaux (craies). Suivant les types d'altération, les sols résultant auront des compositions différentes.

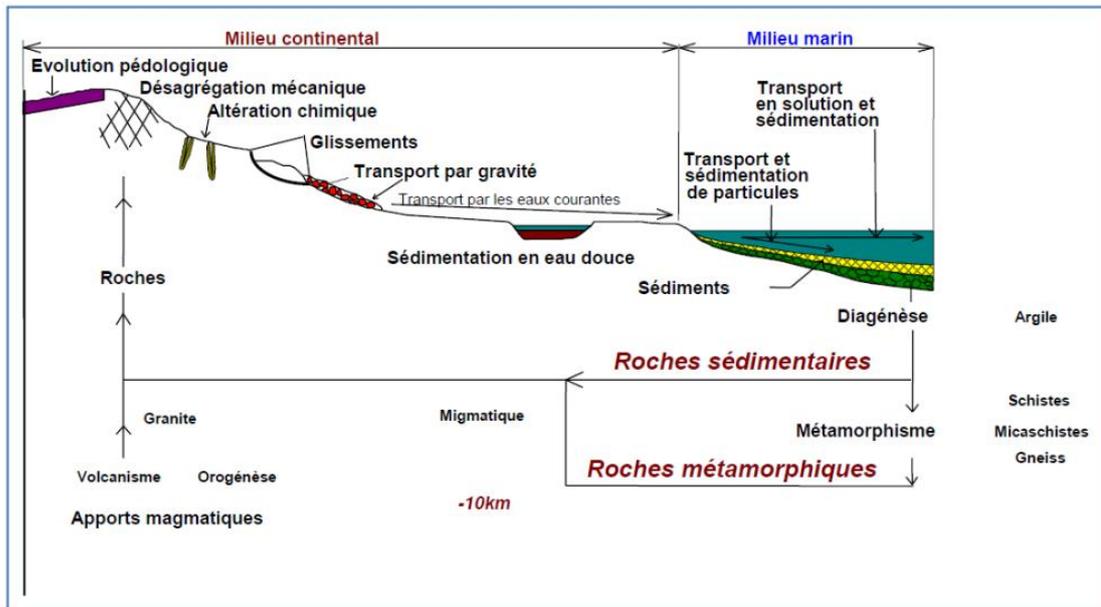
La désagrégation physique et mécanique des roches consolidées donne des fragments de roche de même composition que la roche mère : gravier, sable, limon.

La décomposition physico-chimique de la roche en place ou des fragments de roche donne des nouveaux composés : argiles.

On distingue également :

- les **sols résiduels** résultant de l'altération sur place des roches ;
- les **sols transportés** provenant du dépôt des produits d'altération préalablement repris par un agent physique de transport. Ce sont les sols transportés qui posent au

concepteur d'ouvrages les problèmes les plus délicats. Enfin, suivant leurs conditions de formation et de dépôt, les sols peuvent contenir des matières organiques en proportion plus ou moins élevée.



*Fig.1.2 : Origines des sols*

### 1.5.3 Structure des sols (sols grenus et sols fins)

Le sol est un matériau constitué de particules. Les dimensions de ces particules peuvent être uniformes ou variées allant des cailloux de 10 cm et s'étendant jusqu'aux particules fines de moins du micron. Les principales caractéristiques physiques des particules de sol sont:

la dimension, la forme et la surface spécifique. Ces caractéristiques influent sur les propriétés hydrauliques et mécaniques du sol.

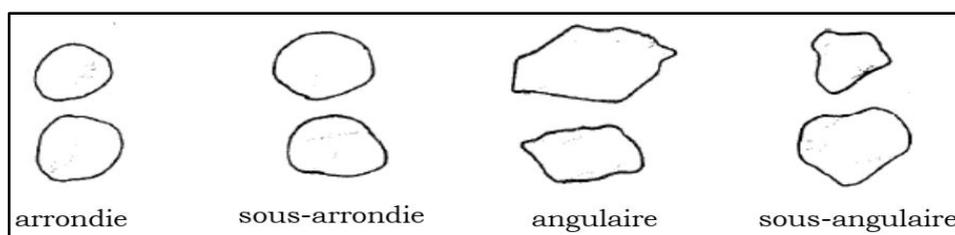
### 1.5.4 Dimension des particules

La dimension des particules est mesurée selon un diamètre appelé diamètre équivalent. Le diamètre équivalent d'une particule est égal à l'ouverture carrée minimale à travers laquelle cette particule peut passer. On s'est servi pour établir le diamètre équivalent, des tamis à mailles carrées utilisée dans l'analyse granulométrique par tamisage.

## 1.5.5 Forme des particules

Bien qu'il existe une variété infinie de formes, on en reconnaît habituellement deux types : la forme volumineuse et la forme en feuillet.

- a- **forme volumineuse** : La forme volumineuse caractérise généralement les particules de gravier, de sable et de silt. Le diamètre équivalent des particules volumineuses est généralement supérieur à 0.001mm. La plupart des particules volumineuses sont grossièrement sphériques et comportent des arêtes plus ou moins arrondies ou plus ou moins angulaires. (Fig.1.3)



*Fig.1.3 : Quelques formes typiques de grains grossiers*

- b- **forme en feuillet** : Lorsque le rapport de sa longueur sur son épaisseur est supérieur à 10, on considère qu'une particule a une forme en feuillet. Cette forme caractérise spécialement les particules d'argile.

## c- surface spécifique

La surface spécifique est le rapport entre sa surface totale et sa masse (en  $m^2/kg$ ). Le tableau 1.2 présente la valeur moyenne de la surface spécifique des particules de différents types de sols.

## 1.5.6 Types des sols

On identifie habituellement les différents types de sols selon la dimension de leurs particules. En mécanique des sols, la division la plus simple consiste à regrouper les sols en deux grandes classes : les sols à gros grains et les sols à grains fins.

**Tab.1.2 :** Surface spécifique des particules de différents types de sols.

Type de sol	Diamètre équivalent (mm)	Epaisseur typique ( $\eta\text{m}$ )*	Surface spécifique moyenne ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )
Sable	1 à 2		1,5
Sable fin	0,25 à 0,5		6
Silt	0,002 à 0,05		82,5
Argile :			
- Kaolinite	0,0003 à 0,002	50 à 100	15000
- Illite	0,0001 à 0,002	30	90000
- Montmorillonite	0,0001 à 0,001	3	800000

\*  $1 \eta\text{m} = 10^{-9} \text{ m}$

### *a- Les sols à gros grains :*

Les cailloux et les blocs, ou enrochements, ont un diamètre équivalent supérieur à 80mm. Ils se caractérisent par une très grande perméabilité. Le gravier et le sable sont constitués de particules de roc dont le diamètre équivalent varie de 0.08mm à 80mm. De façon générale, ils présentent une bonne perméabilité.

### *b- Les sols à grains fins :*

Le silt est composé de fines particules de roc dont le diamètre équivalent varie de 0.002mm à 0.08mm, et dont on peut observer la forme à la loupe ou au microscope optique. L'argile est constituée de particules cristallines qui proviennent de la décomposition chimique des constituants de roc. Ce sont, pour la plupart des silicates d'aluminium, de magnésium ou de fer dont les atomes sont disposés de façon à former des figures géométriques très régulières. Leur diamètre équivalent varie approximativement de  $1\eta\text{m}$  à 0.002mm ; il faut utiliser des techniques plus sophistiquées (comme le MEB) pour observer ces particules.

Chaque minéral argileux est formé par l'empilement de cristaux microscopiques, (**feuillet**s). Ces feuillets sont eux-mêmes constitués d'unités cristallines que l'on appelle **structures fondamentales**. Celles-ci se juxtaposent dans un seul plan, et c'est pourquoi les feuillets ont une surface très grande par rapport à l'épaisseur. On évalue l'épaisseur des feuillets et des structures

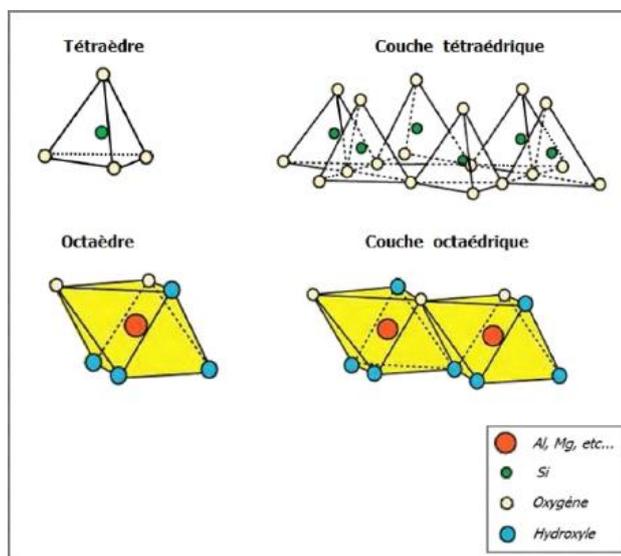
fondamentales à environ  $0,5\text{nm}$  ( $5 \times 10^{-7}\text{mm}$ ).

Il existe deux structures fondamentales :

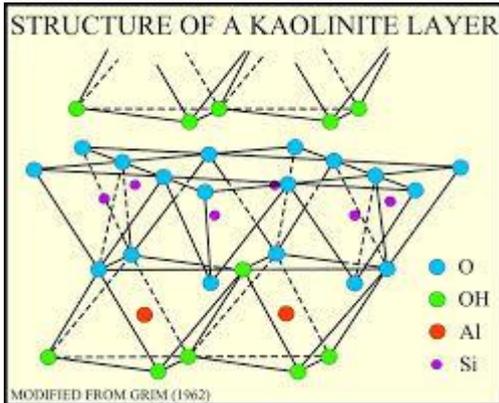
- la structure fondamentale tétraédrique, figure 1.4
- la structure fondamentale octaédrique, figure 1.4

On distingue trois grandes familles de minéraux argileux :

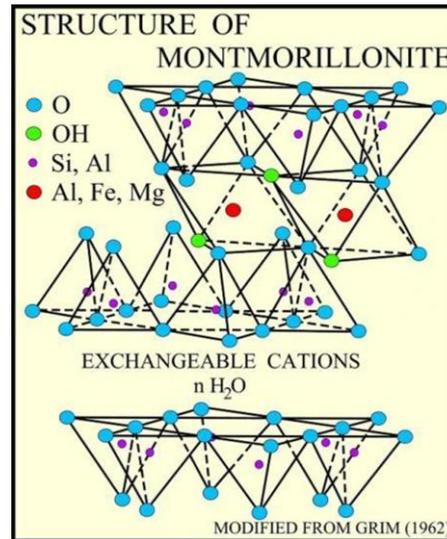
- la kaolinite : cette argile est le moins dangereuse pour l'ingénieur (voir sa représentation schématique sur la figure 1.5) ;
- la montmorillonite : susceptible de gonflement ou de retrait important suivant les variations de teneur en eau (voir sa représentation sur la figure 1.6) ;
- l'illite, (voir sa représentation schématique sur la figure 1.7).



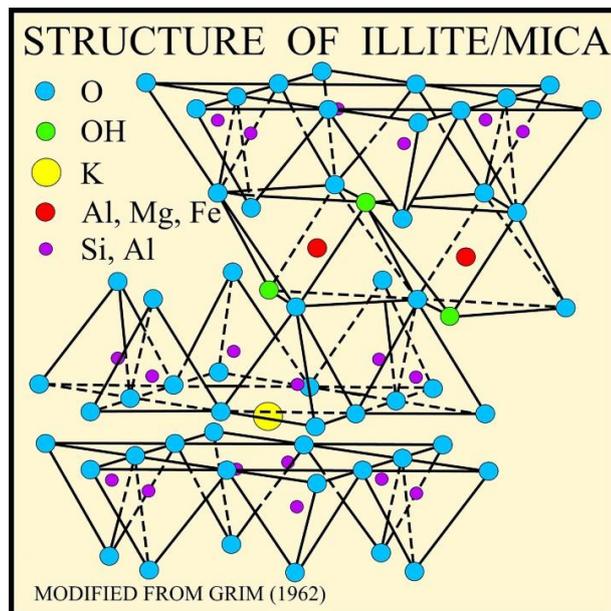
**Fig.1.4. :** Schéma de structure tétraédrique et octaédrique



**Fig.1.5 :** Représentation schématique de la kaolinite



**Fig.1.6 :** Représentation schématique de la montmorillonite



**Fig.1.7 :** Représentation schématique de l'illite

### *c- Les sols organiques:*

Ils contiennent un pourcentage élevé de matières organiques.

MO < 3% : sol inorganique

3% < MO < 10% : sol faiblement organique

10% < MO < 30% : sol moyennement organique.

## Chapitre 2. Identification et classification des sols

- 2.1 Caractéristiques physiques
- 2.2 Caractéristiques granulométriques
- 2.3 Consistance des sols fins (limites d'Atterberg)
- 2.4 Classification géotechnique des sols

### 2.1 Caractéristiques physiques

#### 2.1.1 Modèle élémentaire d'un sol

Un sol étant composé de grains solides, d'eau et d'air, on peut rassembler chaque phase en un volume partiel unique de section unité. Les notations suivantes sont utilisées (Fig.2.1):

Volumes		Poids	
<b>V<sub>a</sub></b>		<b>Air</b>	<b>W<sub>a</sub>=0</b>
<b>V<sub>w</sub></b>		<b>Eau</b>	<b>W<sub>w</sub></b>
<b>V<sub>s</sub></b>		<b>Grains solides</b>	<b>W<sub>s</sub></b>

*Fig.2.1 : Représentation conventionnelle d'un volume de sol (Poids et volumes des différentes phases)*

#### Notations conventionnelles :

**W** : poids total du sol, **W<sub>s</sub>** : poids des particules solides, **W<sub>w</sub>**: poids de l'eau  
**V** : volume total (apparent), **V<sub>s</sub>** : volume des particules solides  
**V<sub>v</sub>** : volume des vides entre les particules, **V<sub>w</sub>** : volume de l'eau, **V<sub>a</sub>** : volume de l'air

#### avec les relations:

$$W = W_s + W_w ; V_v = V_w + V_a ; V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$$

On définit en outre les poids volumiques qui, avec les poids et volumes, constituent :

### a- Les paramètres dimensionnels (poids volumiques) :

- **Poids volumique des particules solides** (de la matière constituant les grains solides), noté  $\gamma_s$  :  $\gamma_s = W_s / V_s$  ; sable et argile = 26 à 27 kN/m<sup>3</sup>
- **Poids volumique de l'eau**, noté  $\gamma_w$  :  $\gamma_w = W_w / V_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$ . On prend souvent  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ . Ce qui entraîne d'emblée 2% d'erreur relative.
- **Poids volumique du sol** (ou poids volumique apparent ou poids volumique humide), noté  $\gamma$ . C'est la somme des poids des particules solides et de l'eau d'un volume unité de sol.  $\gamma = W/V$  ; sable = 17 à 20kN/m<sup>3</sup>, argile = 16 à 22kN/m<sup>3</sup>
- **Poids volumique du sol sec**, noté  $\gamma_d$  :  
 $\gamma_d = W_s/V$  ; sable = 14 à 18k N/m<sup>3</sup>, argile = 10 à 20 kN/m<sup>3</sup>.  
Si le sol est sec :  $\gamma = \gamma_d$ .
- **Poids volumique du sol saturé**, noté  $\gamma_{sat}$  : lorsque tous les vides sont remplis d'eau.  
 $\gamma_{sat} = W/V = (W_s + \gamma_w \cdot V_v)/V$
- **Poids volumique du sol déjaugé**, noté  $\gamma'$  : Il est pris en compte lorsque le sol est entièrement immergé. Il tient compte de la présence de l'eau qui remplit tous les vides et de la poussée d'Archimède :  $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$  ; sable et argile = 9 à 12 kN/m<sup>3</sup>.

On introduit aussi la notion **masse volumique**, notée  $\rho_i$ , et plus rarement celle de **densité** par rapport à l'eau, notée **Di** :

Densité :  $D_i = \rho_i / \gamma_w \Rightarrow$  densité sèche :  $D_d = \gamma_d / \gamma_w$

**b- Les paramètres sans dimensions (paramètres d'état)** : Ils indiquent dans quelles proportions sont les différentes phases d'un sol. Ils sont très importants et essentiellement variables. On définit:

- **Porosité**, notée **n**, qui permet de connaître l'importance des vides c'est-à-dire de savoir si le sol est dans un état lâche ou serré. Elle est définie comme étant le rapport du volume des vides au volume total.

$n = V_v/V$  ; sable :  $n = 0,25$  à  $0,5$  ; argile :  $n = 0,20$  à  $0,80$   
La porosité est toujours inférieure à 1. Elle peut aussi être exprimée en pourcent.

- **Indice des vides**, noté **e**, dont la signification est analogue à celle de la porosité. Il est défini par

la relation :

$e = V_v/V_s$  ; sable :  $e = 0,5$  à  $1$ , argile :  $n = 0,3$  à  $1$ .

L'indice des vides peut être supérieur à  $1$  et même atteindre la valeur  $13$  (cas extrême des argiles de Mexico).

• **La teneur en eau**, notée  $w$ , est définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides d'un volume donné de sol. Elle s'exprime en pour-cent. Elle est facilement mesurable en laboratoire.

$w = 100.W_w/W_s$  ; sable:  $w = 1$  à  $15\%$ , argile :  $w = 10$  à  $20\%$   
La teneur en eau peut dépasser  $100\%$  et même atteindre plusieurs centaines de pour-cent.

• **Le degré de saturation**, noté  $S_r$ , indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau au volume des vides. Il s'exprime en pour-cent.  
 $S_r = 100.V_w/V_v$  ; Le degré de saturation peut varier de  $0\%$  (sol sec) à  $100\%$  (sol saturé).

Parmi tous les paramètres définis précédemment, les paramètres sans dimensions sont les plus importants. Ils caractérisent l'état dans lequel se trouve le sol c'est à dire l'état de compacité du squelette ainsi que les quantités d'eau et d'air contenues dans le sol.

• **Densité relative ou indice de densité**, noté  $I_d$ , est définie par l'expression :

$$I_d = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

$e_{min}$  : est l'indice des vides correspondant à l'état le plus compact.

$e_{max}$  : est l'indice des vides correspondant à l'état le plus lâche.

$e$  : est l'indice des vides du sol en place.

L'indication de l'indice de densité permet d'avoir une idée sur l'état de compacité d'un sol donné :

$I_d = 0$  pour l'état le plus lâche ( $e = e_{max}$ ) et  $I_d = 1$  pour l'état le plus compact ( $e = e_{min}$ ).

### 2.1.2 Relations entre les paramètres

Tous les paramètres précédemment définis ne sont pas indépendants. Les relations les plus

importantes existant entre ces différents paramètres sont données comme suit :

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

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

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

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

$$[13] \quad Sr = \frac{V_w}{V_v}$$

$$[16] \quad \gamma = (1 + w)(1 - n) \cdot \gamma_s$$

$$[19] \quad \gamma = \gamma_d + n \cdot Sr \cdot \gamma_w$$

$$[22] \quad \gamma_d = (1 - n) \gamma_s$$

$$[25] \quad \gamma' = (1 - n)(\gamma_s - \gamma_w)$$

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

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

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

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

$$[14] \quad Sr = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \cdot \frac{w}{e}$$

$$[17] \quad \gamma = \frac{1+w}{1+e} \cdot \gamma_s$$

$$[20] \quad \gamma = \frac{\gamma_s + e \cdot Sr \cdot \gamma_w}{1+e}$$

$$[23] \quad \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$$

$$[26] \quad \gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e}$$

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

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

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

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

$$[15] \quad Sr = \frac{w}{w_{sat}} \quad (\gamma_d \text{ constant})$$

$$[18] \quad \gamma = (1 + w) \gamma_d$$

$$[21] \quad \gamma = (1 - n) \cdot \gamma_s + n \cdot Sr \cdot \gamma_w$$

$$[24] \quad \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

$$[27] \quad \gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \cdot \gamma_d$$

## 2.2 Caractéristiques granulométriques

### 2.2.1 La granulométrie (répartition granulométrique des particules)

Pour bien décrire un sol, il faut donc connaître sa granulométrie, c'est-à-dire la répartition de ses particules suivant leurs diamètres équivalents. Deux essais de laboratoire permettent d'établir la granulométrie des sols (Fig. 2.2) :

- l'analyse granulométrique par tamisage ;
- l'analyse granulométrique par sédimentation.

#### *a- L'analyse granulométrique par tamisage*

L'essai consiste à faire passer un échantillon représentatif de sol à travers des tamis superposés dont les ouvertures vont en décroissant du haut vers le bas. Les particules les plus grosses restent donc emprisonnées sur les tamis les plus hauts (refus ou retenu), tandis que les particules plus fines se dirigent vers les tamis inférieurs (tamisat ou passant). Lorsque les masses retenues sur chaque tamis deviennent constantes, le tamisage est terminé et tous les refus sont pesés. La masse de chaque refus est ensuite comparée à la masse totale de l'échantillon, ce qui permet de calculer les pourcentages de refus cumulé et de passant. Les résultats sont portés sur un graphique semi-logarithmique ou ils construisent une courbe granulométrique.

## *b- L'analyse granulométrique par sédimentation*

Afin d'estimer la distribution granulométrique des particules de silt et d'argile, on procède à une analyse granulométrique par sédimentation. La méthode consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules. À partir de la loi de Stokes, on détermine la taille des grains :

$$v = \frac{9.8D^2 (D_{rs} - D_{rl})}{3\eta} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{3v\eta}{9.8 (D_{rs} - D_{rl})}}$$

Où:

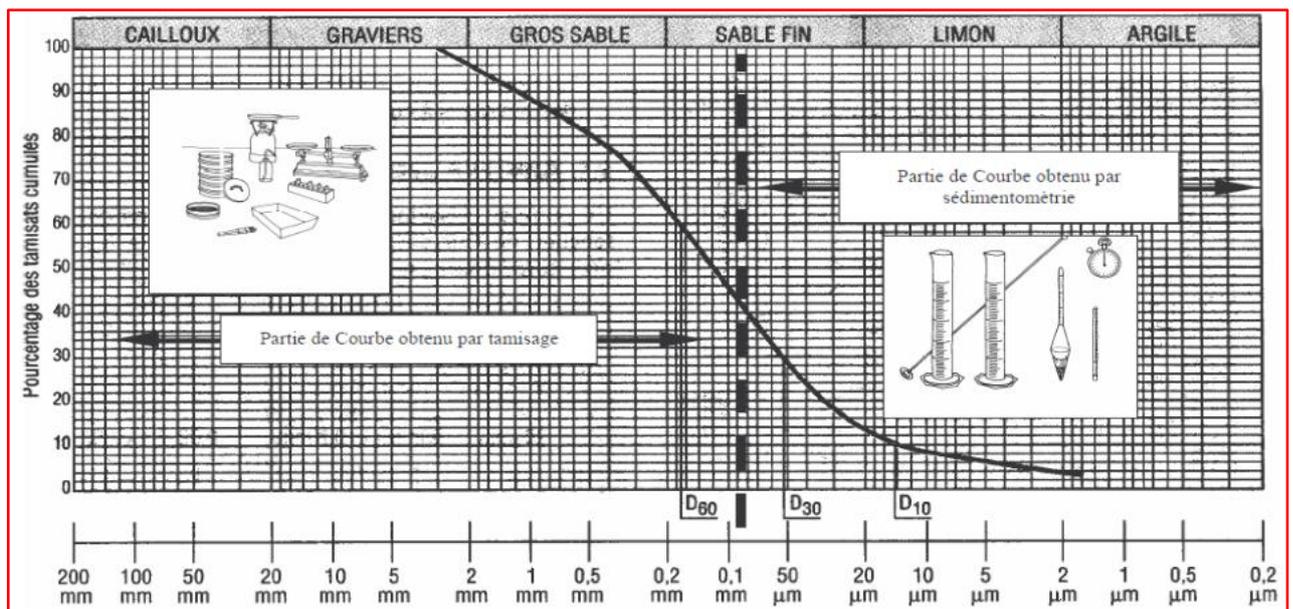
D= diamètre de la sphère (mm) ;

v = vitesse de chute de la sphère (cm/min) ;

Drs = densité relative de la sphère ;

Drl = densité relative du liquide ;

$\eta$  = viscosité dynamique du liquide (Pa.s).



*Fig.2.2: Courbe granulométrique.*

### 2.2.2 L'interprétation des courbes granulométriques

A première vue, une courbe granulométrique permet d'identifier les types de sols qui composent l'échantillon analysé. Si en examinant une courbe granulométrique, d'un échantillon constitué de gravier, de sable, de silt et d'argile, on trouve les proportions respectives de chaque type de sol exprimées en pourcentages. Quand on connaît ces proportions, il devient possible d'attribuer au sol une appellation bien définie. Ainsi, si le sol est composé de 27% de gravier, de 38% de sable,

de 29% de silt et de 6% d'argile par exemple, il porte le nom de sable silteux graveleux avec traces d'argile.

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par le coefficient d'uniformité (coefficient de Hazen), et le coefficient de courbure:

**a- coefficient d'uniformité** : permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique :

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

Où:

$D_{60}$  = diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant.

$D_{10}$  = diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant.

Selon la valeur du coefficient d'uniformité, on reconnaît cinq classes de granulométrie (Tab.2.2):

**Tab. 2.2** : Classes de granulométrie de sols

Coefficient d'uniformité	Classe de granulométrie
$C_u \leq 2$	Granulométrie très serrée
$2 < C_u \leq 5$	Granulométrie serrée
$5 < C_u \leq 20$	Granulométrie semi-étalée
$20 < C_u \leq 200$	Granulométrie étalée
$C_u > 200$	Granulométrie très étalée

**b- coefficient de courbure** : permet de décrire la forme de la courbe granulométrique :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Où :  $D_{30}$  = diamètre effectif des particules qui correspond à 30% du passant.

Lorsque certaines conditions sur  $C_u$  et  $C_c$  sont satisfaites ( $1 \leq C_u \leq 3$ ), le sol est dit bien gradué c'est à dire que sa granulométrie est bien étalée, sans prédominance d'une fraction particulière.

Quand sa granulométrie est discontinue ( $1 > C_u > 3$ ), avec prédominance d'une fraction particulière, il est dit mal gradué.

Les sols bien gradués constituent des dépôts naturellement denses avec une capacité portante

élevée. Ils peuvent être aisément compactés en remblais et forment des pentes stables.

### 2.3 Consistance des sols fins (limites d'Atterberg)

#### 2.3.1 Définition

La consistance que l'on peut définir comme un état de fermeté, est liée aux forces de cohésion entre les particules et ne concerne donc que les sols cohérents. Elle a une influence sur la résistance aux déformations.

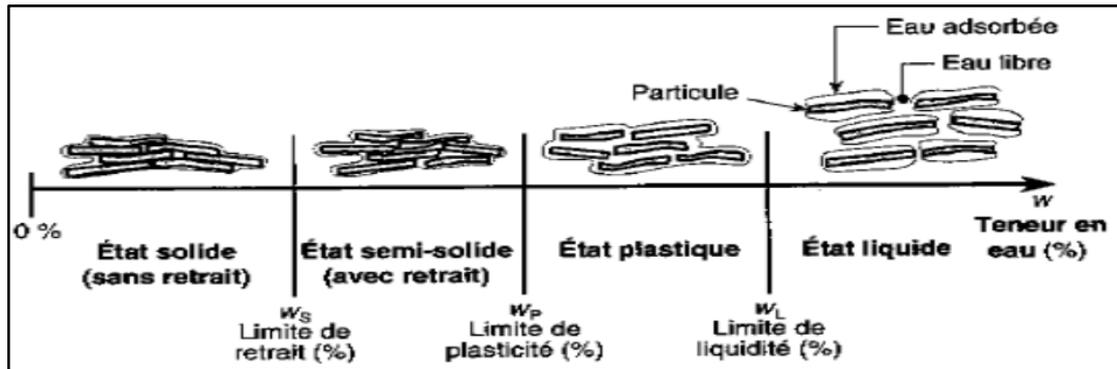
La consistance dépend principalement de la distance qui sépare les particules d'un sol (plus l'indice des vides est élevé, plus la distance est grande). En effet, les vides étant remplis d'eau, la mesure de la teneur en eau permet d'évaluer l'indice des vides et, par conséquent, la distance entre les particules. «  $w \uparrow \Rightarrow e \uparrow \Rightarrow$  particules éloignées  $\Rightarrow$  consistance mole  $\Rightarrow$  sol déformera facilement »

**2.3.2 Les états de consistance :** On distingue quatre états de consistance (Fig.2.3):  
**a- L'état solide :** Lorsque le sol est à l'état solide, ses particules sont en contact les unes avec les autres, et les films d'eau adsorbée sont très minces et se touchent : il n'y a pas d'eau libre entre les particules. L'assèchement du sol ne produit aucun retrait. Le sol manifeste une très grande résistance au cisaillement et, sous l'effet d'une charge, les déformations sont faibles avant qu'il ait rupture. En génie civil, on parle de sol ayant un comportement fragile, similaire à celui de la brique.

**b- L'état semi-solide :** Un sol à l'état semi-solide, a une faible teneur en eau, et les liens de cohésion entre ses particules sont très forts. Les films d'eau adsorbée, quoique encore minces, séparent légèrement les particules, de telle sorte qu'un assèchement du sol causerait un retrait. Il s'ensuit que les déformations du sol provoquées par des charges sont toujours accompagnées de fissures.

**c- L'état plastique :** Lorsque le sol est à l'état plastique, sa teneur en eau est plus grande et ses particules sont plus éloignées les unes des autres. Les films d'eau adsorbée sont beaucoup plus épais, mais ils se touchent encore ; la cohésion du sol est plus faible qu'à l'état semi-solide. Sous de petites charges, le sol se déforme sans fissures. Sa consistance varie de celle du beurre mou à celle du massif ferme : c'est un sol qu'on peut façonner à la main.

**d- L'état liquide :** Lorsque le sol est à l'état plastique, sa teneur en eau est si élevée qu'il n'existe pratiquement plus aucune cohésion entre les particules, qui sont entourées de leur film d'eau adsorbée et isolées les unes des autres par l'eau libre. Le sol peut alors se comporter comme un liquide visqueux d'une consistance variant de celle de la soupe aux pois à celle du beurre mou.



*Fig.2.3 : Etats de consistance*

### 2.3.3 Limites d'Atterberg

Les teneurs en eau qui délimitent les quatre états de consistance sont appelées limites de consistance ou limites d'Atterberg. Ces limites, qui s'expriment en pourcentages, sont les suivantes :

- **Limite de retrait ( $W_r$ )** : est la teneur en eau maximale que le sol peut avoir sans changer de volume. Cette limite sépare l'état solide de l'état semi-solide.
- **Limite de plasticité ( $W_p$ )** : on la définit comme la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges. Cette limite sépare l'état plastique de l'état semi-solide. Elle varie de 0% à 100%, mais elle demeure généralement inférieure à 40%.
- **Limite de liquidité ( $W_l$ )** : est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique. Elle peut atteindre 1000% dans le cas de certaines argiles, mais dans la plupart des cas elle ne dépasse pas 100%. Les limites de plasticité et de liquidité servent à identifier et à classer les sols à grains fins. Quant à la limite de retrait, elle sert à l'étude de certains sols dont le volume varie fortement à cause des changements de la teneur en eau. C'est surtout dans les régions arides, où se trouvent des dépôts de la montmorillonite (problème de retrait-gonflement).

### 2.3.4 Indices de plasticité et de liquidité

- **Indice de plasticité ( $I_p$ )**, qui s'exprime en pourcentage, correspond à la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité :  $I_p = w_l - w_p$ . Il permet de déterminer une zone dans laquelle on considérera que ce sol est à l'état plastique. (Fig.2.4).
- **Indice de liquidité ( $I_L$ )**, permet de savoir rapidement si un sol est à l'état liquide, plastique, semi-solide ou solide. Pour établir cet indice, on compare la teneur en eau naturelle (in situ) ( $w$ ) d'un sol à ses limites de plasticité et de liquidité :

$$I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p} = \frac{W - W_p}{I_p}$$

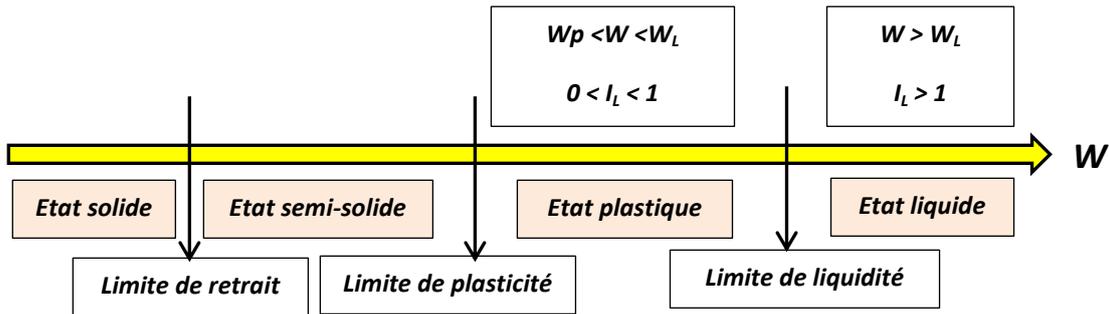


Fig. 2.3 : Limites d'Atterberg

### 2.3.5 L'activité des argiles

L'activité d'une argile ( $A$ ) est égale au rapport entre son indice de plasticité et la fraction d'argile présente dans un sol donné :

$$A = \frac{I_p}{\text{fraction d'argile}}$$

La **fraction d'argile** correspond au pourcentage que présente dans le sol le poids des particules dont le diamètre équivalent est inférieur à 0.002mm. Les observations démontrent que l'activité d'une argile est constante et que chaque type d'argile a une activité qui lui est propre.

**2.3.6 Le diagramme de plasticité :** En 1932, Casagrande proposa un diagramme de plasticité (Fig.2.5) permettant d'identifier les sols à grains fins à partir des limites d'Atterberg. Le diagramme est divisé en deux zones par la ligne A, chaque zone étant elle-même subdivisée en trois régions, selon la plasticité des sols.

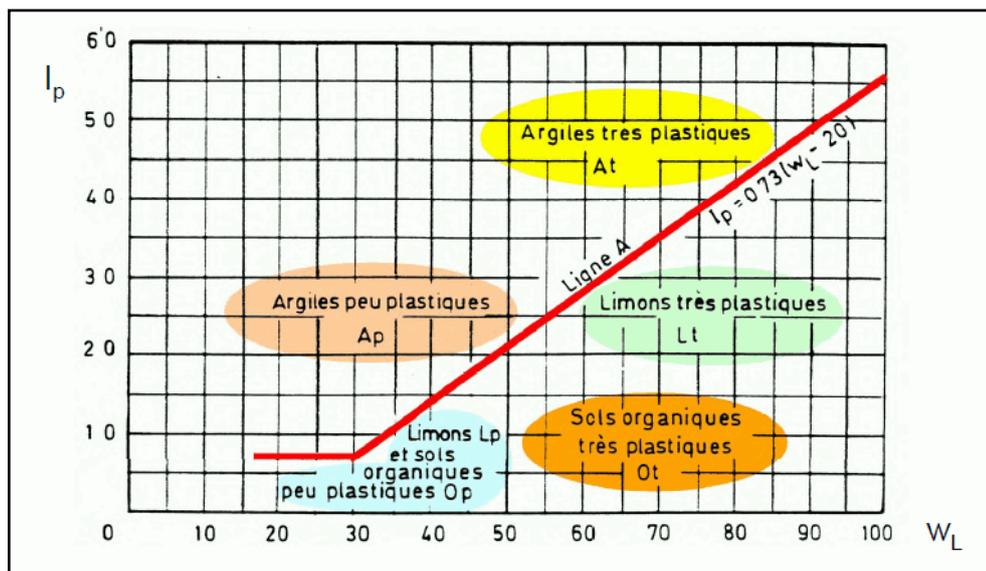


Fig.2.5 : Diagramme de plasticité (d'après Casagrande 1948)

## 2.4 Classification géotechnique des sols

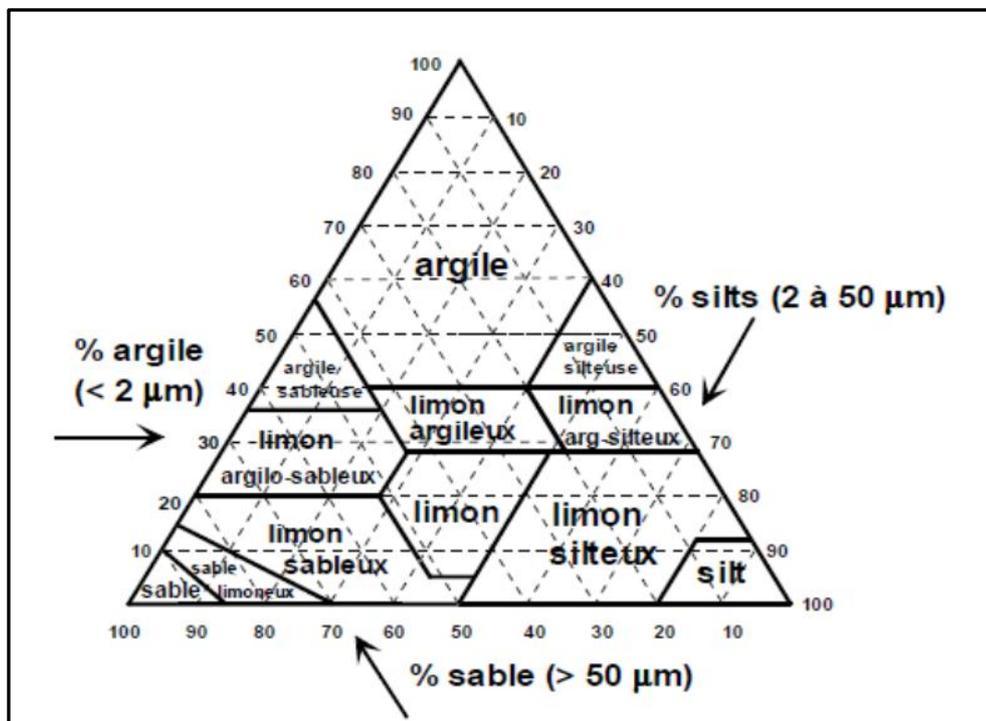
### 2.4.1 Principe des classifications des sols

Les systèmes de classification des sols sont nés du besoin des ingénieurs civils de disposer de renseignements suffisamment fiables sur le comportement des sols pour pouvoir prendre des décisions rapides et efficaces, surtout dans les domaines de construction routière et des infrastructures des pistes d'atterrissage ou des barrages. Les systèmes de classification des sols ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent de grouper de très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain.

### 2.4.2 Classification triangulaire

Les systèmes de classification triangulaire prennent la forme de triangles dont les côtés portent des échelles représentant les proportions de sable, de silt et d'argile mesurées sur un échantillon de sol. (Fig.2.6).

Ces triangles sont divisés en zones portant une appellation conventionnelle selon les proportions relatives des types de sols. Seules les échelles des proportions d'argile, de sable et de silts (limon) figurent sur le triangle.



**Fig.2.6 :** Classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm)

Utilisons le diagramme de la figure.2.6 pour classer un sol comportant 41% d'argile, 42% de

sable et 17% de silt, c'est-à-dire un sable argileux avec un peu de silt. C'est le point sur le diagramme qui correspond à ces proportions, mais il est situé dans la zone des argiles ; on attribue donc à ce sol l'appellation d'argile, malgré que sa fraction argileuse ne soit pas la plus grande. La classification triangulaire reconnaît ainsi l'importance de la matrice argileuse dans le comportement des sols.

### 2.4.3 Classification (LPC/USCS) des sols

La classification LPC (1965) utilise les résultats d'essais classiques d'identification des sols :

- Des critères granulométriques :

- les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisât à 2 mm et 0,08 mm);
- la forme de la courbe granulométrique :  $C_u$  et  $C_c$  (ou  $C_z$ );

- Les caractéristiques de plasticité  $W_L$  et  $I_p$ , et la ligne **A** d'équation :

$$I_p = 0,73(W_L - 20) \quad (\text{Relation de Casagrande}) ;$$

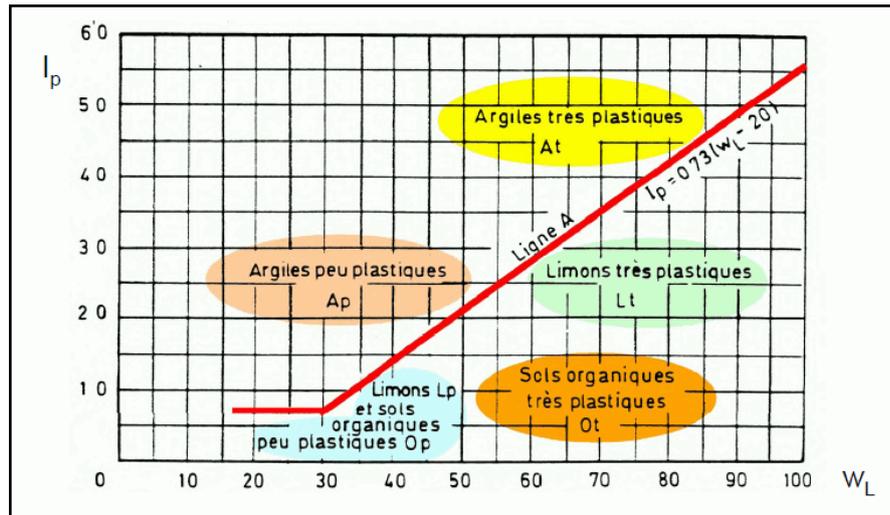
- La teneur en matières organiques.

**a- Les groupes de sols :** Le système de classification LPC débouche sur 15 sols types, affectés chacun d'un symbole à deux lettres, prises dans les trois ensembles suivants :

*Tab.2.3 : Les groupes de sols.*

Éléments du sol	Granularité du sol	Plasticité du sol
<p><b>G</b> : Gravier. Le gravier est la fraction principale</p> <p><b>S</b> : Sable. Le sable est la fraction principale</p> <p><b>L</b> : Limon ou limoneux</p> <p><b>A</b> : Argile ou argileux</p> <p><b>T</b> : Tourbe</p> <p><b>O</b> : Organique. Présence de matières organiques</p>	<p><b>b</b>: Bien gradué</p> <p><b>m</b> : Mal gradué</p>	<p><b>t</b>: Très plastique</p> <p><b>p</b> : Peu plastique</p>

**b- La procédure de classification :** La classification des sols grenus est donnée par le tableau 2.4 et la figure 2.7 donne la classification des sols fins.



*Fig. 2.7 : Classification LPC des sols fins en laboratoire. Diagramme de plasticité*

### 2.4.4 Classification LPC modifiée

Les modifications apportées à la classification LPC/USCS portent exclusivement sur la description des sols organiques (teneur en matières organiques supérieure à 3 %). Seuls les sols comportant moins de 10 % de matières organiques continuent d'être classés comme les sols fins. Pour les teneurs en matières organiques plus fortes, l'accent est mis sur le degré de décomposition (d'humification) des fibres organiques, évalué au moyen du test de von Post.

La classification LPC modifiée débouche sur vingt-deux types de sols:

- des sols grenus : Gb, Gm, GA, GL, Sb, Sm, SA, SL
- des sols fins : At, Ap, Lt, Lp
- des sols faiblement organiques : fO-At, fO-Ap, fO-Lt, fO-Lp
- des sols moyennement organiques : mO-a, mO-sf, mO-f
- des sols très organiques : tO-a, tO-sf, tO-f.

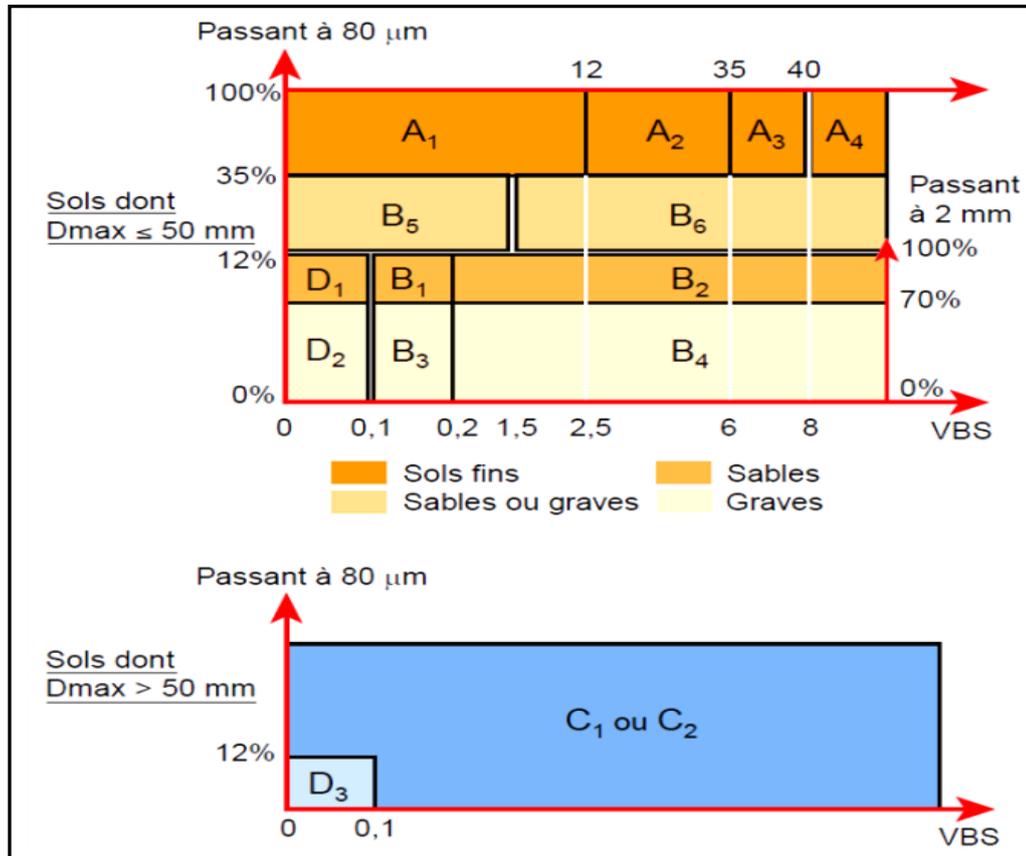
Les symboles des sols grenus et des sols fins sont les mêmes que dans la classification LPC/USCS. Pour les sols organiques, les symboles : a, sf et f signifient « à matière organique amorphe », « à matière organique semi fibreuse » et « à matière organique fibreuse ».

*Tab.2.4 : classification des sols grenus – LPC/USCS*

<b>plus de 50 % des éléments &gt; 0,08 mm</b>					
<b>Définitions</b>		<b>Symboles</b>	<b>Conditions</b>	<b>Appellations</b>	
<b>GRAVES</b>	<b>Plus de 50% d'éléments &gt; 0,08 mm ont un diamètre &gt; 2 mm</b>	<b>moins de 5 % d'éléments &lt; 0,08 mm</b>	<b>Gb (GW)</b>	Cu > 4 et Cc compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
		<b>moins de 5 % d'éléments &lt; 0,08 mm</b>	<b>Gm (GP)</b>	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		<b>plus de 12 % d'éléments &lt; 0,08 mm</b>	<b>Gm (GP)</b>	Limite d'Atterberg au-dessous de A	grave limoneuse
		<b>plus de 12 % d'éléments &lt; 0,08 mm</b>	<b>GL (GM)</b>	Limite d'Atterberg au-dessus de A	grave argileuse
<b>SABLES</b>	<b>Plus de 50% d'éléments &gt; 0,08 mm ont un diamètre &lt; 2 mm</b>	<b>moins de 5 % d'éléments &lt; 0,08 mm</b>	<b>Sb (SW)</b>	Cu > 6 et Cc compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
		<b>moins de 5 % d'éléments &lt; 0,08 mm</b>	<b>Sm (SP)</b>	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		<b>plus de 12 % d'éléments &lt; 0,08 mm</b>	<b>SL (SM)</b>	Limite d'Atterberg au-dessous de A	sable limoneux
		<b>plus de 12 % d'éléments &lt; 0,08 mm</b>	<b>SA (SC)</b>	Limite d'Atterberg au-dessus de A	sable argileux
Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % : on utilise un double symbole.					

## 2.4.5 Classification GTR

Une classification de matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières et donne par le GTR (Setra LCPC ; 1992).



**Fig.2.8 :** Structure générale de la classification GTR pour les terrassements routiers

La classification GTR permet de classer les sols, en fonction d'un certain nombre de paramètres (Passant à  $80 \mu m$ , passant à  $2 mm$ , l'indice de plasticité  $I_p$  et la valeur au bleu  $V_{bs}$ ), en:

- Classe A : Sols fins. - Classe B : Sols sableux et graveleux avec fines
- Classe C : Sols comportant des fines et de gros éléments
- Classe D : Sols insensibles à l'eau.

Les principes généraux de cette classification sont présentés sur la figure 2.8. La classification détaillée est décrite dans un guide technique du LCPC et du SETRA et dans la norme NF P 11-300.

### 2.5 EXERCICES

#### Exercice 1

On connaît pour un sol :

- le poids volumique =  $14 \text{ kN/m}^3$  - la teneur en eau = 40%
- le poids volumique des particules solides =  $27 \text{ kN/m}^3$

Calculer alors le poids volumique sec, le degré de saturation, l'indice des vides, la porosité, le poids volumique saturé ainsi que le poids volumique déjaugé.

#### Solution :

On utilisant les relations entre les paramètres du sol, on aura :

$$\gamma = \gamma_d (1+w) \text{ donne } \gamma_d = \gamma / (1+w) = 14 / (1+0,4) = 10 \text{ kN/m}^3:$$

$$w = S_r \gamma_w (1/\gamma_d - 1/\gamma_s), \text{ ce qui donne : } S_r = 0,64 = 64\%$$

$$e = \gamma_s / \gamma_d - 1 = 1,7$$

$$n = e / (1+e) = 0,63$$

$$\gamma = \gamma_d + n S_r \gamma_w, \text{ ce qui donne (avec } S_r = 1) : \gamma_{\text{sat}} = \gamma_d + n \gamma_w = 16,3 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 6,3 \text{ kN/m}^3$$

#### Exercice 2

On prélève deux échantillons du même sol : Le premier saturé (sous le niveau de la nappe phréatique), son poids volumique égal à  $21 \text{ kN/m}^3$ . Le deuxième (au-dessus de la nappe), son poids volumique égal à  $18,7 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ .

Calculer le degré de saturation du deuxième échantillon sachant que le poids volumique des particules solides égal à  $27 \text{ kN/m}^3$ .

#### Solution :

Pour le même sol, on dispose pour le même sol de :

$$\gamma_{\text{sat}} = 21 \text{ kN/m}^3, \gamma = 18,7 \text{ kN/m}^3, \gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3.$$

Dans un premier temps, on calcule la valeur de l'indice des vides - (il reste le même au-dessus et au-dessous de la nappe, puisqu'il s'agit du même sol et de même condition de compacité) – et cela en utilisant la relation suivante :

$$e = (\gamma_s - \gamma_{sat}) / (\gamma_{sat} - \gamma_w) = 0,55.$$

Ensuite la relation suivante permet de déterminer  $S_r$  :

$$\gamma = (\gamma_s + e \cdot S_r \cdot \gamma_w) / (1+e) \text{ d'où :}$$

$$S_r = [\gamma(1+e) - \gamma_s] / e \cdot \gamma_w = 0,36$$

$$S_r = 36\%.$$

### **Exercice 3**

Un échantillon de sol a été étudié au laboratoire et on a tiré les résultats suivants :

Poids volumique (kN/m <sup>3</sup> )	Teneur en eau (%)	Densité des grains solides
18,5	35	2,7

On admet que le poids volumique de l'eau égal 10 kN/m<sup>3</sup>

Calculer le poids volumique sec, le degré de saturation, l'indice des vides, la porosité, le poids volumique saturé ainsi que le poids volumique déjaugé.

### **Solution :**

Connaissant la densité des grains solides et le poids volumique de l'eau, on peut calculer le poids volumique des grains solides  $\gamma_s$  :

$$\gamma_s = 2,7 \cdot 10 = 27 \text{ kN/m}^3$$

- On a:  $\gamma = \gamma_d (1+w)$  donc:  $\gamma_d = \gamma / (1+w) = 18,5 / (1+0,35) = 13,70 \text{ kN/m}^3$

$$w = S_r \gamma_w (1/\gamma_d - 1/\gamma_s) \text{ d'où: } S_r = w / [\gamma_w (1/\gamma_d - 1/\gamma_s)]$$

$$S_r = 0,97 \text{ c.à d: } S_r = 97\%$$

$$e = \gamma_s / \gamma_d - 1 = 0,97$$

$$n = e / (1+e) = 0,49$$

$\gamma = \gamma_d + n S_r \gamma_w$  ; à saturation ( $S_r = 1$ ) on aura :

$$\gamma_{sat} = \gamma_d + n \gamma_w = 13,7 + 0,49 \cdot 10 = 18,6 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 8,6 \text{ kN/m}^3.$$

### Exercice 4

Le prélèvement d'un échantillon intact au centre d'une couche d'argile molle située sous la nappe phréatique a permis de procéder, en laboratoire, aux mesures suivantes:

Poids total de (N)	Volume total (cm <sup>3</sup> )	Poids sec (N)
1,41	93,9	0,774

On demande :

- 1) Déterminer le poids volumique et la teneur en eau.
- 2) Déterminer l'indice des vides.
- 3) Vérifier le degré de saturation, On donne :  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$  ;  $\gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3$ .

### Solution:

1) – Poids volumique :  $\gamma = W/V = 0,47 \text{ N}/3,13 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 15 \text{ kN/m}^3$

- Teneur en eau :  $w = W_w/W_s$  avec  $W_w = W - W_s$

$W_w = 1,41 - 0,774 = 0,636 \text{ N}$  d'où  $w = 0,822$ , c.à d :  $w\% = 82,2 \%$

2) – Indice des vides :  $e = V_v / V_s$

L'échantillon ayant été prélevé dans la nappe phréatique, il est saturé donc :

$V_v = V_w = W_w/\gamma_w = (0,636 \cdot 10^{-3} \text{ kN}) / (10 \text{ kN/m}^3) = 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$  et :

$V_s = V - V_v = (9,39 - 6,36) \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 3,03 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

d'où :  $e = 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / 3,03 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 2,10$

3) – Vérification du degré de saturation :  $S_r = V_w/V_v$

$V_s = W_s/\gamma_s = (0,774 \cdot 10^{-3} \text{ kN}) / (27 \text{ kN/m}^3) = 2,87 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

$V_v = V - V_s = (9,39 - 2,87) \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 6,52 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

$S_r = V_w/V_v = 6,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / 6,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 0,9769 = 97,7 \%$

On remarque que la valeur du degré de saturation est très proche de 100%, on a une légère perte de saturation en eau lors du transport au laboratoire.

### Exercice 5

On a réalisé un sondage de reconnaissance, et on a pris deux échantillons (argile) situés au-dessous du niveau de la nappe, sur lesquels des mesures usuelles de poids et de volume ont été effectué au laboratoire. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

	Echantillon n° 1	Echantillon n° 2
Poids total du sol (N)	0,96	1,36
Volume total du sol (cm <sup>3</sup> )	60	86
Poids sec (N)	0,6	0,8

On admet que le poids volumique des grains solides est égal à 27 kN/m<sup>3</sup> et que le poids volumique de l'eau à pour valeur 10 kN/m<sup>3</sup>

Déterminer pour chaque échantillon :

- 1) le poids volumique et la teneur en eau ;
- 2) l'indice des vides,
- 3) le degré de saturation,
- 4) la variation relative de volume pendant son prélèvement et son transport au laboratoire, sachant que  $\gamma_s$  a été trouvé égal à 27,5 kN/ m<sup>3</sup>.

### Solution :

Pour les deux échantillons, on dispose de : W, V et W<sub>s</sub>

$$W_1 = 0,96 \text{ N} = 0,96 \cdot 10^{-3} \text{ kN} ; W_2 = 1,36 \text{ N} = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ kN}$$

$$V_1 = 60 \text{ cm}^3 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 ; V_2 = 86 \text{ cm}^3 = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{s1} = 0,6 \text{ N} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ kN} ; W_{s2} = 0,8 \text{ N} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ kN}$$

1) - Poids volumique :  $\gamma = W/V$  ; on aura donc :

$$\gamma_1 = 0,96 \cdot 10^{-3} \text{ kN} / 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 16 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_2 = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ kN} / 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 15,81 \text{ kN/m}^3$$

- Teneur en eau :  $w = W_w/W_s$  avec  $W_w = W - W_s$  ; donc :

$$W_{w1} = 0,96 - 0,60 = 0,36 \text{ N} \text{ et } W_{w2} = 1,36 - 0,8 = 0,56 \text{ N.}$$

$$d'où : w_1 = 0,36\text{N}/0,60 \text{ N} = 0,6 = 60\% \text{ et } w_2 = 0,56\text{N}/0,8\text{N} = 0,7 = 70\%$$

2) Indice des vides :  $e = V_v/V_s$  avec  $V_s = W_s/\gamma_s$  et  $V_v = V - V_s$  ; donc :

$$V_{s1} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ kN} / (27\text{kN/m}^3) = 2,222 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ et } V_{s2} = 2,963 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$V_{v1} = (6 - 2,222) \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 3,778 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$  et  $V_{v2} = 5,638 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$   
et on aura :  $e_1 = 3,778 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / 2,222 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 1,70$  et  $e_2 = 1,90$

3) Degré de saturation :  $S_r = V_w / V_v$  avec :  $V_w = W_w / \gamma_w$

$V_{w1} = 0,36 \text{ kN} / (10 \text{ kN/m}^3) = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$  et  $V_{w2} = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

Alors :  $S_{r1} = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / 3,778 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 0,953 = 95,3 \%$  et  $S_{r2} = 0,99 = 99\%$ .

Remarquons que pour les 2 échantillons recueillis dans la nappe, on a une légère perte de saturation en eau lors du transport au laboratoire.

4) Les volumes  $V$  considérés dans nos calculs sont ceux déterminés au laboratoire et sont légèrement supérieurs à ceux in situ qu'on appellera  $V'$  à cause de la décompression.

On recalcule les valeurs de  $V_s$  avec  $\gamma_s = 27,5 \text{ kN/m}^3$ , on trouve :

$V_{s1} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ kN} / (27,5 \text{ kN/m}^3) = 2,182 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$  et  $V_{s2} = 2,909 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

Comme les 2 échantillons sont saturés in situ, il en résulte :  $V' = V_s + V_w$

$V'1 = 5,782 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$  et  $V'2 = 8,508 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

La variation relative de volume est calculée par :  $\Delta V / V' = (V - V') / V'$

$(\Delta V / V')_1 = (6 - 5,782) \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / 5,782 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 0,0377 = 3,8\%$

$(\Delta V / V')_2 = (8,6 - 8,508) \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / 8,508 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 0,0108 = 1,1 \%$ .

## 2.6 EXERCICES SUPPLEMENTAIRES

### 2.6.1 Poids volumiques humides : $\gamma_h$

#### Exercice 6

Donner une expression du poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ) et le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) :

$$\gamma_h = f(n, \omega, \gamma_s) = (1 + \omega)(1 - n)\gamma_s$$

#### Solution :

En partant de l'expression de base du poids volumique humide :  $\gamma_h = \frac{W}{V}$

$$W = W_w + W_s$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + W_w}{V}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad \Longrightarrow \quad W_w = \omega W_s$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + \omega W_s}{V} = \frac{(1 + \omega)W_s}{V}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad W_s = \gamma_s * V_s$$

$$\gamma_h = \frac{(1 + \omega)\gamma_s V_s}{V}$$

$$V = V_s + V_v \quad \Longrightarrow \quad V_s = V - V_v$$

$$\gamma_h = \frac{(1 + \omega)(V - V_v)\gamma_s}{V} = (1 + \omega) \left( \frac{V}{V} - \frac{V_v}{V} \right) \gamma_s$$

et comme  $n = \frac{V_v}{V}$ , on aura en final :

$$\gamma_h = (1 + \omega)(1 - n)\gamma_s$$

### **Exercice 7**

Donner une expression du poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ) et le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) :

$$\gamma_h = f(e, \omega, \gamma_s) = \frac{(1+\omega)\gamma_s}{1+e}$$

### **Solution :**

Par définition, le poids volumique humide est donné par la relation suivante :  $\gamma_h = \frac{W}{V}$

$$W = W_w + W_s$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + W_w}{V}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad \Longrightarrow \quad W_w = \omega W_s$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + \omega W_s}{V}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Rightarrow \quad W_s = \gamma_s * V_s$$

$$V = V_s + V_v$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s * V_s + \omega(\gamma_s * V_s)}{V_s + V_v} = \frac{(1 + \omega)(\gamma_s * V_s)}{V_s + V_v} = \frac{(1 + \omega)\gamma_s}{\frac{V_s + V_v}{V_s}} = \frac{(1 + \omega)\gamma_s}{1 + \frac{V_v}{V_s}}$$

$$\gamma_h = \frac{(1 + \omega)(\gamma_s * V_s)}{V_s + V_v}$$

$$\gamma_h = \frac{(1 + \omega)\gamma_s}{\frac{V_s + V_v}{V_s}}$$

et sachant que :  $e = \frac{V_v}{V_s}$ , on aura en final :

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

### **Exercice 8**

Etablir l'expression suivante qui donne le poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) en fonction de la teneur en eau ( $\omega$ ) et le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) :

$$\gamma_h = (1 + \omega)\gamma_d$$

### **Solution :**

Le poids volumique humide est donné par l'expression suivante :  $\gamma_h = \frac{W}{V}$

$$W = W_w + W_s$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + W_w}{V}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad \Rightarrow \quad W_w = \omega W_s$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + \omega W_s}{V}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Rightarrow \quad W_s = \gamma_s * V_s$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s * V_s + \omega(\gamma_s * V_s)}{V} = \frac{(1+\omega)\gamma_s V_s}{V}$$

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

$$\gamma_h = \frac{(1+\omega)\gamma_s V_s}{\frac{W_s}{\gamma_d}}$$

et comme :  $W_s = \gamma_s * V_s$ , l'expression de  $\gamma_h$  s'écrit :

$$\gamma_h = (1 + \omega)\gamma_d$$

### Exercice 9

Etablir l'expression du poids volumique ( $\gamma_h$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_h = f(\gamma_d, \gamma_s, S_r, \gamma_w) = \gamma_d + \left(\frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s}\right) S_r \gamma_w$$

### Solution :

$$\gamma_h = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

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

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Rightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_d V + \gamma_w V_w}{V} = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{V}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{V_v}{n}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{\frac{V_v}{n}}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + n S_r \gamma_w = \gamma_d + \frac{V_v}{V} S_r \gamma_w = \gamma_d + \left(\frac{V-V_s}{V}\right) S_r \gamma_w$$

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

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Rightarrow \quad V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + \frac{\frac{W_s}{\gamma_d} - \frac{W_s}{\gamma_s}}{\frac{W_s}{\gamma_d}} S_r \gamma_w = \gamma_d + \frac{W_s \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s}\right)}{\frac{W_s}{\gamma_d}} S_r \gamma_w = \gamma_d + \frac{\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s}}{\frac{1}{\gamma_d}} S_r \gamma_w$$

En fin, l'expression du poids volumique ( $\gamma_h$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit sous la forme suivante :

$$\gamma_h = f(\gamma_d, \gamma_s, S_r, \gamma_w) = \gamma_d + \left(\frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s}\right) S_r \gamma_w$$

### **Exercice 10**

Etablir l'expression du poids volumique ( $\gamma_h$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_h = f(\gamma_d, e, S_r, \gamma_w) = \gamma_d + \frac{e S_r}{1+e} \gamma_w$$

### **Solution :**

$$\gamma_h = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

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

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Rightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_d V + \gamma_w * V_w}{V} = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{V} = \gamma_d + \frac{\frac{V_w}{V}}{\frac{V_s + V_v}{V_v}} \gamma_w$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + \frac{S_r}{\frac{1}{e}+1} \gamma_w = \gamma_d + \frac{S_r}{\frac{1+e}{e}} \gamma_w = \gamma_d + \frac{e S_r}{1+e} \gamma_w$$

Finalement, on aura :

$$\gamma_h = f(\gamma_d, e, S_r, \gamma_w) = \gamma_d + \frac{e S_r}{1+e} \gamma_w$$

### Exercice 11

Etablir l'expression du poids volumique ( $\gamma_h$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_h = f(n, \gamma_s, S_r, \gamma_w) = (1 - n)\gamma_s + n * S_r * \gamma_w$$

### Solution :

$$\gamma_h = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad \Rightarrow \quad W_s = \gamma_d V ;$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Rightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_d V + \gamma_w V_w}{V} = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{V}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{V_v}{n}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{\frac{V_v}{n}}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + n S_r \gamma_w$$

Mais le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) peut prendre la forme suivante :

$\gamma_d = (1 - n)\gamma_s$ , et cela en suivant les étapes qui suivent :

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

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad W_s = \gamma_s * V_s$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s V_s}{V}$$

$$V = V_v + V_s \quad \Longrightarrow \quad V_s = V - V_v$$

$$\gamma_d = \frac{(V - V_v)\gamma_s}{V}$$

$$\gamma_d = \left(\frac{V}{V} - \frac{V_v}{V}\right)\gamma_s,$$

et sachant que :  $n = \frac{V_v}{V}$ , l'expression de  $\gamma_d$  prend la forme qui suit :

$$\gamma_d = (1 - n)\gamma_s$$

Et on aura finalement l'expression du poids volumique ( $\gamma_h$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) qui s'écrit :

$$\gamma_h = f(n, \gamma_s, S_r, \gamma_w) = (1 - n)\gamma_s + n * S_r * \gamma_w$$

### **Exercice 12**

Etablir l'expression du poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_h = f(\gamma_s, \omega, \gamma_w, S_r) = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{1 + \frac{\omega \gamma_s}{S_r \gamma_w}}$$

### **Solution :**

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

$$W = W_s + W_w$$

$$V = V_s + V_v$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad W_s = \gamma_s V_s \quad \text{et} \quad V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad \Longrightarrow \quad W_w = \omega W_s = \omega \gamma_s V_s$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad \Longrightarrow \quad V_v = \frac{V_w}{S_r}$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s V_s + \omega \gamma_s V_s}{\frac{W_s + V_w}{\gamma_s + S_r}} = \frac{\gamma_s V_s (1 + \omega)}{\frac{W_s + V_w}{\gamma_s + S_r}}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Longrightarrow \quad V_w = \frac{W_w}{\gamma_w}$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s V_s (1 + \omega)}{\frac{W_s + \frac{W_w}{\gamma_w}}{\gamma_s + S_r}} = \frac{\gamma_s V_s (1 + \omega)}{\frac{W_s S_r \gamma_w + \frac{W_w \gamma_s}{S_r}}{\gamma_s S_r \gamma_w + \frac{W_w \gamma_s}{S_r}}} = \frac{\gamma_s V_s (1 + \omega)}{\frac{W_s S_r \gamma_w + W_w \gamma_s}{\gamma_s S_r \gamma_w}} = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{\frac{W_s S_r \gamma_w + W_w \gamma_s}{V_s \gamma_s S_r \gamma_w}}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad \gamma_s V_s = W_s$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{\frac{W_s S_r \gamma_w + W_w \gamma_s}{W_s S_r \gamma_w}} = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{1 + \frac{W_w \gamma_s}{W_s S_r \gamma_w}}$$

et comme :  $\frac{W_w}{W_s} = \omega$ , on aura finalement :

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{1 + \frac{\omega \gamma_s}{S_r \gamma_w}}$$

### **Exercice 13**

Etablir l'expression du poids volumique ( $\gamma_h$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), l'indice des vides ( $e$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_h = f(\gamma_s, S_r, e, \gamma_w) = \frac{\gamma_s + S_r e \gamma_w}{1 + e}$$

**Solution :**

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

$$W = W_s + W_w$$

$$V = V_s + V_v$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad W_s = \gamma_s V_s$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Longrightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s V_s + \gamma_w V_w}{V_s + V_v}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad \Longrightarrow \quad V_w = S_r V_v$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s V_s + \gamma_w S_r V_v}{V_s + V_v}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par  $V_s$ , on obtient :

$$\gamma_h = \frac{\frac{\gamma_s V_s}{V_s} + \frac{\gamma_w V_v}{V_s} \gamma_w S_r V_v}{\frac{V_s + V_v}{V_s}}$$

et comme :  $e = \frac{V_v}{V_s}$  on obtient :

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s + e S_r \gamma_w}{1 + e}$$

### **Exercice 14**

Etablir l'expression du poids volumique ( $\gamma_h$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), de la porosité ( $n$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_h = f(n, \gamma_d, S_r, \gamma_w) = \gamma_d + n S_r * \gamma_w$$

**Solution :**

$$\gamma_h = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad \Rightarrow \quad W_s = \gamma_d V ;$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Rightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_d V + \gamma_w V_w}{V} = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{V}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{V_v}{n}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{\frac{V_v}{n}}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + n S_r \gamma_w$$

### 2.6.2 Poids volumique sec : $\gamma_d$

**Exercice 15**

Donner une expression du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ) et le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) :

$$\gamma_d = f(n, \gamma_s) = (1 - n)\gamma_s$$

**Solution :**

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

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Rightarrow \quad W_s = \gamma_s * V_s$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s V_s}{V}$$

$$V = V_v + V_s \quad \Longrightarrow \quad V_s = V - V_v$$

$$\gamma_d = \frac{(V - V_v)\gamma_s}{V}$$

$$\gamma_d = \left(\frac{V}{V} - \frac{V_v}{V}\right)\gamma_s,$$

et sachant que :  $n = \frac{V_v}{V}$ , l'expression de  $\gamma_d$  prend la forme suivante :

$$\gamma_d = (1 - n)\gamma_s$$

### **Exercice 16**

Donner une expression du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) en fonction de l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) :

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

### **Solution :**

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

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad W_s = \gamma_s * V_s$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s * V_s}{V}$$

$$V = V_v + V_s$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s * V_s}{V_v + V_s}$$

Et en divisons le numérateur et le dénumérateur par  $V_s$  en obtient :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{\frac{V_v + V_s}{V_s}} = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{V_v}{V_s}}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

D'où l'expression du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) en fonction de l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) s'écrit comme suit :

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

### **Exercice 17**

Etablir l'expression du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) en fonction du poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) et la teneur en eau ( $\omega$ ) :

$$\gamma_d = f(\gamma_h, \omega) = \frac{\gamma_h}{(1+\omega)}$$

### **Solution :**

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

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \implies W_s = \gamma_s * V_s$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s * V_s}{V}$$

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

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s V_s}{\frac{W}{\gamma_h}} = \frac{\gamma_h \gamma_s V_s}{W}$$

$$W = W_s + W_w$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h \gamma_s V_s}{W_s + W_w}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \implies W_w = \omega W_s$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h \gamma_s V_s}{W_s + \omega W_s} = \frac{\gamma_h \gamma_s V_s}{\gamma_s V_s + \omega(\gamma_s V_s)} = \frac{\gamma_h \gamma_s V_s}{(1 + \omega)\gamma_s V_s}$$

D'où l'expression du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) en fonction du poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) et la teneur en eau ( $\omega$ ) :

$$\gamma_d = f(\gamma_h, \omega) = \frac{\gamma_h}{(1+\omega)}$$

### **Exercice 18**

Ecrire l'expression du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

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

### **Solution :**

$$\gamma_d = \frac{w_s}{v_s + v_v} = \frac{w_s}{\frac{w_s}{\gamma_s} + \frac{v_w}{S_r}} = \frac{w_s}{\frac{w_s}{\gamma_s} + \frac{w_w}{S_r \cdot \gamma_w}}$$

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

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

### **Exercice 19**

Ecrire l'expression du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{\frac{\gamma_w}{\gamma_s} + \omega_{sat}}$$

### **Solution :**

$$\gamma_d = \frac{w_s}{v_s + v_v} = \frac{w_s}{\frac{w_s}{\gamma_s} + \frac{v_w}{S_r}} = \frac{w_s}{\frac{w_s}{\gamma_s} + \frac{w_w}{S_r \cdot \gamma_w}}$$

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

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$  , d'où l'expression du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{\frac{\gamma_w}{\gamma_s} + \omega_{sat}}$$

### 2.6.3 Poids volumique des grains solides : $\gamma_s$

#### Exercice 20

Etablir l'expression du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) en fonction du poids volumique humide ( $\gamma_h$ ), la porosité ( $n$ ) et la teneur en eau ( $\omega$ ) :

$$\gamma_s = f(\gamma_h, n, \omega) = \frac{\gamma_h}{(1-n)(1+\omega)}$$

#### Solution :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

$$V = V_v + V_s \quad \Longrightarrow \quad V_s = V - V_v$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V - V_v}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \Longrightarrow \quad V_v = nV$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V - nV} = \frac{W_s}{(1-n)V}$$

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

$$\gamma_s = \frac{W_s}{(1-n) \frac{W}{\gamma_h}} = \frac{W_s \gamma_h}{(1-n)W} = \frac{\gamma_h}{(1-n)W \frac{1}{W_s}}$$

$$W = W_s + W_w$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{(1-n)\frac{W_s+W_w}{W_s}} = \frac{\gamma_h}{(1-n)(1+\frac{W_w}{W_s})}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

D'où l'expression du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) en fonction du poids volumique humide ( $\gamma_h$ ), la porosité ( $n$ ) et la teneur en eau ( $\omega$ ) s'écrit la forme suivante :

$$\gamma_s = f(\gamma_h, n, \omega) = \frac{\gamma_h}{(1-n)(1+\omega)}$$

### **Exercice 21**

Etablir l'expression du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) et l'indice des vides ( $e$ ) :

$$\gamma_s = f(\gamma_d, e) = (1 + e)\gamma_d$$

### **Solution :**

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

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

$$\gamma_s = \frac{\gamma_d * V}{V_s}$$

$$V = V_v + V_s$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma_d(V_v+V_s)}{V_s}$$

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

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

D'où l'expression du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) et l'indice des vides ( $e$ ) prend la forme suivante :

$$\gamma_s = f(\gamma_d, e) = (1 + e)\gamma_d$$

### Exercice 22

Etablir l'expression du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) et la porosité ( $n$ ) :

$$\gamma_s = f(\gamma_d, n) = \frac{\gamma_d}{1-n}$$

### Solution :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

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

$$\gamma_s = \frac{\gamma_d * V}{V_s}$$

$$V_s = V - V_v$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma_d * V}{V - V_v} = \frac{\gamma_d}{\frac{V - V_v}{V}} = \frac{\gamma_d}{(1 - \frac{V_v}{V})}$$

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Et finalement, l'expression du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) et la porosité ( $n$ ) s'écrit comme suit :

$$\gamma_s = f(\gamma_d, n) = \frac{\gamma_d}{1-n}$$

### Exercice 23

Etablir l'expression du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w \gamma_d \cdot S_r}{\gamma_w \cdot S_r - \omega \cdot \gamma_d}$$

**Solution :**

$$\gamma_s = \frac{w_s}{v_s} = \frac{w_s}{v - v_v} = \frac{w_s}{\frac{w_s}{\gamma_d} - \frac{v_w}{S_r}} = \frac{w_s \cdot \gamma_d \cdot S_r}{w_s \cdot S_r - v_w \cdot \gamma_d} = \frac{\gamma_d \cdot S_r}{\frac{w_s}{w_s} \cdot S_r - \frac{w_w \cdot \gamma_d}{\gamma_w \cdot w_s}}$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma_d \cdot S_r}{S_r - \frac{\omega \cdot \gamma_d}{\gamma_w}} = \frac{\gamma_d \cdot S_r}{\gamma_w \cdot S_r - \omega \cdot \gamma_d}$$

D'où, l'expression du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) se présente sous la forme suivante :

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w \gamma_d \cdot S_r}{\gamma_w \cdot S_r - \omega \cdot \gamma_d}$$

**Exercice 24**

Etablir l'expression du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w \gamma_d}{\gamma_w - \omega_{sat} \cdot \gamma_d}$$

**Solution :**

$$\gamma_s = \frac{w_s}{v_s} = \frac{w_s}{v - v_v} = \frac{w_s}{\frac{w_s}{\gamma_d} - \frac{v_w}{S_r}} = \frac{w_s \cdot \gamma_d \cdot S_r}{w_s \cdot S_r - v_w \cdot \gamma_d} = \frac{\gamma_d \cdot S_r}{\frac{w_s}{w_s} \cdot S_r - \frac{w_w \cdot \gamma_d}{\gamma_w \cdot w_s}}$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma_d \cdot S_r}{S_r - \frac{\omega \cdot \gamma_d}{\gamma_w}} = \frac{\gamma_d \cdot S_r}{\gamma_w \cdot S_r - \omega \cdot \gamma_d} = \frac{\gamma_w \gamma_d \cdot S_r}{\gamma_w \cdot S_r - \omega \cdot \gamma_d}$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$  , et l'expression du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit sous la forme suivante :

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w \gamma_d}{\gamma_w - \omega_{sat} \cdot \gamma_d}$$

### 2.6.4 Poids volumique saturé : $\gamma_{sat}$

#### Exercice 25

Etablir l'expression du poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la porosité ( $n$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_{sat} = f(\gamma_d, n, \gamma_w) = \gamma_d + n \gamma_w$$

#### Solution :

$$\gamma_h = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

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

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Rightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_d V + \gamma_w V_w}{V} = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{V}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{V_v}{n}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{\frac{V_v}{n}}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + n S_r \gamma_w$$

et à saturation, on aura  $S_r = 1$ , et  $\gamma_h = \gamma_{sat}$

D'où l'expression du poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la porosité ( $n$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) prend la forme qui suit :

$$\gamma_{sat} = f(\gamma_d, n, \gamma_w) = \gamma_d + n \gamma_w$$

### **Exercice 26**

Etablir l'expression du poids volumique ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_{sat} = f(n, \gamma_s, \gamma_w) = (1 - n)\gamma_s + n * \gamma_w$$

### **Solution :**

$$\gamma_h = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad \Rightarrow \quad W_s = \gamma_d V ;$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Rightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_d V + \gamma_w V_w}{V} = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{V}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{V_v}{n}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{\frac{V_v}{n}}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + n S_r \gamma_w$$

Mais le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) peut prendre la forme suivante :

$\gamma_d = (1 - n)\gamma_s$  , et cela en suivant les étapes qui suivent :

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

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \implies W_s = \gamma_s * V_s$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s V_s}{V}$$

$$V = V_v + V_s \implies V_s = V - V_v$$

$$\gamma_d = \frac{(V - V_v)\gamma_s}{V} = \left(\frac{V}{V} - \frac{V_v}{V}\right)\gamma_s$$

et sachant que :  $n = \frac{V_v}{V}$ , l'expression de  $\gamma_d$  prend la forme qui suit :

$$\gamma_d = (1 - n)\gamma_s$$

Et on aura finalement l'expression du poids volumique ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) qui s'écrit :

$$\gamma_{sat} = f(n, \gamma_s, \gamma_w) = (1 - n)\gamma_s + n * \gamma_w$$

### Exercice 27

Etablir l'expression suivante qui donne le poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) :

$$\gamma_{sat} = (1 + \omega_{sat})\gamma_d$$

### Solution :

Le poids volumique humide est donné par l'expression suivante :  $\gamma_h = \frac{W}{V}$

$$W = W_w + W_s$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + W_w}{V}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \implies W_w = \omega W_s$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + \omega W_s}{V}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \implies W_s = \gamma_s * V_s$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s * V_s + \omega(\gamma_s * V_s)}{V} = \frac{(1+\omega)\gamma_s V_s}{V}$$

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

$$\gamma_h = \frac{(1+\omega)\gamma_s V_s}{\frac{W_s}{\gamma_d}}$$

et comme :  $W_s = \gamma_s * V_s$ , l'expression de  $\gamma_h$  s'écrit :

$$\gamma_h = (1 + \omega)\gamma_d$$

A saturation, on aura :  $\gamma_h = \gamma_{sat}$  et  $\omega = \omega_{sat}$

Et donc, l'expression qui exprime le poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) s'écrit comme suit :

$$\gamma_{sat} = (1 + \omega_{sat})\gamma_d$$

### **Exercice 28**

Etablir l'expression du poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_{sat} = f(\gamma_d, e, \gamma_w) = \gamma_d + \frac{e}{1+e} \gamma_w$$

### **Solution :**

$$\gamma_h = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

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

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \implies W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_d V + \gamma_w * V_w}{V} = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{V} = \gamma_d + \frac{\frac{V_w}{V_p}}{\frac{V_s + V_p}{V_p}} \gamma_w$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + \frac{S_r}{1+e} \gamma_w = \gamma_d + \frac{S_r}{\frac{1+e}{e}} \gamma_w = \gamma_d + \frac{e S_r}{1+e} \gamma_w$$

à saturation, on aura  $S_r = 1$ , et  $\gamma_h = \gamma_{sat}$ , et donc l'expression du poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit sous la forme suivante :

$$\gamma_{sat} = f(\gamma_d, e, \gamma_w) = \gamma_d + \frac{e}{1+e} \gamma_w$$

### **Exercice 29**

Etablir l'expression du poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_{sat} = f(\gamma_d, \gamma_s, \gamma_w) = \gamma_d + \left( \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s} \right) \gamma_w$$

### **Solution :**

$$\gamma_h = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad \Rightarrow \quad W_s = \gamma_d V ;$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Rightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_d V + \gamma_w V_w}{V} = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{V}$$

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{V_v}{n}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{\frac{V_v}{n}}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + n S_r \gamma_w = \gamma_d + \frac{V_v}{V} S_r \gamma_w = \gamma_d + \left(\frac{V-V_s}{V}\right) S_r \gamma_w$$

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

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Rightarrow \quad V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

$$\gamma_h = \gamma_d + \frac{\frac{W_s}{\gamma_d} - \frac{W_s}{\gamma_s}}{\frac{W_s}{\gamma_d}} S_r \gamma_w = \gamma_d + \frac{W_s \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s}\right)}{\frac{W_s}{\gamma_d}} S_r \gamma_w$$

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

A saturation, ( $S_r = 1$ ), on aura :  $\gamma_h = \gamma_{sat}$  , et dans ce cas l'expression du poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_{sat} = f(\gamma_d, \gamma_s, \gamma_w) = \gamma_d + \left(\frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s}\right) \gamma_w$$

### **Exercice 30**

Etablir l'expression du poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_{sat} = f(\gamma_s, \omega_{sat}, \gamma_w) = \frac{\gamma_s (1 + \omega_{sat})}{1 + \omega_{sat} \frac{\gamma_s}{\gamma_w}}$$

### **Solution :**

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

$$W = W_s + W_w$$

$$V = V_s + V_v$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad W_s = \gamma_s V_s \quad \text{et} \quad V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad \Longrightarrow \quad W_w = \omega W_s = \omega \gamma_s V_s$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad \Longrightarrow \quad V_v = \frac{V_w}{S_r}$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s V_s + \omega \gamma_s V_s}{\frac{W_s + V_w}{\gamma_s + S_r}} = \frac{\gamma_s V_s (1 + \omega)}{\frac{W_s + V_w}{\gamma_s + S_r}}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Longrightarrow \quad V_w = \frac{W_w}{\gamma_w}$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s V_s (1 + \omega)}{\frac{W_s + \frac{W_w}{\gamma_w}}{\gamma_s + S_r}} = \frac{\gamma_s V_s (1 + \omega)}{\frac{W_s S_r \gamma_w + \frac{W_w \gamma_s}{S_r}}{\gamma_s S_r \gamma_w + W_w \gamma_s}} = \frac{\gamma_s V_s (1 + \omega)}{\frac{W_s S_r \gamma_w + W_w \gamma_s}{\gamma_s S_r \gamma_w}}$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{\frac{W_s S_r \gamma_w + W_w \gamma_s}{V_s \gamma_s S_r \gamma_w}}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad \gamma_s V_s = W_s$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{\frac{W_s S_r \gamma_w + W_w \gamma_s}{W_s S_r \gamma_w}} = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{1 + \frac{W_w \gamma_s}{W_s S_r \gamma_w}}$$

$$\frac{W_w}{W_s} = \omega$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s (1 + \omega)}{1 + \frac{\omega \gamma_s}{S_r \gamma_w}}$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\gamma_h = \gamma_{sat}$  et  $\omega = \omega_{sat}$  , et donc, l'expression du poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) prend la forme suivante :

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s (1 + \omega_{sat})}{1 + \omega_{sat} \frac{\gamma_s}{\gamma_w}}$$

### **Exercice 31**

Etablir l'expression du poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\gamma_{sat} = f(\gamma_s, \omega_{sat}, \gamma_w) = \frac{\gamma_s + e \gamma_w}{1 + e}$$

### **Solution :**

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

$$W = W_s + W_w$$

$$V = V_s + V_v$$

$$\gamma_h = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad W_s = \gamma_s V_s$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Longrightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s V_s + \gamma_w V_w}{V_s + V_v}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad \Longrightarrow \quad V_w = S_r V_v$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s V_s + \gamma_w S_r V_v}{V_s + V_v}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par  $V_s$ , on obtient :

$$\gamma_h = \frac{\frac{\gamma_s V_s}{V_s} + \frac{\gamma_w V_v}{V_s} \gamma_w S_r V_v}{\frac{V_s + V_v}{V_s}}$$

et comme :  $e = \frac{V_v}{V_s}$  on obtient :

$$\gamma_h = \frac{\gamma_s + e S_r \gamma_w}{1 + e}$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\gamma_h = \gamma_{sat}$ , d'où l'expression du poids volumique saturé ( $\gamma_{sat}$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit comme suit :

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e \gamma_w}{1 + e}$$

### 2.6.5 Teneur en eau : $w$

#### Exercice 32

Ecrire l'expression de la teneur en eau ( $\omega$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) et le degré de saturation :

$$\omega = f(n, \gamma_d, \gamma_w, S_r) = \frac{n \cdot S_r \cdot \gamma_w}{\gamma_d}$$

#### Solution :

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \implies W_w = \gamma_w * V_w$$

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

$$\omega = \frac{\gamma_w * V_w}{\gamma_d V}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par  $V_v$ , on obtient :

$$\omega = \frac{\gamma_w * \frac{V_w}{V_v}}{\gamma_d \frac{V}{V_v}} = \frac{\gamma_w * S_r}{\gamma_d * \frac{1}{n}} = \frac{n * S_r \gamma_w}{\gamma_d}$$

D'où l'expression de la teneur en eau ( $\omega$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) et le degré de saturation se présente sous la forme suivante :

$$\omega = f(n, \gamma_d, \gamma_w, S_r) = \frac{n \cdot S_r \gamma_w}{\gamma_d}$$

### **Exercice 33**

Etablir l'expression de la teneur en eau ( $\omega$ ) en fonction de l'indice des vides ( $e$ ), le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\omega = f(S_r, e, \gamma_s, \gamma_w) = \frac{S_r \cdot \gamma_w \cdot e}{\gamma_s}$$

### **Solution :**

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Longrightarrow \quad W_w = \gamma_w \cdot V_w$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad W_s = \gamma_s \cdot V_s$$

$$\omega = \frac{\gamma_w \cdot V_w}{\gamma_s \cdot V_s}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad \Longrightarrow \quad V_w = S_r \cdot V_v$$

$$\omega = \frac{S_r \cdot V_v \cdot \gamma_w}{V_s \cdot \gamma_s}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par  $V_s$ , on obtient :

$$\omega = \frac{S_r \cdot \gamma_w \cdot \frac{V_v}{V_s}}{\gamma_s \cdot \frac{V_s}{V_s}}$$

$$\frac{V_v}{V_s} = e$$

$$\omega = \frac{S_r \cdot \gamma_w \cdot e}{\gamma_s}$$

### **Exercice 34**

Ecrire l'expression de la teneur en eau ( $\omega$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), le poids volumique sec

( $\gamma_d$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\omega = f(n, S_r, \gamma_d, \gamma_w) = \frac{n \cdot S_r \cdot \gamma_w}{\gamma_d}$$

**Solution :**

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \implies W_w = \gamma_w * V_w$$

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

$$\omega = \frac{\gamma_w * V_w}{\gamma_d V}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par  $V_v$ , on obtient :

$$\omega = \frac{\gamma_w * \frac{V_w}{V_v}}{\gamma_d \frac{V}{V_v}} = \frac{\gamma_w * S_r}{\gamma_d * \frac{1}{n}} = \frac{n \cdot S_r \cdot \gamma_w}{\gamma_d}$$

$$\omega = f(n, \gamma_d, \gamma_w, S_r) = \frac{n \cdot S_r \cdot \gamma_w}{\gamma_d}$$

**Exercice 35**

Etablir l'expression de la teneur en eau ( $\omega$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la porosité ( $n$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\omega = \frac{n \gamma_w S_r}{\gamma_s (1 - n)}$$

**Solution :**

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{v_w \gamma_w}{v_s \gamma_s} = \frac{S_r v_v \gamma_w}{\gamma_s (v - v_v)} = \frac{n v \gamma_w S_r}{v \gamma_s \left(1 - \frac{v_v}{v}\right)} = \frac{n \gamma_w S_r}{\gamma_s \left(1 - \frac{v_v}{v}\right)}$$

$$\frac{v_v}{v} = n$$

D'où l'expression de la teneur en eau ( $\omega$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ),

la porosité ( $n$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit comme suit :

$$\omega = \frac{n\gamma_w S_r}{\gamma_s(1 - n)}$$

### **Exercice 36**

Démontrer l'expression de la teneur en eau ( $\omega$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\omega = S_r \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)$$

### **Solution :**

$$\omega = \frac{w_w}{w_s} = \frac{\gamma_w \cdot v_w}{\gamma_d \cdot v} = \frac{\gamma_w \cdot S_r \cdot v_v}{\gamma_d \cdot v} = S_r \frac{\gamma_w \cdot v_v}{\gamma_d \cdot v} = S_r \frac{\gamma_w \cdot (v - v_s)}{\gamma_d \cdot v}$$

$$\omega = S_r \left( \frac{\gamma_w \cdot v}{\gamma_d \cdot v} - \frac{\gamma_w \cdot v_s}{\gamma_d \cdot v} \right) = S_r \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w \cdot w_s}{\gamma_d \gamma_s \cdot \frac{w_s}{\gamma_d}} \right)$$

Finalement, l'expression de la teneur en eau ( $\omega$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit comme suit :

$$\omega = S_r \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)$$

### **Exercice 37**

Donner l'expression de la teneur en eau ( $\omega$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), l'indice des vides ( $e$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\omega = \frac{S_r \gamma_w e}{\gamma_d (1 + e)}$$

### **Solution :**

$$\omega = \frac{w_w}{w_s} = \frac{\gamma_w \cdot v_w}{\gamma_d \cdot v} = \frac{\gamma_w \cdot S_r \cdot v_v}{\gamma_d \cdot v} = \frac{S_r \gamma_w \cdot v_v}{\gamma_d (v_s + v_v)}$$

$$\omega = \frac{S_r \gamma_w \cdot e \cdot v_s}{\gamma_d (v_s + v_v)} = \frac{S_r \gamma_w e}{\gamma_d \left( \frac{v_s}{v_s} + \frac{v_v}{v_s} \right)}$$

Finalement, l'expression de la teneur en eau ( $\omega$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), l'indice des vides ( $e$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) se présente sous la forme suivante :

$$\omega = \frac{S_r \gamma_w e}{\gamma_d (1 + e)}$$

### 2.6.6 Porosité : $n$

#### Exercice 38

Etablir l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction de l'indice des vides ( $e$ ) :

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

#### Solution :

$$n = \frac{v_v}{v} = \frac{v_v}{v_s + v_v} = \frac{e v_s}{v_s \left( 1 + \frac{v_v}{v_s} \right)} = \frac{e}{\left( 1 + \frac{v_v}{v_s} \right)}$$

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

D'où la porosité ( $n$ ) en fonction de l'indice des vides ( $e$ ) s'écrit comme suit :

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

#### Exercice 39

Etablir l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) et le poids volumique sec ( $\gamma_d$ )

$$n = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s}$$

**Solution :**

$$n = \frac{v_v}{v} = \frac{v_v}{\frac{W_s}{\gamma_d}} = \frac{v_v \gamma_d}{W_s} = \frac{(v - v_s) \gamma_d}{W_s} = \frac{\left(\frac{W_s}{\gamma_d} - v_s\right) \gamma_d}{W_s}$$

$$n = \frac{W_s - v_s \gamma_d}{\gamma_s v_s} = \frac{v_s \gamma_s - v_s \gamma_d}{\gamma_s v_s} = \frac{v_s (\gamma_s - \gamma_d)}{v_s \gamma_s}$$

Finalement, l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) et le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) prend la forme suivante :

$$n = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s}$$

**Exercice 40**

Etablir l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ), le degré de saturation ( $s_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$n = \frac{1}{\left(1 + \frac{s_r \gamma_w}{\gamma_s \omega}\right)}$$

**Solution :**

$$n = \frac{v_v}{v} = \frac{v_v}{v_v + v_s} = \frac{v_v}{v_v \left(1 + \frac{v_s}{v_v}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{v_s}{v_v}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{s_r W_s}{\gamma_s v_w}\right)}$$

$$n = \frac{1}{\left(1 + \frac{s_r W_w}{\omega \gamma_s v_w}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{s_r \gamma_w v_w}{\omega \gamma_s v_w}\right)}$$

D'où l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ), le degré de saturation ( $s_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) se présente comme suit :

$$n = \frac{1}{\left(1 + \frac{s_r \gamma_w}{\gamma_s \omega}\right)}$$

### Exercice 41

Etablir l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$n = \frac{1}{\left(1 + \frac{\gamma_w}{\gamma_s \omega_{sat}}\right)}$$

### Solution :

$$n = \frac{v_v}{v} = \frac{v_v}{v_v + v_s} = \frac{v_v}{v_v \left(1 + \frac{v_s}{v_v}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{v_s}{v_v}\right)}$$

$$n = \frac{1}{\left(1 + \frac{S_r W_s}{\gamma_s v_w}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{S_r W_w}{\omega \gamma_s v_w}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{S_r \gamma_w v_w}{\omega \gamma_s v_w}\right)}$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$  , et l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit sous la forme suivante :

$$n = \frac{1}{\left(1 + \frac{\gamma_w}{\gamma_s \omega_{sat}}\right)}$$

### Exercice 42

Etablir l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ), le degré de saturation ( $s_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$n = \frac{\omega \gamma_d}{\gamma_w s_r}$$

### Solution :

$$n = \frac{v_v}{v} = \frac{\frac{v_w}{s_r}}{\frac{W_s}{\gamma_d}} = \frac{v_w \gamma_d}{W_s s_r} = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w} \gamma_d}{\frac{W_w}{\omega} s_r} = \frac{W_w \gamma_d \omega}{W_w \gamma_w s_r}$$

Finalement, l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction du poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ), le poids

volumique sec ( $\gamma_d$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ) et le degré de saturation ( $S_r$ ) prend la forme suivante :

$$n = \frac{\omega \gamma_d}{\gamma_w S_r}$$

### **Exercice 43**

Etablir l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$n = \frac{\omega_{sat} \gamma_d}{\gamma_w}$$

### **Solution :**

$$n = \frac{v_v}{v} = \frac{\frac{v_w}{S_r}}{\frac{W_s}{\gamma_d}} = \frac{v_w \gamma_d}{W_s S_r} = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w} \gamma_d}{\frac{W_w}{\omega} S_r} = \frac{W_w \gamma_d \omega}{W_w \gamma_w S_r} = \frac{\gamma_d \omega}{\gamma_w S_r}$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$  , et l'expression de la porosité ( $n$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) prend la forme suivante :

$$n = \frac{\omega_{sat} \gamma_d}{\gamma_w}$$

### **2.6.7 Indice des vides : $e$**

### **Exercice 44**

Etablir l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ) :

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

### **Solution :**

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

$e =$

En divisant le numérateur et le dénominateur par  $v$  , on obtient :

$$e = \frac{\frac{v_v}{v}}{\frac{v}{v} - \frac{v_v}{v}}$$

$$\frac{v_v}{v} = n$$

D'où l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ) s'écrit sous la forme suivante :

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

### **Exercice 45**

Etablir l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_w \cdot S_r} \omega$$

### **Solution :**

$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{v_v}{\frac{w_s}{\gamma_s}} = \frac{v_v \cdot \gamma_s}{w_s} = \frac{\gamma_s \cdot v_w}{w_s \cdot S_r} = \frac{\gamma_s \cdot w_w}{\gamma_w \cdot w_s \cdot S_r}$$

$$\frac{w_w}{w_s} = \omega$$

D'où l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit comme suit :

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_w \cdot S_r} \omega$$

### **Exercice 46**

Ecrire l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \cdot \omega_{sat}$$

**Solution :**

$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{\frac{v_v}{w_s}}{\frac{w_s}{\gamma_s}} = \frac{v_v \cdot \gamma_s}{w_s} = \frac{\gamma_s \cdot S_r \cdot v_w}{w_s} = \frac{\gamma_s \cdot S_r \cdot w_w}{\gamma_w \cdot w_s}$$

$$\frac{w_w}{w_s} = \omega$$

$$e = \frac{\gamma_s \cdot S_r}{\gamma_w} \omega$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$  , et l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \cdot \omega_{sat}$$

**Exercice 47**

Démontrer l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) et le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) :

$$e = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}$$

**Solution :**

$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{\frac{v - v_s}{\frac{w_s}{\gamma_s}}}{\frac{w_s}{\gamma_s}} = \frac{\gamma_s(v - v_s)}{w_s} = \frac{v\gamma_s - \gamma_s v_s}{\gamma_d v} = \frac{v\gamma_s - \gamma_s \frac{w_s}{\gamma_s}}{\gamma_d v}$$

$$e = \frac{v\gamma_s - w_s}{\gamma_d v} = \frac{v\gamma_s - v\gamma_d}{\gamma_d v} = \frac{v(\gamma_s - \gamma_d)}{v\gamma_d}$$

Et finalement, l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) et le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) :

$$e = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}$$

### Exercice 48

Démontrer l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$e = \frac{\omega \gamma_d}{\gamma_w S_r - \omega \gamma_d}$$

### Solution :

$$\begin{aligned} e &= \frac{v_v}{v_s} = \frac{v_w}{S_r v_s} = \frac{W_w}{\gamma_w S_r v_s} = \frac{\omega W_s}{\gamma_w S_r v_s} = \frac{\omega v \gamma_d}{\gamma_w S_r v_s} = \frac{\omega \gamma_d v}{S_r \gamma_w (v - v_v)} \\ e &= \frac{\omega \gamma_d v}{v S_r \gamma_w \left(1 - \frac{v_v}{v}\right)} = \frac{\omega \gamma_d}{S_r \gamma_w \left(1 - \frac{\gamma_d v_w}{S_r W_s}\right)} = \frac{\omega \gamma_d}{S_r \gamma_w \left(1 - \frac{\omega \gamma_d v_w}{S_r W_w}\right)} \\ e &= \frac{\omega \gamma_d}{S_r \gamma_w \left(1 - \frac{\omega \gamma_d v_w}{v_w S_r \gamma_w}\right)} = \frac{\omega \gamma_d}{S_r \gamma_w \left(1 - \frac{\omega \gamma_d}{S_r \gamma_w}\right)} = \frac{\omega \gamma_d}{S_r \gamma_w - \frac{S_r \gamma_w \omega \gamma_d}{S_r \gamma_w}} \end{aligned}$$

Et finalement, l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ), le degré de saturation ( $S_r$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$e = \frac{\omega \gamma_d}{\gamma_w S_r - \omega \gamma_d}$$

### Exercice 49

Démontrer l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$e = \frac{\omega_{sat} \gamma_d}{\gamma_w - \omega_{sat} \gamma_d}$$

### Solution :

$$e = \frac{v_v}{v_s} = \frac{v_w}{S_r v_s} = \frac{W_w}{\gamma_w S_r v_s} = \frac{\omega W_s}{\gamma_w S_r v_s} = \frac{\omega v \gamma_d}{\gamma_w S_r v_s} = \frac{\omega \gamma_d v}{S_r \gamma_w (v - v_v)}$$

$$e = \frac{\omega \gamma_d v}{v s_r \gamma_w \left(1 - \frac{v_v}{v}\right)} = \frac{\omega \gamma_d}{s_r \gamma_w \left(1 - \frac{\gamma_d v_w}{s_r w_s}\right)} = \frac{\omega \gamma_d}{s_r \gamma_w \left(1 - \frac{\omega \gamma_d v_w}{s_r w_w}\right)}$$

$$e = \frac{\omega \gamma_d}{s_r \gamma_w \left(1 - \frac{\omega \gamma_d v_w}{v_w s_r \gamma_w}\right)} = \frac{\omega \gamma_d}{s_r \gamma_w \left(1 - \frac{\omega \gamma_d}{s_r \gamma_w}\right)} = \frac{\omega \gamma_d}{s_r \gamma_w - \frac{s_r \gamma_w \omega \gamma_d}{s_r \gamma_w}}$$

$$e = \frac{\omega \gamma_d}{\gamma_w s_r - \omega \gamma_d}$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$  , et l'expression de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$e = \frac{\omega_{sat} \gamma_d}{\gamma_w - \omega_{sat} \gamma_d}$$

### 2.6.8 Degré de saturation : $S_r$

#### Exercice 50

Etablir l'expression du degré de saturation ( $S_r$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$S_r = f(\gamma_s, \omega, e, \gamma_w) = \frac{\omega \gamma_s}{e \gamma_w}$$

#### Solution :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Rightarrow \quad V_w = \frac{W_w}{\gamma_w}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \Rightarrow \quad V_v = e V_s$$

$$S_r = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w}}{e V_s}$$

$$S_r = \frac{W_w}{e V_s \gamma_w}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad \Rightarrow \quad W_w = \omega W_s$$

$$S_r = \frac{\omega W_s}{e V_s \gamma_w}, \text{ mais :}$$

$$\frac{W_s}{V_s} = \gamma_s$$

Donc, l'expression du degré de saturation ( $S_r$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la teneur en eau ( $\omega$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$S_r = f(\gamma_s, \omega, e, \gamma_w) = \frac{\omega \gamma_s}{e \gamma_w}$$

### Exercice 51

Etablir l'expression du degré de saturation ( $S_r$ ) en fonction de la teneur en eau ( $\omega$ ), du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$S_r = f(\omega, \gamma_s, \gamma_d, \gamma_w) = \frac{\omega \gamma_s \gamma_d}{(\gamma_s - \gamma_d) \gamma_w}$$

### Solution :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Rightarrow \quad V_w = \frac{W_w}{\gamma_w}$$

$$V = V_v + V_s \quad \Rightarrow \quad V_v = V - V_s$$

$$S_r = \frac{W_w}{(V - V_s) \gamma_w}$$

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad \Rightarrow \quad W_w = \omega W_s$$

$$W_s = \gamma_s * V_s \quad \Rightarrow \quad V_s = \frac{W_s}{\gamma_s}$$

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

$$S_r = \frac{\omega W_s}{\left(\frac{W_s}{\gamma_d} - \frac{W_s}{\gamma_s}\right)\gamma_w} = \frac{\omega W_s}{\left(\frac{W_s \gamma_s - W_s \gamma_d}{\gamma_d}\right)\gamma_w} = \frac{\omega W_s}{W_s \left(\frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}\right)\gamma_w}$$

Et finalement, l'expression du degré de saturation ( $S_r$ ) en fonction de la teneur en eau ( $\omega$ ), du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit sous la forme suivante :

$$S_r = f(\omega, \gamma_s, \gamma_d, \gamma_w) = \frac{\omega \gamma_s \gamma_d}{(\gamma_s - \gamma_d) \gamma_w}$$

### 2.6.9 Teneur en eau à saturation : $\omega_{sat}$

#### Exercice 52

Ecrire l'expression de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\omega_{sat} = f(n, \gamma_d, \gamma_w) = \frac{n \gamma_w}{\gamma_d}$$

#### Solution :

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Rightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

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

$$\omega = \frac{\gamma_w * V_w}{\gamma_d V}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par  $V_v$ , on obtient :

$$\omega = \frac{\gamma_w * \frac{V_w}{V_v}}{\gamma_d \frac{V}{V_v}} = \frac{\gamma_w * S_r}{\gamma_d * \frac{1}{n}} = \frac{n * S_r \gamma_w}{\gamma_d}$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$  , d'où l'expression de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) se présente sous la forme suivante :

$$\omega_{sat} = f(n, \gamma_d, \gamma_w) = \frac{n \gamma_w}{\gamma_d}$$

### **Exercice 53**

Donner l'expression de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) en fonction de l'indice des vides ( $e$ ), le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\omega_{sat} = f(e, \gamma_s, \gamma_w) = \frac{\gamma_w e}{\gamma_s}$$

### **Solution :**

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad \Longrightarrow \quad W_w = \gamma_w * V_w$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad \Longrightarrow \quad W_s = \gamma_s * V_s$$

$$\omega = \frac{\gamma_w * V_w}{\gamma_s * V_s}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad \Longrightarrow \quad V_w = S_r * V_v$$

$$\omega = \frac{S_r V_v \gamma_w}{V_s \gamma_s}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par  $V_s$  , on obtient :

$$\omega = \frac{S_r * \gamma_w * \frac{V_v}{V_s}}{\gamma_s \frac{V_s}{V_s}}$$

$$\frac{V_v}{V_s} = e$$

$$\omega = \frac{S_r * \gamma_w * e}{\gamma_s}$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$  , d'où l'expression de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) en fonction de l'indice des vides ( $e$ ), le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit de la façon suivante :

$$\omega_{sat} = f(e, \gamma_s, \gamma_w) = \frac{\gamma_w e}{\gamma_s}$$

### **Exercice 54**

Ecrire l'expression de la teneur en eau ( $\omega_{sat}$ ) en fonction de la porosité ( $n$ ), le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\omega_{sat} = f(n, \gamma_d, \gamma_w) = \frac{n * \gamma_w}{\gamma_d}$$

### **Solution :**

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \implies W_w = \gamma_w * V_w$$

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

$$\omega = \frac{\gamma_w * V_w}{\gamma_d V}$$

En divisant le numérateur et le dénominateur par  $V_v$  , on obtient :

$$\omega = \frac{\gamma_w * \frac{V_w}{V_v}}{\gamma_d \frac{V}{V_v}} = \frac{\gamma_w * S_r}{\gamma_d * \frac{1}{n}}$$

$$\omega_{sat} = f(n, \gamma_d, \gamma_w) = \frac{n * \gamma_w}{\gamma_d}$$

### Exercice 55

Etablir l'expression de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la porosité ( $n$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\omega_{sat} = \frac{n\gamma_w}{\gamma_s(1-n)}$$

### Solution :

$$\omega = \frac{w_w}{w_s} = \frac{v_w\gamma_w}{v_s\gamma_s} = \frac{S_r v_v \gamma_w}{\gamma_s(v - v_v)} = \frac{nv\gamma_w S_r}{v\gamma_s \left(1 - \frac{v_v}{v}\right)} = \frac{n\gamma_w S_r}{\gamma_s \left(1 - \frac{v_v}{v}\right)}$$

$$\omega = \frac{n\gamma_w S_r}{\gamma_s(1-n)}$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$ , d'où l'expression de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) en fonction du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), la porosité ( $n$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) prend la forme suivante :

$$\omega_{sat} = \frac{n\gamma_w}{\gamma_s(1-n)}$$

### Exercice 56

Démontrer l'expression de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) :

$$\omega_{sat} = \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$$

### Solution :

$$\omega = \frac{w_w}{w_s} = \frac{\gamma_w \cdot v_w}{\gamma_d \cdot v} = \frac{\gamma_w \cdot S_r \cdot v_v}{\gamma_d \cdot v} = S_r \frac{\gamma_w \cdot v_v}{\gamma_d \cdot v} = S_r \frac{\gamma_w \cdot (v - v_s)}{\gamma_d \cdot v}$$

$$\omega = S_r \left( \frac{\gamma_w \cdot v}{\gamma_d \cdot v} - \frac{\gamma_w \cdot v_s}{\gamma_d \cdot v} \right) = S_r \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w \cdot w_s}{\gamma_d \gamma_s \cdot \frac{w_s}{\gamma_d}} \right) = S_r \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$ , et l'expression la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), du poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ) et le poids

volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) prend la forme suivante:

$$\omega_{sat} = \frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$$

### **Exercice 57**

Démontrer l'expression de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ):

$$\omega_{sat} = \frac{\gamma_w e}{\gamma_d (1 + e)}$$

### **Solution :**

$$\omega = \frac{w_w}{w_s} = \frac{\gamma_w \cdot v_w}{\gamma_d \cdot v} = \frac{\gamma_w \cdot S_r \cdot v_v}{\gamma_d \cdot v} = \frac{S_r \gamma_w \cdot v_v}{\gamma_d (v_s + v_v)} = \frac{S_r \gamma_w \cdot e \cdot v_s}{\gamma_d (v_s + v_v)} = \frac{S_r \gamma_w e}{\gamma_d \left( \frac{v_s}{v_s} + \frac{v_v}{v_s} \right)} = \frac{S_r \gamma_w e}{\gamma_d (1 + e)}$$

A saturation, on aura :  $S_r = 1$  ;  $\omega = \omega_{sat}$ , et l'expression de la teneur en eau à saturation ( $\omega_{sat}$ ) en fonction du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ), l'indice des vides ( $e$ ) et le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w$ ) s'écrit de la façon suivante :

$$\omega_{sat} = \frac{\gamma_w e}{\gamma_d (1 + e)}$$

## Chapitre 3. Compactage des sols

### 3.1 Théorie de compactage

#### 3.2 Essais de compactage en laboratoire (essais Proctor et CBR)

#### 3.3 Matériel et procédés spéciaux de compactage in-situ

#### 3.4 Prescriptions et contrôle du compactage

## 3.1 Théorie de compactage

### 3.1.1 Introduction

Les sols et les matériaux routiers sont constitués de solides (grains de sol, granulats, sable...), de liquide (eau, bitume, émulsion...) et d'air (emprisonné entre solides et liquides).

L'action du compactage se traduit par un rapprochement des grains du sol entre eux (tassement **T**) et une expulsion d'air, et donc on constate une diminution du volume **V**, le poids des solides **P** restant identique, la masse volumique apparente  $\rho = P/V$  augmente

### 3.1.2 Objectifs du compactage

Trois objectifs principaux sont poursuivis lors de la réalisation des travaux routiers de terrassements, de couches de forme, d'assises de chaussées et de couches de roulement. Le tableau 3.1 résume les objectifs envisagés par les opérations de compactage.

*Tab. 3.1 : Objectifs du compactage*

<b>Supprimer les déformations ultérieures</b>	<b>Augmenter les caractéristiques mécaniques</b>	<b>Assurer l'imperméabilité</b>
Tassements du remblai Tassements différentiels Déformations de chaussées Orniéage de couche de surface	Augmenter la portance et la traficabilité des couches de forme ou de remblai. Augmenter le module des assises non traitées. Augmenter la résistance des assises traitées et des couches de roulement. Permettre aux matériaux de résister au trafic routier	Le compactage est la première des protections contre l'agression de l'eau. Objectif important pour la couche de roulement, évitant les désordres sur les couches inférieures

Il existe plusieurs méthodes pour améliorer les propriétés d'un sol en place, à savoir :

***α- Procédé chimique*** : Par malaxage ou injection de produits chimiques dans le sol tels que

ciment Portland, Chaux, Asphalte, Chlorure de Calcium ou de Sodium, résidus de pâtes et papiers.

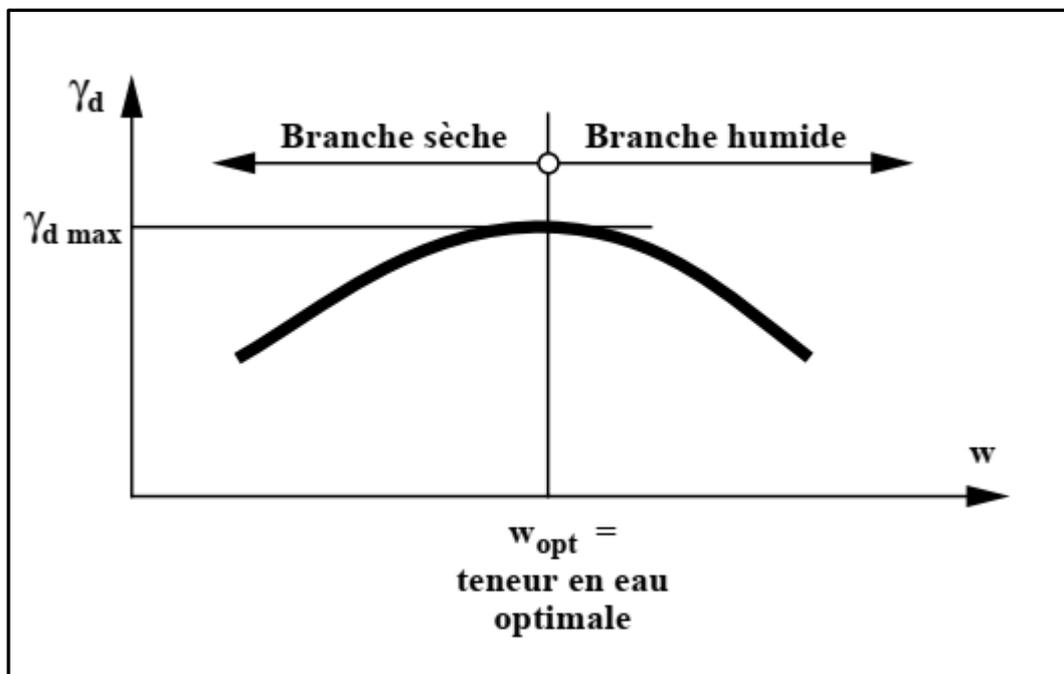
**b- Procédé mécanique :** Se résolu principalement au compactage et densification.

**c- Autres procédés :** Par rabattement de nappe pour réduire les pressions interstitielles, ou pré charge et chargement temporaire pour réduire les tassements.

### 3.1.3 Théorie de Proctor

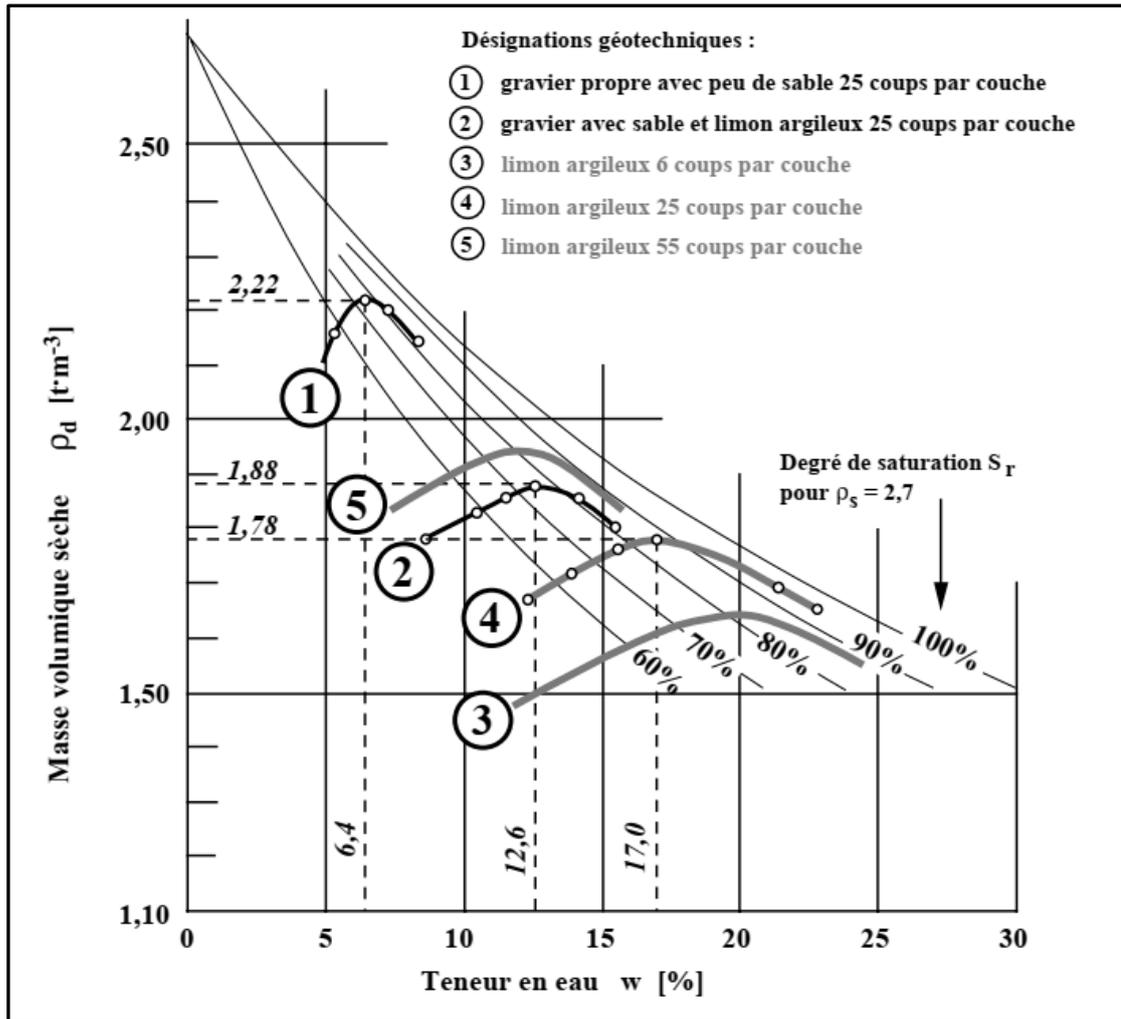
Proctor a montré que le compactage est fonction de quatre paramètres : la masse volumique du sol sec, la teneur en eau, énergie de compactage et type de sol (granulométrie, minéralogie,...).

Lorsque la teneur en eau est élevée, l'eau absorbe une importante partie de l'énergie de compactage sans aucun profit, par contre lorsque la teneur en eau est faible, l'eau a un rôle lubrifiant important, et la densité sèche augmente avec la teneur en eau (Fig. 3.1).



*Fig. 3.1 : Courbe de compactage*

Les courbes de compactage varient avec la nature du sol (Fig. 3.2). Elles sont très aplaties pour les sables qui leur compactage est donc peu influencé par la teneur en eau. Les matériaux de ce genre constituent les meilleurs remblais. Lorsque l'énergie de compactage augmente, le poids volumique optimal s'accroît et la teneur en eau optimale diminue (Fig. 3.3).



*Fig. 3.2 : Influence du type de sol sur la forme de la courbe de compactage*

Les courbes de compactage admettent pour enveloppe une courbe appelée courbe de saturation, qui correspond à l'état saturé du sol (Fig.3.4).

L'équation de cette courbe en fonction de  $S_r$  est:

$$\gamma_d = \frac{S_r \gamma_s \gamma_w}{\gamma_s \omega + S_r \gamma_w} \quad , \text{ et avec } S_r = 1 \quad \text{on aura :} \quad \gamma_d = \frac{\gamma_s \gamma_w}{\gamma_s \omega + \gamma_w}$$

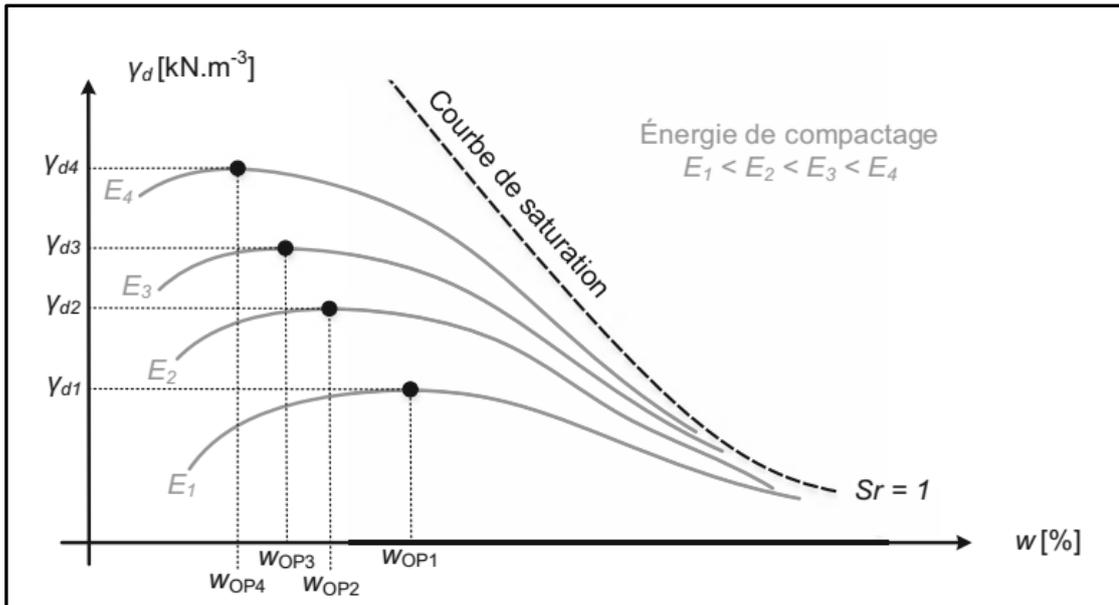


Fig. 3.3 : Influence de l'énergie de compactage

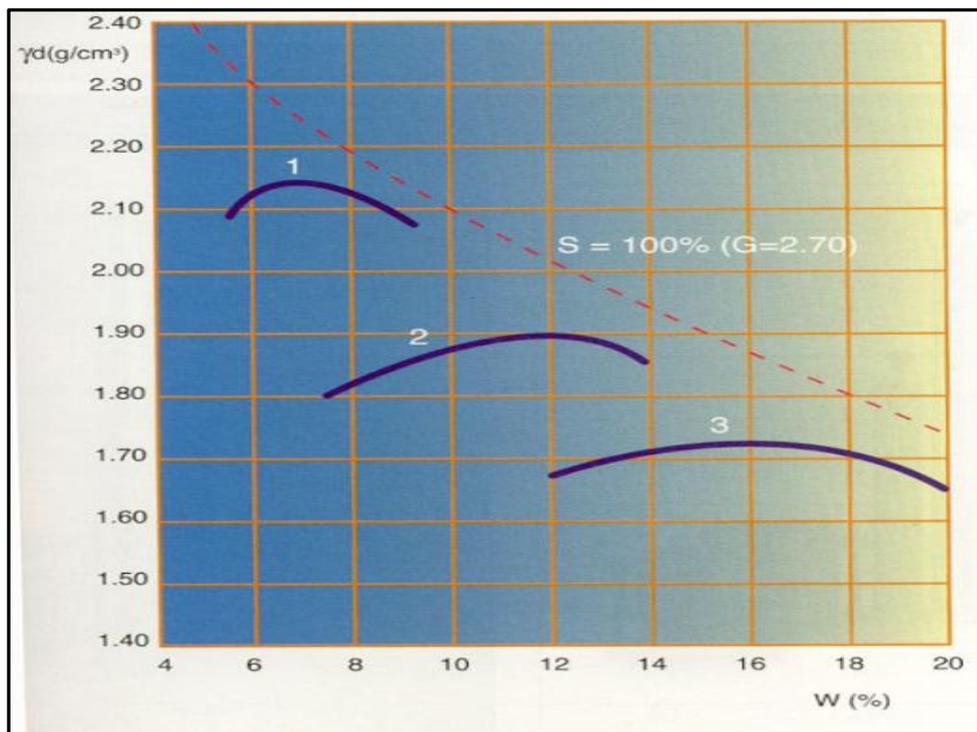


Fig. 3.4 : Courbe de saturation

### 3.2 Essais de compactage en laboratoire (essais Proctor et CBR)

#### 3.2.1 Optimum Proctor

L'essai Proctor permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un sol. Garantir un compactage suffisant permet, entre autres, d'assurer une bonne portance. Le poids volumique sec

$\gamma_d$  correspond au poids de squelette placé dans un certain volume. Il constitue donc un bon indicateur de la compacité. Pour un sol à granularité et à énergie de compactage fixé, le poids volumique sec  $\gamma_d$  atteint une valeur maximale pour une certaine valeur de teneur en eau : l'optimum Proctor  $\omega_{opt}$ .

### 3.2.2 Principe de la méthode

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

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

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

- Le moule Proctor :  $\phi_{\text{intérieur}} = 101,6 \text{ mm} / H = 117 \text{ mm}$  (sans rehausse), et le volume du moule Proctor sera :  $V_{\text{moule proctor}} = 948 \text{ cm}^3$

- Le moule CBR :  $\phi_{\text{moule intérieur}} = 152 \text{ mm} / H = 152 \text{ mm}$  (sans rehausse) dont disque d'espacement de 25,4 mm d'épaisseur, soit une hauteur Hutile = 126,6 mm (sans rehausse), et le volume du moule Proctor sera :  $V_{\text{moule CBR}} = 2\,296 \text{ cm}^3$

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

- L'essai PROCTOR NORMAL,

- L'essai PROCTOR MODIFIÉ.

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

Essai Proctor normal : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé,

Essai Proctor modifié : Forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière. Selon la norme NF EN 13286-2, les équivalences entre les résultats obtenus avec des appareillages nouveaux et/ou alternatifs sont fondées sur l'énergie spécifique donnée par l'équation :

$$E_s = mgH \frac{N}{V}$$

Où :

- $E_S$  (J/m<sup>3</sup>) : Énergie spécifique de compactage (N.m/m<sup>3</sup>)... c-à-d ... (Pa)
- $m$  (kg) : masse de la dame :
- $g$  (N/kg) : accélération de pesanteur
- $H$  (m) : hauteur de chute
- $N$  : nombre de coups (Nombre de coups par couche x nombre des couches).
- $V$  : volume du moule.

Le tableau 3.2 résume les conditions de chaque essai selon le moule retenu (NF P 94-093) :

**Tab.3.2 : Conditions des essais Proctor normal et Modifié**

Essai Proctor	Masse de la dame (Kg)	Hauteur de chute (Cm)	Nombre de coups par couche	Nombre de couches	Energie de compactage (Kj/m <sup>3</sup> )
Normale	2,490	30,50	25 (moule Proctor)	3	587
			55 (moule CBR)	3	533
Modifié	4,540	45,70	25 (moule Proctor)	5	2680
			55 (moule CBR)	5	2435

### 3.2.3 Matériel nécessaire

- Moule CBR (éventuellement Proctor)- Dame Proctor normal ou modifié - Règle à araser - Disque d'espacement - Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau - Tamis 5 et 20 mm (contrôle et écrêtage le cas échéant de l'échantillon) - Truelle, spatule, pinceau - Eprouvette graduée 150 ml environ - Petits récipients (mesures des teneurs en eau) - Balance portée 20 kg, précision ± 5 g -Balance de précision 200 g, précision ± 0,1 g - Etuve 105°C ± 5°C - Burette à huile.

### 3.2.4 Mode opératoire

**a/ Préparation des échantillons pour essais:**

**Quantités à prélever :** On prélèvera: 15 kg (Moule Proctor) ; 33 kg (C.B.R).

**Contrôle de l'échantillon pour la faisabilité de l'essai:**

- Si  $D \geq 20$  mm, il faut tamiser à 20 mm le sol et peser le refus: Si le refus est < 25%, l'essai doit être réalisé dans le moule CBR, mais sans intégrer le refus (échantillon écrêté à 20 mm),

- Si le refus est > 25%, l'essai PROCTOR ne doit pas être réalisé (compactage hasardeux).

### b/ Préparation du matériel

#### *Choix du moule :*

Il dépend de la grosseur  $D$  des gros grains du sol :

- Si  $D \leq 5$  mm (et seulement dans ce cas), le moule Proctor est autorisé, mais le moule CBR est conseillé,
- Si  $5 < D \leq 20$  mm, utiliser le moule CBR (sol conserver intact avec tous ses constituants),
- Si  $D > 20$  mm, mais refus  $\leq 25$  %, l'essai se fait dans le moule C.B.R., (sol écrêté à 20 mm),

**Rappel** :  $D > 20$  mm, mais refus  $> 25$  %, l'essai Proctor ne peut être fait !

### c/ Exécution de l'essai

Pour l'essai PROCTOR NORMAL, le remplissage est fait en 3 couches.  
 Pour l'essai PROCTOR MODIFIÉ, le remplissage est fait en 5 couches.  
 L'ensemble de la surface doit être compactée pour chaque couche comme le montre la figure 3.5

**1-** Assembler moule + embase + disque d'espacement (si moule C.B.R.) + disque de papier au fond du moule (facilite le démoulage) ; puis :

- Peser l'ensemble : soit  $P_1$ ,
- Adapter la rehausse.

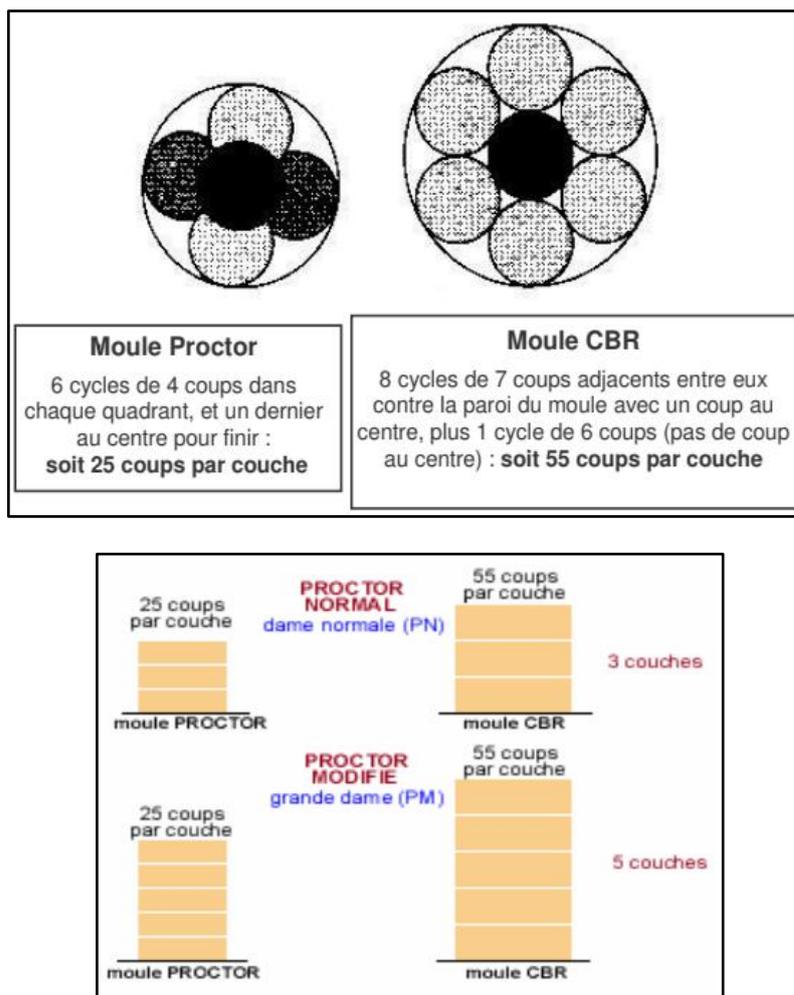
**2-** Introduire la 1ère couche et la compacter, voir figure 3.6. Placer le moule sur un socle en béton d'au moins 100 kg, ou sur un plancher en béton de 25 cm d'épaisseur, pour que l'ensemble de l'énergie appliquée le soit à l'échantillon. Astuces : faire des rayures sur la surface compactée (améliore la liaison avec la couche suivante),

**3-** Recommencer l'opération pour chaque couche (3 pour énergie de compactage Normal ; 5 pour Modifiée).

La quantité approximative du matériau à utiliser, pour chaque couche, est mentionnée sur le tableau 3.3 :

**Tab.3.3** : Quantité du matériau par couche des essais Proctor normal et Modifié

Moule	Essai Proctor Normal	Essai Proctor Modifié
<i>Proctor</i>	400 g	650 g
<i>C.B.R.</i>	1 050 g	1 700 g



**Fig. 3.5 :** Nombre et compactage des couches selon l'essai et le type du moule

4- Après compactage de la dernière couche, enlever la rehausse. Le sol compacté doit dépasser du moule de 1 cm environ. Sinon, recommencer l'essai,  
 5- Araser soigneusement à partir du centre ; on veillera, au cours de l'arasement à ne pas créer de trous sur la surface arasé,

6- Peser l'ensemble juste arasé (figure 3.6) : soit P2,

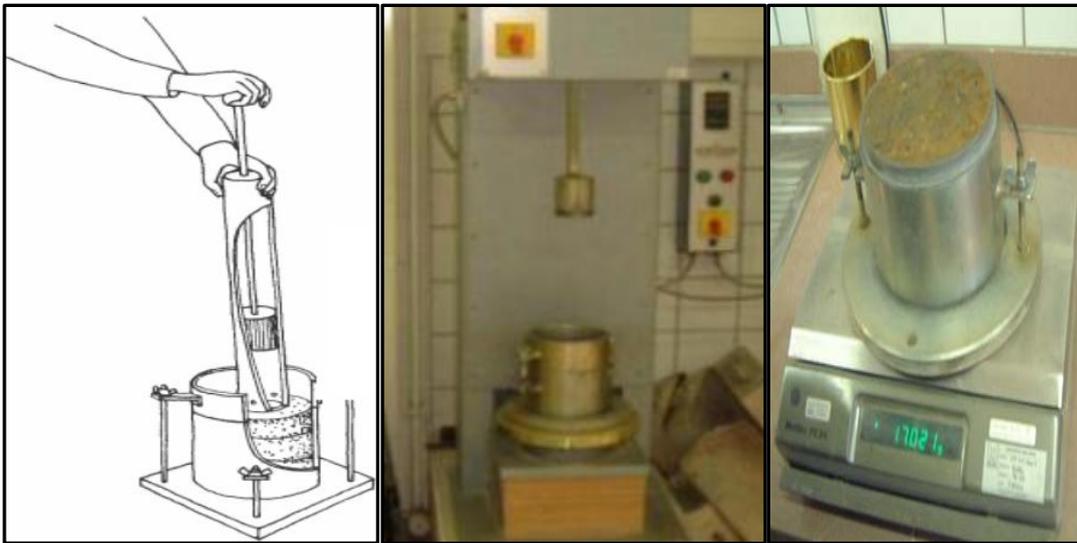
7- Oter l'embase (et disque d'espacement si nécessaire) et prélever 2 prises sur l'échantillon, l'une en haut et l'autre en bas ; en déterminer la teneur en eau  $w$  ; on prendra la moyenne des deux valeurs obtenues,

8- Augmenter de 2% la teneur en eau  $\omega$  de l'échantillon de départ et recommencer 5 à 6 fois l'essai, après avoir à chaque fois bien nettoyer le moule.

**A noter :**

- Moule PROCTOR : 2%  $\Leftrightarrow$  environ 50 g d'eau pour 2 500 g de sol,

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



*Fig. 3.6 : Compactage manuel – compactage automatique – pesée après compactage*

### 3.2.5 Expression des résultats

Tracer la courbe  $\gamma_d = f(\omega)$ , avec pour points de la courbe les coordonnées suivantes pour chaque point:

- En abscisse :  $\omega$ , teneur en eau, - En ordonnée  $\gamma_d$  qui s'exprime :

$$\gamma_d = \frac{(P2 - P1)}{(1 + \omega)V_{\text{moule}}}$$

Les coordonnées de l'optimum Proctor se déduisent de la courbe; elles s'expriment:

- Pour  $\gamma_d$  en  $\text{kN/m}^3$  avec 1 décimale,

- Pour  $\omega_{opt}$  en % avec 1 décimale.

### 3.2.6 Exemple de calcul pour essai Proctor Modifié avec moule CBR :

Les résultats d'un essai Proctor Modifié effectué sur un matériau routier (Tuf d'Adrar) ainsi que les calculs sont représentés sur les deux tableaux qui suivent.

Les données du moule CBR utilisé dans l'essai sont les suivants :

Poids du moule sans rehausse = 3842 grs.

Volume du moule sans rehausse = 2104 cm<sup>3</sup>

La première étape des calculs consiste à déterminer la densité humide  $\gamma_h$  après chaque essai, tableau 3.4

*Tab.3.4 : Densité humide finale après compactage - Proctor Modifié*

Poids d'eau ajoutée	7%	9%	11%	13%	15%
Poids total humide (gr)	7882	8079	8275	8277	8220
Poids du moule (gr)	<b>3842</b>				
Poids du sol humide (gr)	4040	4237	4433	4435	4378
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	<b>2104</b>				
Densité humide (gr/cm <sup>3</sup> )	<u><b>1,92</b></u>	<u><b>2,01</b></u>	<u><b>2,11</b></u>	<u><b>2,11</b></u>	<u><b>2,08</b></u>

La deuxième étape des calculs (tableau 3.5), ça concerne la détermination de la teneur en eau réelle de chaque essai  $\omega$ , ainsi que la densité sèche  $\gamma_d$  donnée par la relation suivante :

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

*Tab.3.5 : Teneurs en eau finale après compactage  $\omega$  et densités sèche  $\gamma_d$*

N° de la tare	13	7	M3	21	15	22	A3	B11	3	B14
Poids total humid (gr)	162,35	161,14	138,71	137,10	130,15	130,80	139,45	137,15	139,04	137,85
Poids total sec (gr)	153,79	152,45	129,61	127,99	119,64	120,4	126,43	124,31	123,91	123,05
Poids de la tare (gr)	18,35	19,58	18,53	18,63	18,67	18,52	18,73	18,77	18,64	19,66
Poids de l'eau (gr)	8,56	8,69	9,10	9,11	10,51	10,40	13,02	12,84	15,13	14,80

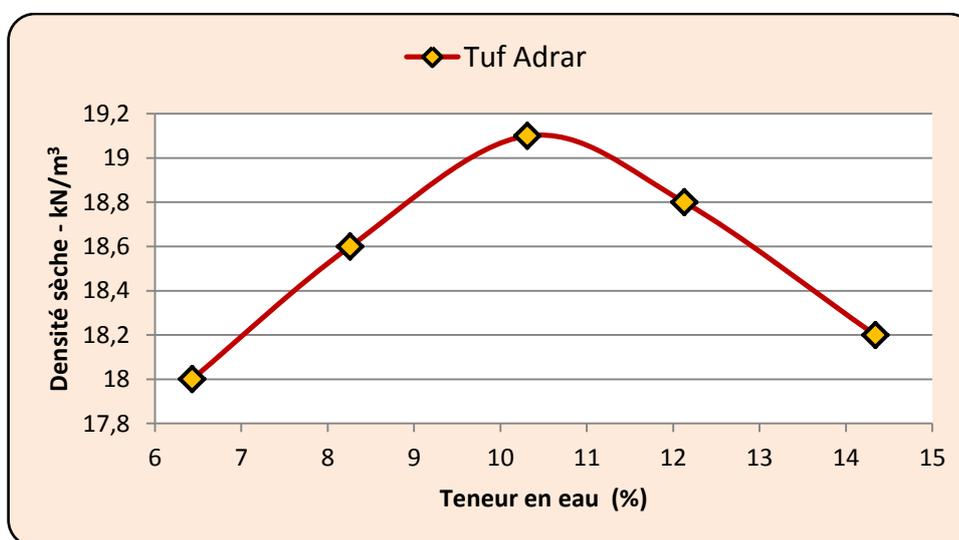
<b>Poids du sol sec (gr)</b>	135,44	132,87	111,08	109,36	100,97	101,88	107,7	105,54	105,27	103,39
<b>Teneur en eau (%)</b>	6,32	6,54	8,19	8,33	10,41	10,21	12,09	12,17	14,37	14,31
<b>Moyenne (%)</b>	<b><u>6,43</u></b>		<b><u>8,26</u></b>		<b><u>10,31</u></b>		<b><u>12,13</u></b>		<b><u>14,34</u></b>	
<b>Densité sèche</b>	<b><u>1,80</u></b>		<b><u>1,86</u></b>		<b><u>1,91</u></b>		<b><u>1,88</u></b>		<b><u>1,82</u></b>	

Remarques : Concernant les unités, en MDS on confond généralement le poids avec la masse (en donnant l'unité du gramme au poids). Aussi la densité qui est sans unité, on la prend en :  $\text{gr/cm}^3$  –  $\text{t/m}^3$  ou même en  $\text{kN/m}^3$ .

On admet les égalités et les équivalences suivantes, (et cela en prenant la valeur de la pesanteur  $g=10 \text{ m/s}^2$ ):

$$1 \text{ gr/cm}^3 \equiv 1 \text{ kgf/dm}^3 = 1000 \text{ kgf/m}^3 = 1 \text{ tf/m}^3 \equiv 10 \text{ kN/m}^3$$

La représentation graphique de l'essai est donnée par la figure 3.7



*Fig. 3.7 : Variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau  $\omega$*

### 3.3 Matériel et procédés de compactage in-situ

Pour le compactage in-situ, on distingue deux procédés : courants et spéciaux.

#### 3.3.1 Matériels de compactage et procédés courants de compactage

Différentes familles d'engins sont utilisées lors de compactage in situ, on peut citer les suivants :

Compacteurs à pneus (Pi) - compacteurs vibrants à cylindres lisses (Vi) et à pieds dameurs (VPi) - Compacteurs statiques à pieds dameurs (Spi) - Plaques vibrantes (PQi). L'indice (i) désigne le n° de la classe, il croît avec l'efficacité du compacteur

### **Compacteurs à pneus (Pi)**

Pour terrassements moyens ou pour des matériaux routiers « à surfacer ». Très mobiles ils sont utilisés pour des sols argileux sableux, les graves fines et moyennes. Tout lui est autorisé (terrassement, couche forme, chaussée, enrobé) mais moins efficace que les vibrants (figure 3.8). Vitesse maxi 6 km/h, vitesse moyenne de travail entre 3,5 et 5 km/h. La Classification est en fonction de la charge par roue (CR) :



*Fig. 3.8 : Compacteur à pneus*

**P1** :  $25\text{kN} < \text{CR} \leq 40\text{kN}$

**P2** :  $40\text{kN} < \text{CR} \leq 60\text{kN}$

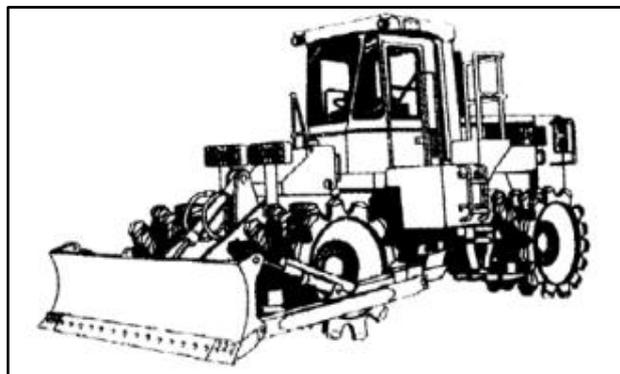
**P3** :  $\text{CR} > 60\text{kN}$

### **Compacteurs statiques (à pieds dameurs)**

Pour gros terrassements souvent tandem, parfois équipé d'une lame (figure 3.9). Vitesse maxi 12 km/h Vitesse moyenne de travail 6 km/h. La Classification s'effectue selon la charge statique moyenne par unité de largeur (M1/L) :

**SP1** : M1/L entre 30 et 60 kg/cm

**SP2** : M1/L > à 60 kg/cm et < 90 kg/cm



*Fig. 3.9 : Compacteur statiques (à pieds dameurs)*

## Compacteurs statiques (à cylindre lisse)

De moins en moins utilisés sauf pour le cylindrage d'enduits superficiels et le compactage d'enrobés très minces < 4 cm. Les morphologies tandem ou tricycle (figure 3.10) sont les plus couramment rencontrées.

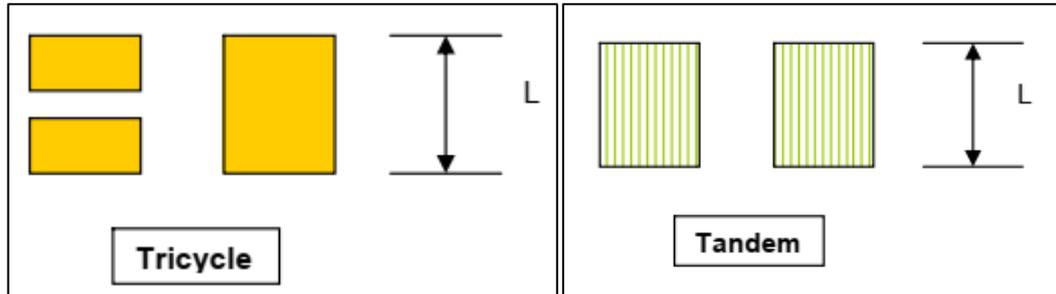


Fig. 3.10 : Cylindre lisse à tandem et tricycle

## Compacteurs vibrants (Vi cylindres lisses ou Vpi cylindres à pieds dameurs)

Pratiquement pour toute utilisation : Matériaux très flottants avec objectif élevé - Matériaux forte épaisseur ou granulométrie (remblais, enrochements, couches de forme) - Enrobés à compacter vite (température) - Enduit superficiel. La vitesse maxi 12 km/h, vitesse moyenne de travail entre 3 et 5 km/h. La classification s'effectue d'après la charge statique  $M$  appliquée par largeur de cylindre  $L$  et d'après l'amplitude de la vibration à vide, figure 3.11.

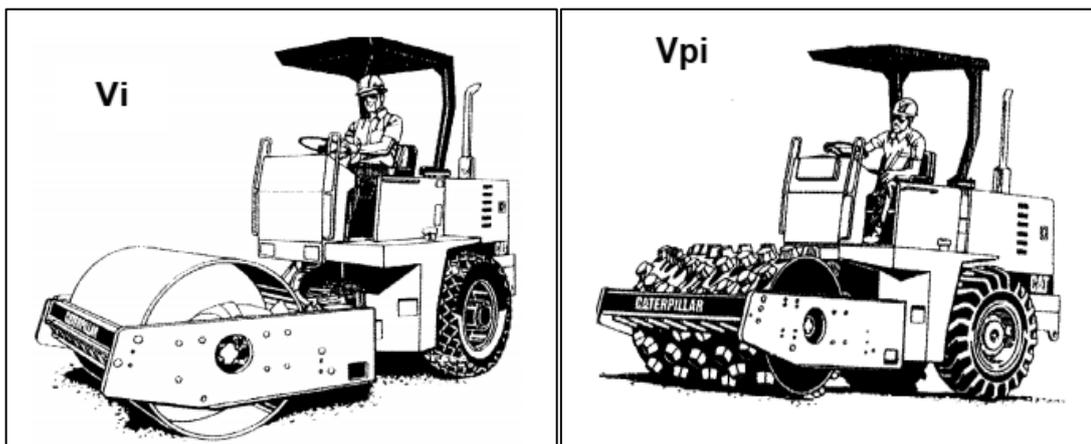


Fig. 3.11 : Compacteurs vibrants à cylindres lisses (Vi) et à pieds dameurs (Vpi)

### 3.3.2 Procédés spéciaux de compactage in situ

Concernant les couches à grandes épaisseurs, on utilise des procédés de compactage dynamique tels que : *Compactage par explosifs* (Explosifs ponctuels, Explosifs linéaires), *Compactage par vibroflottation* (Tubes en vibration, Colonnes ballastées) et par *Consolidation dynamique*, ce

*dernier est* valable pour tout type de sol. Il s'agit de transmettre des chocs de forte énergie à la surface du sol à traiter (chute libre d'une masse de 10 à 30 tonnes).

### 3.4 Prescriptions et contrôle du compactage

Plusieurs facteurs intervenant principalement sur l'efficacité d'un engin sur un sol donné. Parmi ces facteurs on trouve celles qui sont propres au terrain compacté (nature, teneur en eau), ainsi que des facteurs caractérisant l'engin et la séquence de compactage (nombre de passes, vitesse, pression de contact, fréquence et intensité de vibration).

Il faut noter que Quels que soient les engins utilisés le compactage sur chantier devra s'effectuer par couche de faible épaisseur 20 à 30cm (Travaux de route) ou encore 10 à 15 cm (Travaux de bâtiment).

#### 3.4.1. Influence de la vitesse de l'engin

En fonction de l'engin utilisé, il existe une vitesse optimale, fonction de l'épaisseur de la couche et de la nature du matériau permettant d'obtenir une compacité maximale. Plus les exigences de qualité sont sévères, plus la vitesse de translation est petite. Généralement, pour de la plus part des compacteurs, la vitesse est limitée à 8km/h. Dans le cas des compacteurs vibrants, la vitesse optimale se situe autour de 5km/h pour que les vibrations puissent agir efficacement sur toute l'épaisseur de la couche.

#### 3.4.2. Influence du nombre de passes

Celons l'engin utilisé ainsi que les paramètres de qualité fixés au préalable, il existe un nombre de passes optimales fonction de la vitesse de l'engin, de l'épaisseur de la couche et de la nature du matériau permettant d'obtenir une compacité maximale. Plus les exigences de qualité sont sévères, plus le nombre de passe optimale est élevé.

Généralement, il faut 3 à 8 passes pour compacter une couche de sol de 30 cm d'épaisseur, mais ce nombre peut facilement atteindre 12 en fonction du type de sol, de la teneur en eau et de la masse du compacteur. Si la compacité voulue n'est pas atteinte après 12 passes dans les conditions optimales d'humidité, on conclut que les opérations de compactage n'ont pas atteint leur but et que le compacteur utilisé n'est probablement pas adéquat.

#### 3.4.3. Efficacité d'un compactage

L'évaluation de l'efficacité d'un compactage s'effectue en comparant le poids volumique du sol sec sur le chantier ( $\gamma_d \text{ chantier}$ ) avec le poids volumique sec maximal (optimum Proctor  $\gamma_{dmax}$ ), la compacité  $C$  est donnée donc à l'aide de l'équation suivante :

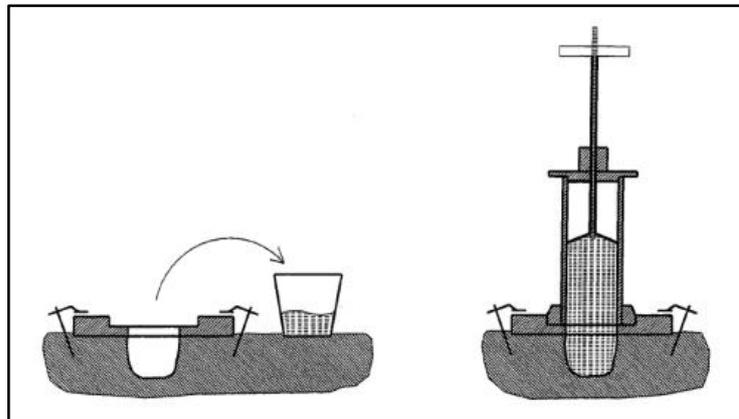
$$C = \frac{\gamma_{d \text{ chantier}}}{\gamma_{dmax}}$$

La compacité est l'un des critères sur lesquels on s'appuie pour accepter ou refuser un compactage. Elle s'exprime en pourcentage, tend vers 100% lorsque la valeur de ( $\gamma_{d \text{ chantier}}$ ) tend vers celle de ( $\gamma_{dmax}$ ). En général le cahier des charges impose  $C \geq 95\%$  (voir 98 %). Plus  $C$  est élevé, plus le compactage a été efficace.

### 3.4.4. Densitomètre à membrane

C'est l'un des appareillages utilisés pour évaluer l'efficacité du compactage in situ, et cela en déduisant la valeur que va avoir la densité sèche après séchage total. L'essai est effectué en place juste après que le compactage est achevé.

L'essai consiste à creuser une cavité, à recueillir et peser la totalité du matériau extrait  $W$ , de déterminer sa teneur en eau  $\omega$  puis à mesurer le volume de la cavité  $V$  à l'aide d'un densitomètre à membrane. L'appareil est doté d'un piston qui, sous l'action de l'opérateur, refoule un volume d'eau dans une membrane souple étanche qui épouse la forme de la cavité. Une tige graduée permet de lire directement le volume  $V$ , figure 3.12.



*Fig. 3.12 : Densitomètre à membrane.*

La masse volumique humide est donnée par :

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

Et la densité sèche sera calculée par la relation suivante :

$$\gamma_{d \text{ chantier}} = \frac{\gamma_h}{1 + \omega}$$

Une fois que  $\gamma_{d \text{ chantier}}$  est déterminée, on la compare avec  $\gamma_{dmax}$ .

### 3.5 EXERCICES

**Exercice 3.1** : On donne les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (Echantillon A1). Effectuer les calculs nécessaires et tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau ( $\omega$  %).

<b>Détermination de la densité humide du sol <math>\gamma_h</math></b>	Poids total humide (gr)	7610	7751	7740
	Poids du moule (gr)	3920	3920	3830
	Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2104		

<b>Détermination de la teneur en eau du sol <math>\omega</math> %</b>	N° de la tare :	537	I7	A3	569	1	2
	Poids total humide (gr)	138,05	126,8	104,71	115,72	109,8	100,31
	Poids total sec (gr)	131,25	120,3	98,25	108,43	99,97	91,22
	Poids de la tare (gr)	18,63	18,75	19,39	18,22	18,27	18,71

**Solution :**

- Détermination de la densité humide du sol  $\gamma_h$  :

\* Poids du sol humide  $P_h = \text{Poids total humide} - \text{Poids du moule}$

$$Poids \text{ du sol humide } P_h = 7610 - 3920 = 3690$$

$$** \text{ Densité humide } \gamma_h = \frac{P_h}{V} = \frac{3690}{2104} = \mathbf{1,75}$$

Poids du sol humide (gr)	3690	3831	3910
Densité humide	<b>1,75</b>	<b>1,82</b>	<b>1,86</b>

- Détermination de la teneur en eau du sol  $\omega$  % :

$$\omega_1 \% = \frac{P_\omega}{P_s} = \frac{138,05 - 131,25}{131,25 - 18,63} = \frac{6,8}{112,62} = \mathbf{6,04}$$

$$\omega_2 \% = \frac{P_\omega}{P_s} = \frac{126,8 - 120,3}{120,3 - 18,75} = \frac{6,5}{101,55} = 6,40$$

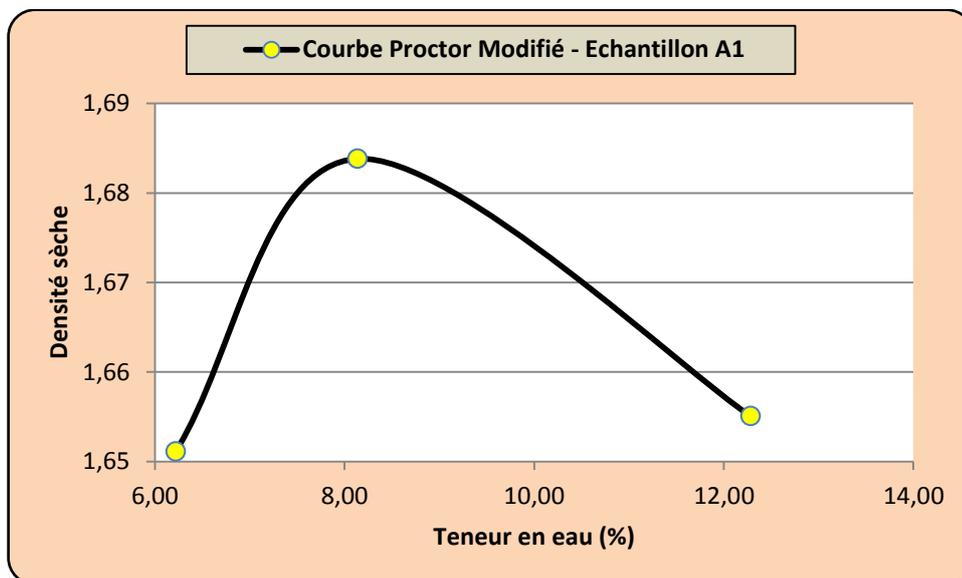
$$\text{Moyenne : } \omega \% = \frac{\omega_1 \% + \omega_2 \%}{2} = \underline{6,22}$$

Poids de l'eau (gr)	<b>6,8</b>	<b>6,5</b>	6,46	7,29	9,83	9,09
Poids du sol sec (gr)	<b>112,62</b>	<b>101,55</b>	78,86	90,21	81,7	72,51
Teneur en eau (%)	<b>6,04</b>	<b>6,40</b>	8,19	8,08	12,03	12,54
Moyenne (%)	<b>6,22</b>		<b>8,14</b>		<b>12,28</b>	

- Détermination de la densité sèche du sol compacté  $\gamma_d$  :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + \omega} = \frac{1,75}{1 + \frac{6,22}{100}} = \underline{1,65}$$

<b>Teneur en eau (%)</b>	<b>6,22</b>	<b>8,14</b>	<b>12,28</b>
<b>Densité sèche</b>	<b>1,65</b>	<b>1,68</b>	<b>1,66</b>



*Fig. 3.13 : Courbe Proctor Modifié de l'échantillon A<sub>1</sub>*

**Exercice 3.2** : On donne les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (Echantillon A2). Effectuer les calculs nécessaires et tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau ( $\omega$  %).

Poids total humide (gr)	8300	8451	8410
Poids du moule (gr)	3920	3830	3830
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2104		

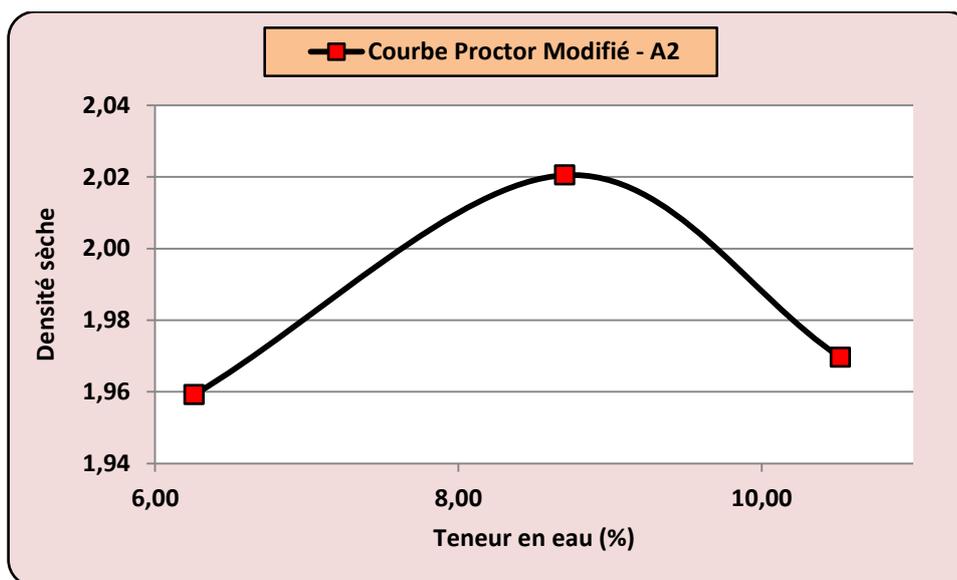
N° de la tare :	36	A4	B2	16	C5	11
Poids total humide (gr)	155,81	134,01	135,32	148,74	138,81	162,01
Poids total sec (gr)	148,34	126,68	125,96	138,53	127,41	147,92
Poids de la tare (gr)	18,89	17,97	20,13	19,21	18,7	14,38

**Solution :**

Poids du sol humide (gr)	4380	4621	4580
Densité humide	<b>2,08</b>	<b>2,20</b>	<b>2,18</b>

Poids de l'eau (gr)	7,47	7,33	9,36	10,21	11,4	14,09
Poids du sol sec (gr)	129,45	108,71	105,83	119,32	108,71	133,54
Teneur en eau (%)	5,77	6,74	8,84	8,56	10,49	10,55
Moyenne (%)	<b>6,26</b>		<b>8,70</b>		<b>10,52</b>	

Teneur en eau (%)	<b>6,26</b>	<b>8,70</b>	<b>10,52</b>
Densité sèche	<b>1,96</b>	<b>2,02</b>	<b>1,97</b>



*Fig. 3.14 : Courbe Proctor Modifiée de l'échantillon A<sub>2</sub>*

**Exercice 3.3** : On donne les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (Echantillon A3). Effectuer les calculs nécessaires et tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau ( $\omega$  %).

Poids total humide (gr)	8184	8369	8317
Poids du moule (gr)	3920	3830	3830
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2104		

N° de la tare :	537	I7	A3	569	1	2
Poids total humide (gr)	155,81	134,01	167,82	155,28	178,45	164,6
Poids total sec (gr)	148,34	126,68	155,99	144,52	163,25	150,45
Poids de la tare (gr)	18,89	17,97	18,71	18,68	18,04	18,9

**Solution :**

Poids du sol humide (gr)	4264	4539	4487
Densité humide	<b>2,03</b>	<b>2,16</b>	<b>2,13</b>

Poids de l'eau (gr)	7,47	7,33	11,83	10,76	15,2	14,15
Poids du sol sec (gr)	129,45	108,71	137,28	125,84	145,21	131,55
Teneur en eau (%)	5,77	6,74	8,62	8,55	10,47	10,76
Moyenne (%)	<b>6,26</b>		<b>8,58</b>		<b>10,61</b>	

Teneur en eau (%)	<b>6,26</b>	<b>8,58</b>	<b>10,61</b>
Densité sèche	<b>1,91</b>	<b>1,99</b>	<b>1,93</b>

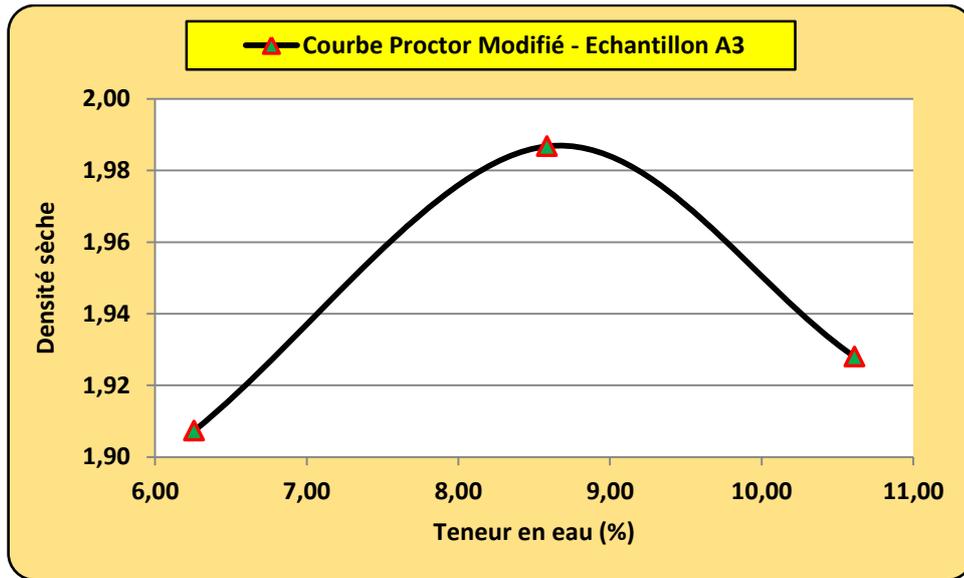


Fig. 3.15 : Courbe Proctor Modifié de l'échantillon A<sub>3</sub>

**Exercice 3.4** : On donne les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (Echantillon B1). Effectuer les calculs nécessaires et tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau ( $\omega$  %).

Poids total humide (gr)	8251	8403	8465	8445				
Poids du moule (gr)	3830	3830	3830	3830				
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2104							
N° de la tare :	564	504	504	505	M	K	K0	SD
Poids total humide (gr)	180,87	183,39	185,72	182,42	205,85	214,03	198,53	198,02
Poids total sec (gr)	171,51	173,94	173,22	169,99	188,58	196,05	179,1	178,53
Poids de la tare (gr)	19,04	18,74	19,12	17,69	18,44	18,94	19,09	18,25

**Solution :**

Poids du sol humide (gr)	4421	4573	4635	4615
Densité humide	<b>2,10</b>	<b>2,17</b>	<b>2,20</b>	<b>2,19</b>

Poids de l'eau (gr)	9,36	9,45	12,5	12,43	17,27	17,98	19,43	19,49
Poids du sol sec (gr)	152,47	155,2	154,1	152,3	170,14	177,11	160,01	160,28
Teneur en eau (%)	6,14	6,09	8,11	8,16	10,15	10,15	12,14	12,16
Moyenne (%)	<b>6,12</b>		<b>8,14</b>		<b>10,15</b>		<b>12,15</b>	

Teneur en eau (%)	6,12	8,14	10,15	12,15
Densité sèche	1,98	2,01	2,00	1,96

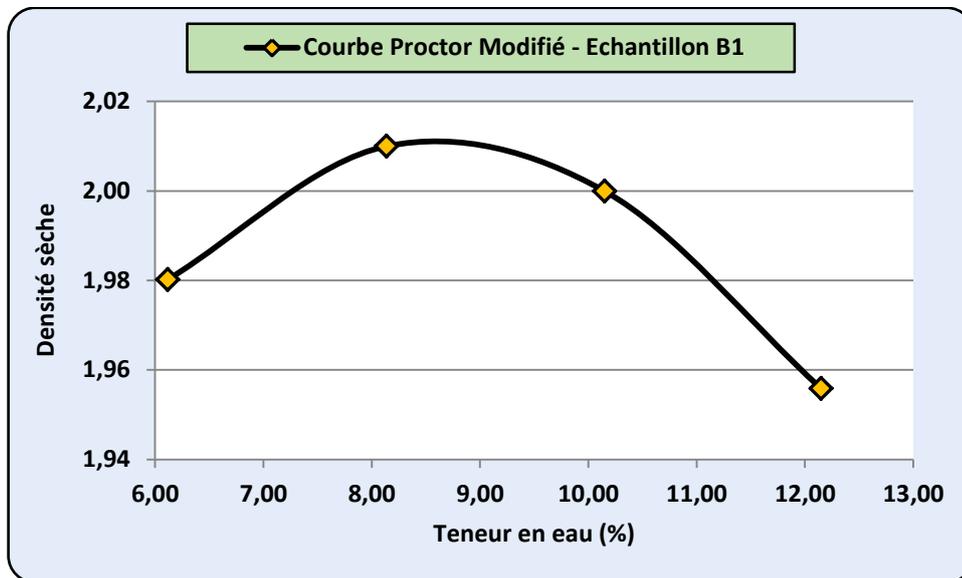


Fig. 3.16 : Courbe Proctor Modifiée de l'échantillon B<sub>1</sub>

**Exercice 3.5 :** On donne les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (Echantillon B2). Effectuer les calculs nécessaires et tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau ( $\omega$  %).

Poids total humide (gr)	7932	8035	8109	8017
Poids du moule (gr)	3920	3830	3830	3833
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2104			

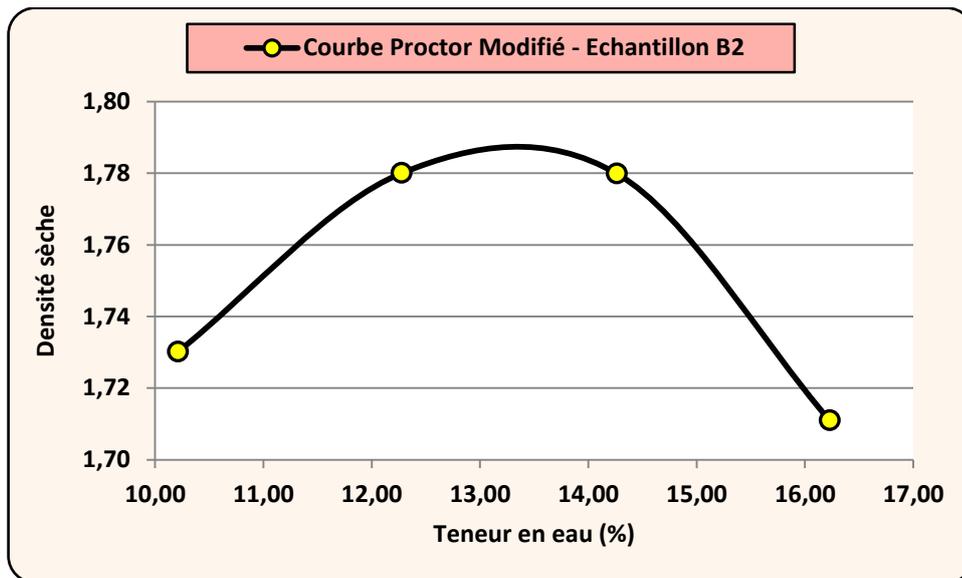
N° de la tare :	A0	W0	X1	11	f0	f11	SD	LM
Poids total humide (gr)	145,06	147,97	144,8	144,54	164,65	160,58	156,22	225,23
Poids total sec (gr)	133,37	135,92	130,96	130,83	146,41	142,88	137,03	196,26
Poids de la tare (gr)	19,12	17,69	18,44	18,94	19,09	18,25	18,4	18,3

**Solution :**

Poids du sol humide (gr)	4012	4205	4279	4184
Densité humide	1,91	2,00	2,03	1,99

Poids de l'eau (gr)	11,69	12,05	13,84	13,71	18,24	17,7	19,19	28,97
Poids du sol sec (gr)	114,25	118,23	112,52	111,89	127,32	124,63	118,63	177,96
Teneur en eau (%)	10,23	10,19	12,3	12,25	14,33	14,20	16,18	16,28
Moyenne (%)	<b>10,21</b>		<b>12,28</b>		<b>14,26</b>		<b>16,23</b>	

<b>Teneur en eau (%)</b>	<b>10,21</b>	<b>12,28</b>	<b>14,26</b>	<b>16,23</b>
<b>Densité sèche</b>	<b>1,73</b>	<b>1,78</b>	<b>1,78</b>	<b>1,71</b>



*Fig. 3.17 : Courbe Proctor Modifiée de l'échantillon B<sub>2</sub>*

**Exercice 3.6** : On donne les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (Echantillon B3). Effectuer les calculs nécessaires et tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau ( $\omega$  %).

Poids total humide (gr)	7962	8082	8089
Poids du moule (gr)	3830	3830	3830
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2104		

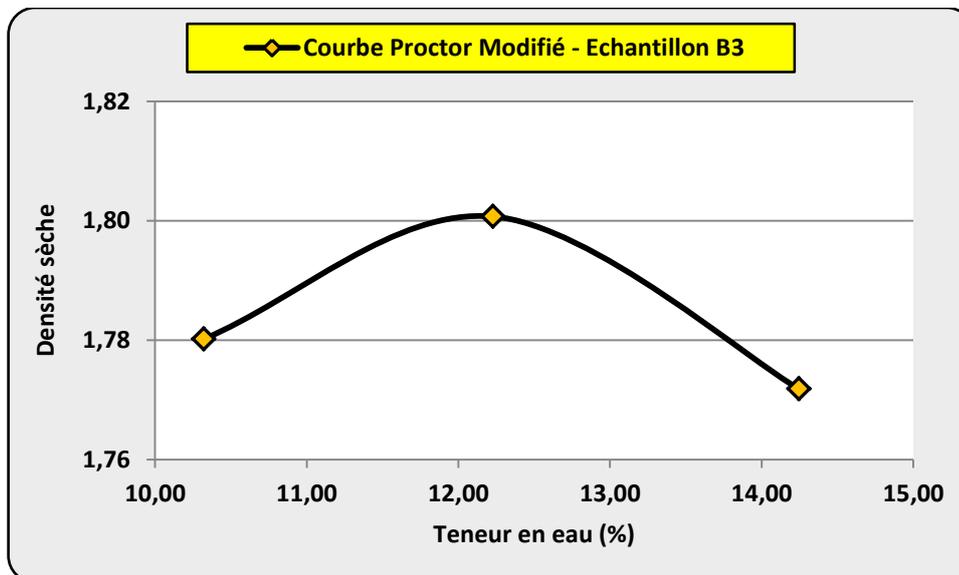
N° de la tare :	F2	X1	X2	Z3	T1	H2
Poids total humide (gr)	192,84	192,71	186,33	191,17	200,31	198,42
Poids total sec (gr)	176,64	176,33	168,11	172,3	177,53	176,04
Poids de la tare (gr)	18,44	18,83	18,61	18,5	18,33	18,24

**Solution :**

Poids du sol humide (gr)	4132	4252	4259
Densité humide	<b>1,96</b>	<b>2,02</b>	<b>2,02</b>

Poids de l'eau (gr)	16,2	16,38	18,22	18,87	22,78	22,38
Poids du sol sec (gr)	158,2	157,5	149,5	153,8	159,2	157,8
Teneur en eau (%)	10,24	10,40	12,19	12,27	14,31	14,18
Moyenne (%)	<b>10,32</b>		<b>12,23</b>		<b>14,25</b>	

Teneur en eau (%)	<b>10,32</b>	<b>12,23</b>	<b>14,25</b>
Densité sèche	<b>1,78</b>	<b>1,80</b>	<b>1,77</b>



*Fig. 3.18 : Courbe Proctor Modifié de l'échantillon B<sub>3</sub>*

**Exercice 3.7 :** On donne les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (Echantillon B4). Effectuer les calculs nécessaires et tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau ( $\omega$  %).

Poids total humide (gr)	8210	8460	8396
Poids du moule (gr)	3830	3920	3830
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2104		

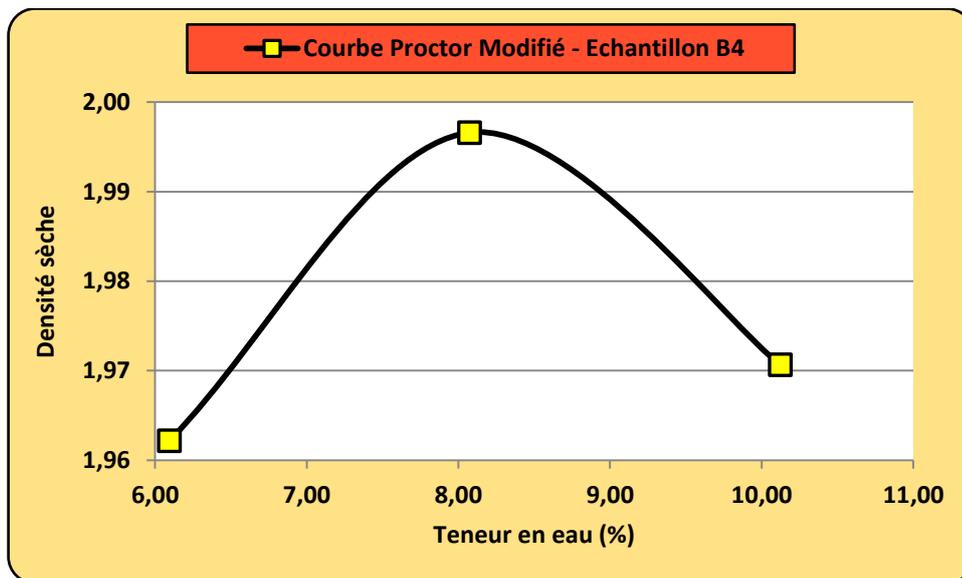
N° de la tare :	S0	R9	Z7	C10	12	N4
Poids total humide (gr)	2691	2691	2222,3	2222,3	2323	2323
Poids total sec (gr)	2543,6	2543,6	2077,2	2077,2	2137,4	2137,4
Poids de la tare (gr)	125	125	280	280	304	304

**Solution :**

Poids du sol humide (gr)	4380	4540	4566
Densité humide	<b>2,08</b>	<b>2,16</b>	<b>2,17</b>

Poids de l'eau (gr)	147,4	147,4	145,1	145,1	185,6	185,6
Poids du sol sec (gr)	2418,6	2418,6	1797,2	1797,2	1833,4	1833,4
Teneur en eau (%)	6,0944	6,0944	8,0737	8,0737	10,123	10,1233
Moyenne (%)	<b>6,09</b>	<b>8,07</b>	<b>10,12</b>			

Teneur en eau (%)	<b>6,09</b>	<b>8,07</b>	<b>10,12</b>
Densité sèche	<b>1,96</b>	<b>2,00</b>	<b>1,97</b>



*Fig. 3.19 : Courbe Proctor Modifiée de l'échantillon B<sub>4</sub>*

**Exercice 3.8 :** On donne les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (Echantillon B5). Effectuer les calculs nécessaires et tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau ( $\omega$  %).

Poids total humide (gr)	8671	8766	8694
Poids du moule (gr)	3920	3830	3830
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2104		

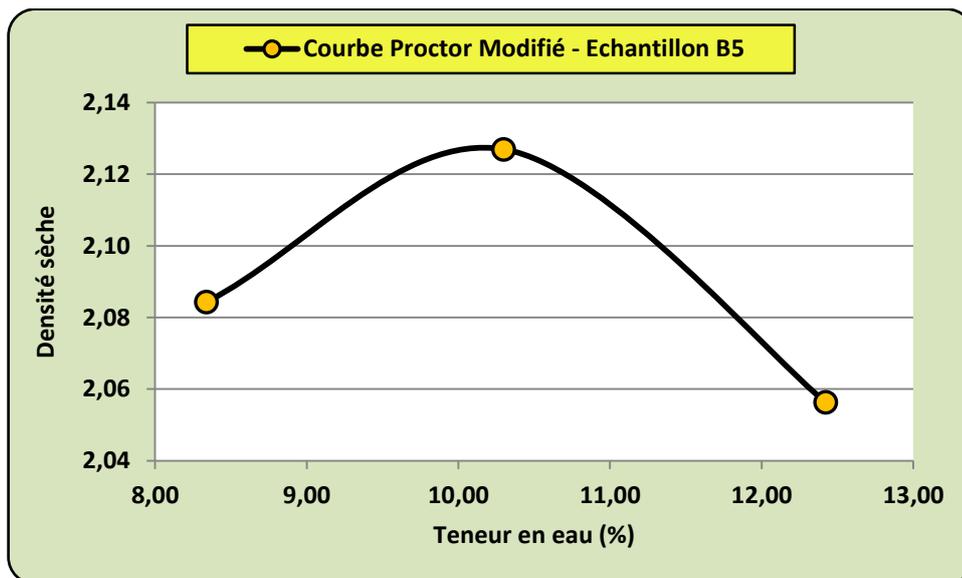
N° de la tare :	569	F19	MZ	N4	MZ	I29
Poids total humide (gr)	224,3	176	181	140	144,3	152,9
Poids total sec (gr)	209,7	164	165,9	128,6	130,5	137,8
Poids de la tare (gr)	27,9	25,2	18,6	18,4	18,9	16,8

**Solution :**

Poids du sol humide (gr)	4751	4936	4864
Densité humide	<b>2,26</b>	<b>2,35</b>	<b>2,31</b>

Poids de l'eau (gr)	14,6	12	15,1	11,4	13,8	15,1
Poids du sol sec (gr)	181,8	138,8	147,3	110,2	111,6	121
Teneur en eau (%)	8,03	8,65	10,25	10,34	12,37	12,48
Moyenne (%)	<b>8,34</b>		<b>10,30</b>		<b>12,42</b>	

Teneur en eau (%)	<b>8,34</b>	<b>10,30</b>	<b>12,42</b>
Densité sèche	<b>2,08</b>	<b>2,13</b>	<b>2,06</b>



*Fig. 3.20 : Courbe Proctor Modifié de l'échantillon B<sub>5</sub>*

**Exercice 3.9** : On donne les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (Echantillon C1). Effectuer les calculs nécessaires et tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau ( $\omega$  %).

**Solution** :

Poids total humide (gr)	7842	8120	8116
Poids du moule (gr)	3830	3830	3831
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2104		

N° de la tare :	AZ	EY	XXL	D10	XX	D11
Poids total humide (gr)	142,53	152,71	183,92	182,21	180,75	176,24
Poids total sec (gr)	132,89	142,38	168,55	167,13	162,73	158,83
Poids de la tare (gr)	18,66	17,02	18,32	19,01	18,61	18,5

Poids du sol humide (gr)	4012	4290	4285
Densité humide	<b>1,91</b>	<b>2,04</b>	<b>2,04</b>

Poids de l'eau (gr)	9,64	10,33	15,37	15,08	18,02	17,41
Poids du sol sec (gr)	114,23	125,36	150,23	148,12	144,12	140,33
Teneur en eau (%)	8,44	8,24	10,23	10,18	12,50	12,41
Moyenne (%)	<b>8,34</b>		<b>10,21</b>		<b>12,45</b>	

Teneur en eau (%)	<b>8,34</b>	<b>10,21</b>	<b>12,45</b>
Densité sèche	<b>1,76</b>	<b>1,85</b>	<b>1,81</b>

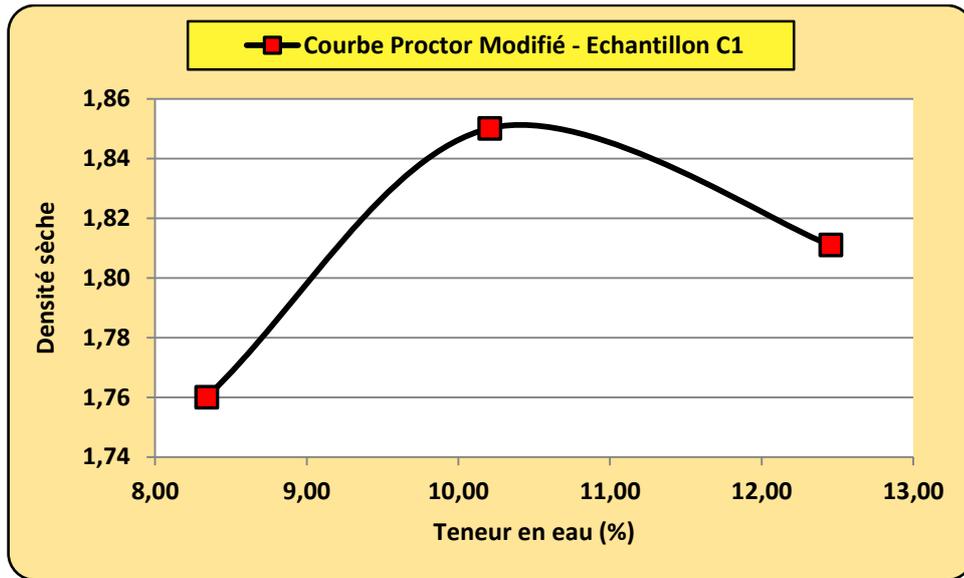


Fig. 3.21 : Courbe Proctor Modifié de l'échantillon C<sub>1</sub>

**Exercice 3.10** : On donne les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (Echantillon C2). Effectuer les calculs nécessaires et tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau ( $\omega$  %).

Poids total humide (gr)	8358	8395	8371
Poids du moule (gr)	3919	3830	3833
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2104		

N° de la tare :	A9	A5	B2	Z2	1	17
Poids total humide (gr)	180,13	183,02	186,18	182,67	205,55	214,15
Poids total sec (gr)	170,77	173,57	173,68	170,24	188,5	196,17
Poids de la tare (gr)	18,3	18,37	19,58	17,94	18,36	19,06

**Solution :**

Poids du sol humide (gr)	4439	4565	4538
Densité humide	<b>2,11</b>	<b>2,17</b>	<b>2,16</b>

Poids de l'eau (gr)	9,36	9,45	12,5	12,43	17,05	17,98
Poids du sol sec (gr)	152,47	155,2	154,1	152,3	170,14	177,11
Teneur en eau (%)	6,14	6,09	8,11	8,16	10,02	10,15
Moyenne (%)	<b>6,11</b>		<b>8,14</b>		<b>10,09</b>	

Teneur en eau (%)	6,11	8,14	10,09
Densité sèche	1,99	2,01	1,96

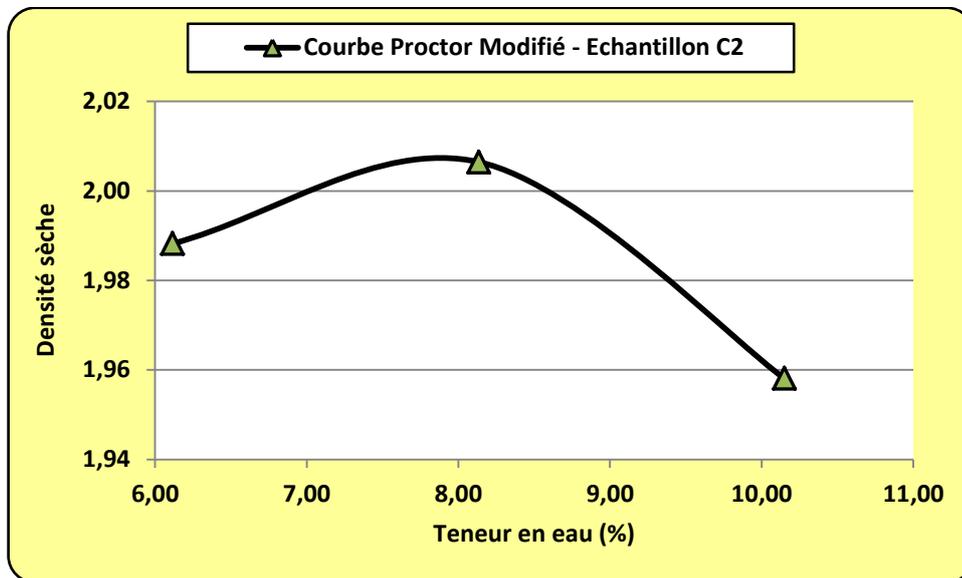


Fig. 3.22 : Courbe Proctor Modifié de l'échantillon C<sub>2</sub>

### 3.6 EXERCICES SUPPLEMENTAIRES

**Exercice 3.11** : D'après les résultats de l'essai Proctor modifié effectué sur un matériau routier (tuf route aéroport d'Adrar), tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau. Déduire les paramètres de compactage ( $\omega_{opt}$ ;  $\gamma_{dmax}$ ) pour ce matériau.

Echantillon	Tuf route aéroport d'Adrar				
$\omega$ %	6,17	7,12	8,64	10,83	11,93
$\gamma_d$	1,99	2,03	2,06	2,02	1,98

**Exercice 3.12** : D'après les résultats de l'essai Proctor modifié effectué un Sable concassé, tracer la courbe de la variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction de la teneur en eau. Déduire les paramètres de compactage ( $\omega_{opt}$ ;  $\gamma_{dmax}$ ) pour ce sable.

Echantillon	Sable concassé				
$\omega$ %	4,59	5,73	7,63	8,85	9,42
$\gamma_d$	2,06	2,21	2,16	2,10	2,01

### Chapitre 4. L'eau dans le sol

4.1 Types d'eau dans le sol

4.2 Loi de Darcy

4.3 Coefficient de perméabilité (K)

4.4 Exercices

#### Introduction

La présence de l'eau dans le sol joue un rôle très important, on s'intéresse à l'eau libre qui peut circuler entre les grains, cette eau saturant un massif de terrain construit une nappe souterraine, le plus souvent à surface libre ou parfois localisée entre deux formations imperméables c'est la nappe captive.

Une fois reconnue la présence d'eau dans un terrain, il faudra s'attacher aux problèmes qu'elle pose et qui se ramènent pratiquement tous, soit à son élimination (épuisement de fouille), soit à une réduction de sa charge (drainage). (CAMBFORT, 1980)

Le drainage et le rabattement provisoire ou définitif de la nappe phréatique, sont souvent indispensables pour la réalisation des ouvrages, et pour leur stabilité.

La connaissance théorique des lois de l'écoulement de l'eau dans le sol, comme celle de l'action mécanique qui en résulte, seront nécessaires au projeteur, elles lui permettront d'appréhender les principes physiques et mécaniques qui ne sont pas remis fondamentalement en cause par les résultats de la pratique, ainsi que de prévoir et d'expliquer le comportement particulier des massifs.

#### 4.1 Types d'eau dans le sol

L'eau qui se trouve dans les sols est soumise à plusieurs forces. Les molécules d'eau subissent d'abord une attraction réciproque constituant la cohésion de l'eau, et leur permettant de rester groupées entre elles.

On distingue l'eau de constitution, l'eau en phase vapeur, l'eau hygroscopique, l'eau pelliculaire, l'eau capillaire et l'eau libre ou gravifique.

## 4.2 Loi de Darcy

Darcy (1856) a proposé, pour décrire les écoulements unidirectionnels, la relation suivante :

$$\frac{Q}{S} = k \frac{h_1 - h_2}{l}$$

Où  $h_1$  et  $h_2$  sont les hauteurs piézométriques mesurées aux deux extrémités de l'échantillon (Figure 4.1).

Il constate que le débit par unité d'aire  $Q$  est proportionnel à  $(h_1 - h_2)$  et inversement proportionnel à la longueur  $l$  de l'écoulement, tant que  $\frac{h_1 - h_2}{l}$  n'est pas trop fort. C'est cette relation qui a permis d'exprimer la loi de Darcy :

$$v = -ki$$

Avec  $v$  : Vitesse de décharge (c'est le débit traversant une section unité) :

$i$  : Gradient hydraulique ou perte de charge par unité de longueur dans le sens de l'écoulement ;

$k$  : Coefficient de perméabilité du sol qui a la dimension d'une vitesse, il caractérise à la fois le sol et le liquide filtrant.

Considérons un cylindre de sol de section  $S$  (figure 4.1) et supposons qu'il se produise un écoulement de M vers N.

Soit  $Q$  le débit à travers la section  $S$ . Par définition, la vitesse de l'eau est :  $V = \frac{Q}{S}$

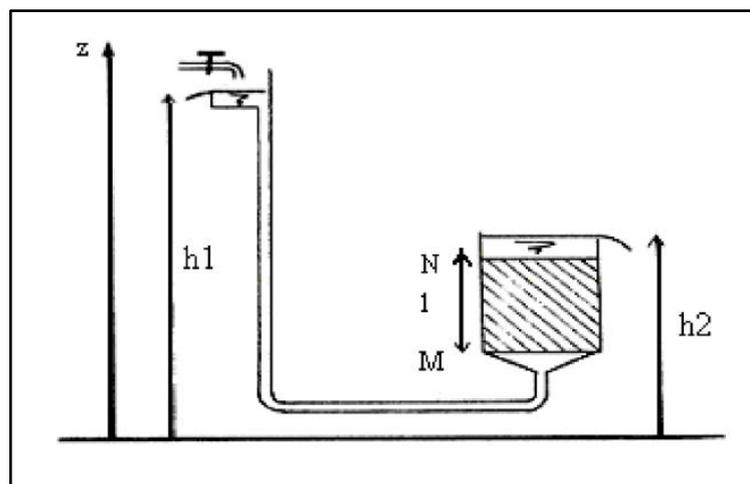


Fig. 4.1 : L'expérience de Darcy

Il s'agit d'une vitesse apparente car, d'une part, l'eau ne circule que dans les pores et la section réelle disponible n'est que  $S \cdot n$ , ( $n$  : la porosité) ; d'autre part, les pores ne sont pas rectilignes et l'eau fait de nombreux détours, c'est ce qu'on appelle la tortuosité du milieu.

### 4.2.1 La charge hydraulique

La charge hydraulique  $H$  conditionne l'énergie d'un point de la nappe d'eau. Comme l'eau se déplace du point à haute énergie vers le point à basse énergie, il est impératif de bien connaître  $H$ , si possible le champ de  $H$ . Au laboratoire, on mesure la pression généralement à l'aide de manomètres alors que sur le terrain on utilise des tubes piézométriques. Il est recommandé de mettre en place en un même endroit plusieurs piézomètres ouverts chacun à des profondeurs différentes. On peut aussi mesurer les charges hydrauliques correspondant à différentes profondeurs.

En hydrodynamique, la charge en M désigne la quantité :

$$h_1 = z_1 + \frac{u_1}{\gamma_w} + \frac{v_1^2}{2g}$$

Elle s'exprime en mètre d'eau. Cette charge correspond à l'énergie totale d'une particule d'eau de masse unité :

$z_1$  : est l'altitude du point M par rapport à un plan horizontal de référence (énergie de position).

$u_1$  : est la pression de l'eau interstitielle en M ( $\frac{u_1}{\gamma_w}$  énergie de pression).

$v$  : la vitesse de l'eau.

Dans les sols, les vitesses sont faibles ( $v < 10$  cm/s) et la quantité  $\frac{v^2}{2g}$  qui représente l'énergie cinétique est tout à fait négligeable, si bien que la formule précédente s'écrit :

$$h_1 = z_1 + \frac{u_1}{\gamma_w}$$

D'après le théorème de Bernoulli :

– Si  $h_1 = h_2 = \text{constant}$ , il n'y a pas d'écoulement, la nappe est en équilibre.

- Par contre, si  $h_1 > h_2$ , il y a écoulement de M vers N et la perte de charge ( $h_1 - h_2$ ) correspond à l'énergie perdue en frottement. La perte de charge est à la fois le moteur et la

conséquence de l'écoulement.

On appelle gradient hydraulique la quantité :

$$i = \frac{h_1 - h_2}{l}$$

$l$  : distance MN.

La loi de DARCY qui régit les phénomènes d'écoulement dans les sols s'exprime par la formule :

$$v = k \cdot i$$

### 4.3 Coefficient de perméabilité (K)

La loi de DARCY pose donc la proportionnalité de la vitesse de décharge et du gradient hydraulique. Le coefficient de proportionnalité  $k$  a la dimension d'une vitesse, c'est le coefficient de perméabilité, il dépend à la fois du milieu poreux et du fluide. On l'exprime en général en m/s ou en cm/s. on trouvera ci-dessous (tableau IV-1), une échelle approximative des valeurs de ce coefficient de perméabilité  $k$  suivant la nature des terrains.

**Tab. 4.1 :** *Ordre de grandeur du coefficient de perméabilité des sols en cm/s (d'après COSTET et al. 1983)*

Nature des terrains	$k$ (m/s)
Gravier	$10^{-1} < k < 10^{-2}$
Sable	$10^{-3} < k < 10^{-1}$
Limon et sable argileux	$10^{-7} < k < 10^{-3}$
Argile	$10^{-11} < k < 10^{-7}$
Roches apparemment non fissurées	$10^{-10} < k < 10^{-8}$

#### 4.3.1 Mesure au laboratoire du coefficient de perméabilité

Le coefficient de perméabilité d'un sol est une caractéristique intrinsèque au sol et qui dépend de la granulométrie du sol, de sa nature et de sa structure.

Plus un sol est fin, plus les pores sont petits, et plus de frottements, et donc les pertes de charges sont importants, donc plus le coefficient de perméabilité sera petit. On dit parfois par simplification que les argiles sont imperméables, en fait elles ont une perméabilité très faible.

Plus un sol est dans un état de compacité élevé, plus la porosité est faible et

l'espace dans lequel l'eau peut circuler réduit, donc moins le sol sera perméable.

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

- 1- Mesure sous charge constante pour les sols très perméables.
- 2- Mesure sous charge variable pour les sols peu perméables.

### 4.3.1.1 Perméamètre à charge constante

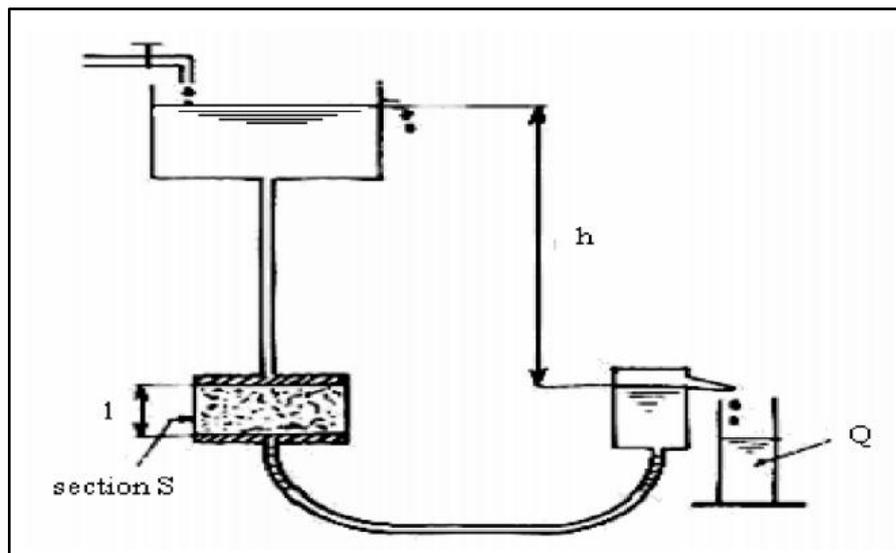
Un Perméamètre est composé d'une enceinte étanche dans laquelle est placé un échantillon de sol de section ( $S$ ) et de largeur  $l$ . les deux extrémités de l'échantillon sont reliées à deux tubes par l'intermédiaire de pierres poreuses. Dans le Perméamètre à charge constante (figure 4.2), on maintient à l'aide de trop pleins la différence de charge ( $h$ ) entre les deux faces de l'échantillon constante et l'on mesure la quantité d'eau ( $Q$ ) qui est passée pendant un temps donné ( $t$ ).

$$V = Q \cdot \Delta t \quad \text{Sachant que : } Q = v \cdot S$$

$$\text{D'après la loi de DARCY, on a : } v = k \cdot i = k \frac{h}{l}$$

$$V = k \frac{h}{l} \cdot S \cdot \Delta t \text{ d'où : } k = \frac{V \cdot l}{S \cdot h \cdot \Delta t}$$

### 4.3.1.2 Perméamètre à charge variable



*Fig. 4.2 : Perméamètre à charge constante*

Dans le Perméamètre à charge variable, le tube (figure 4.3) est rempli d'eau et l'on suit la baisse de son niveau en fonction du temps, soit  $s$  la section de ce tube. Pendant un temps  $dt$ , la quantité d'eau qui s'écoule est :

$$Q = -s dh$$

Mais aussi  $Q = v.S.dt = k.i.S.dt$

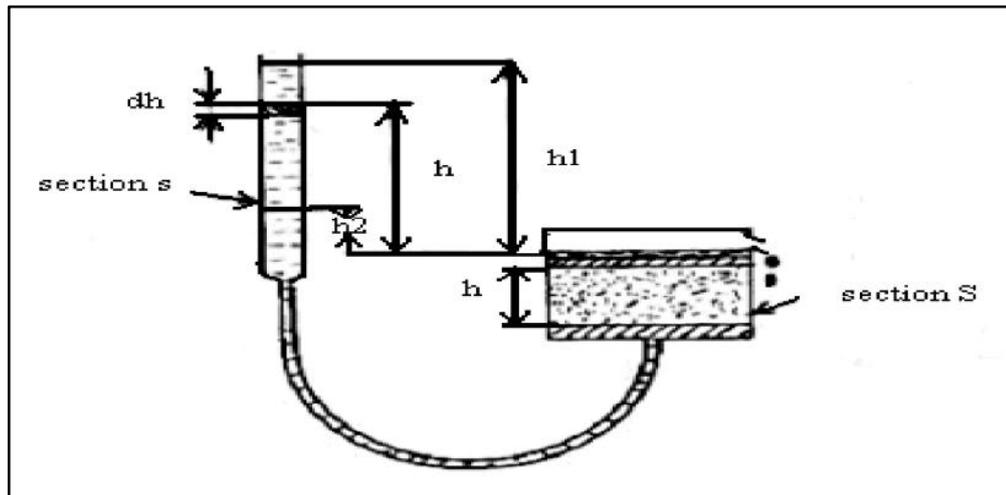


Fig. 4.3 : Perméamètre à charge variable

$$Q = \frac{k.h.S.dt}{l}$$

Soit, en égalant, les deux expressions de  $Q$  :

$$k.dt = \frac{-s.l.dh}{S.h}$$

et en intégrant entre deux instants on trouve :

$$k = \frac{-s.l(\ln h_1 - \ln h_0)}{S(t_1 - t_0)}$$

$$k = 2,3 \frac{s.l.\log \frac{h_0}{h_1}}{S(t_1 - t_0)}$$

$h_0$  : la différence de charge au temps  $t_0$

$h_1$  : la différence de charge au temps  $t_1$

### 4.3.2 Perméabilité moyenne équivalente des terrains stratifiés

Dans le cas des terrains stratifiés, chaque couche a sa propre perméabilité qui influe sur la perméabilité d'ensemble du massif. Le terrain perméable d'épaisseur totale  $H$  et composé de ( $n$ ) couches successives d'épaisseur ( $h_1, h_2, \dots, h_n$ ) et de coefficient de perméabilité ( $k_1, k_2, \dots, k_n$ ) respectivement (SCHNEEBELI.1978).

#### 4.3.2.1 Cas d'un écoulement horizontal

Dans ce cas le gradient hydraulique  $i$  est le même à la traversée de chaque couche est donc :

$$v_1 = k_1 i, v_2 = k_2 i \dots, v_n = k_n i.$$

En considérant le débit qui traverse une tranche de sol de largeur ( $b$ ) unité, on constate qu'il est égal à la somme des débits unitaires.

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$$

$$vH = v_1 h_1 + v_2 h_2 + v_3 h_3 + \dots + v_n h_n$$

$$v = \frac{v_1 h_1 + v_2 h_2 + v_3 h_3 + \dots + v_n h_n}{H}$$

$$v = \frac{i(k_1 h_1 + k_2 h_2 + k_3 h_3 + \dots + k_n h_n)}{H}$$

Avec  $v$  : vitesse moyenne équivalente.

D'autre part  $v = K_H \cdot i$  où  $K_H$  : Coefficient de perméabilité équivalente du massif.  
Donc :

$$K_H = \frac{k_1 h_1 + k_2 h_2 + k_3 h_3 + \dots + k_n h_n}{H}$$

$$K_H = \frac{1}{H} (k_1 h_1 + k_2 h_2 + k_3 h_3 + \dots + k_n h_n)$$

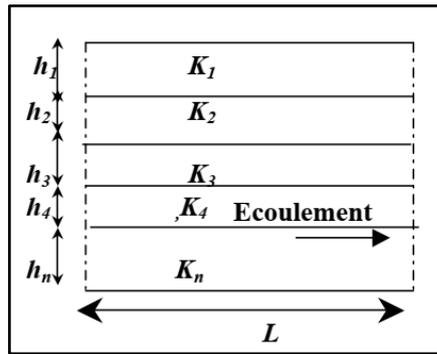


Fig. 4.4 : Ecoulement horizontal

#### 4.3.2.2 Cas d'un écoulement vertical

Par le principe de continuité, la vitesse de décharge est la même à la traversée des différentes couches, on a donc :

$$v = k_1 i_1 = k_2 i_2 = k_3 i_3 = \dots = k_n i_n = k_v i$$

Le gradient hydraulique  $i$  est par ailleurs égal à :

$$i = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{H}$$

Où  $h_1, h_2, \dots, h_n$  sont les pertes de charge à travers des différentes couches et  $H$  la perte de charge totale donc :

$$v = k_v i = k_v \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{H}$$

$$v = k_1 \frac{h_1}{H_1} = k_2 \frac{h_2}{H_2} = \dots = k_n \frac{h_n}{H_n} = \frac{h_1}{\frac{H_1}{k_1}} = \dots = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \dots + \frac{H_n}{k_n}}$$

et par conséquent :

$$k_v = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \dots + \frac{H_n}{k_n}}$$

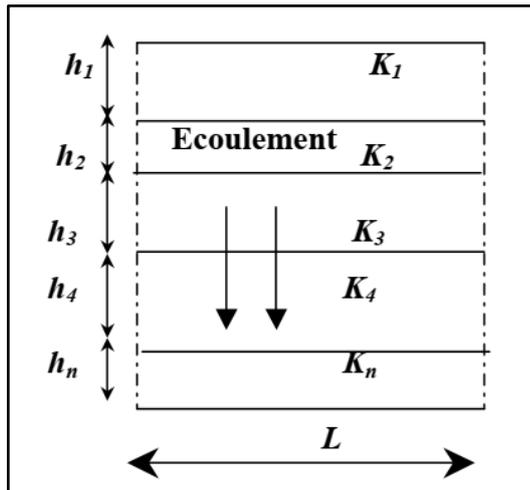


Fig. 4.5 : Ecoulement vertical

#### 4.4 Exercices

##### Exercice 1

Calculer le gradient hydraulique et le contraste de perméabilité  $\frac{k_1}{k_2}$

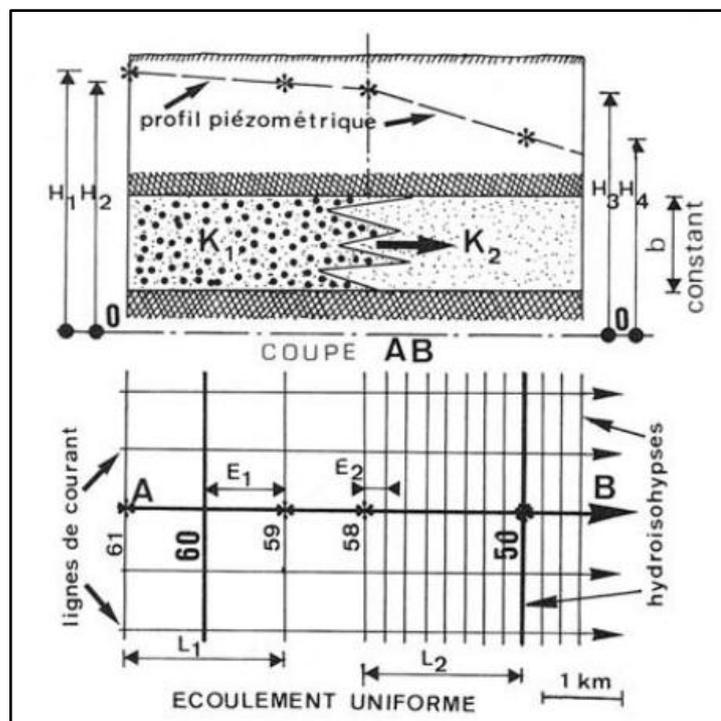


Fig. 4.6 : Ecoulement uniforme dans un aquifère à nappe captive d'épaisseur constante

$$i_1 = \frac{H_1 - H_2}{L_1} = \frac{2}{2000} = 0,001 ; \quad i_2 = \frac{H_3 - H_4}{L_1} = \frac{8}{2000} = 0,004$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{0,004}{0,001} = 4 = \frac{E_1}{E_2} = 4$$

Ecoulement uniforme dans un aquifère à nappe captive d'épaisseur constante. Une diminution du coefficient de perméabilité, dû à une variation latérale de faciès, entraîne un accroissement du gradient hydraulique et une diminution du module d'espacement E. Le rapport des modules d'espacement permet de calculer directement celui des coefficients de perméabilité.

### **Exercice 2**

Déterminer le débit d'un puits en nappe captive compte tenu des informations suivantes:

- Différence de hauteurs piézométriques de 2,5 m entre deux piézomètres situés respectivement à 10 et 30 m du centre du puits.

- Épaisseur de la nappe de 30 m.

- Conductivité hydraulique 0,0001 m/s.

$$Q = 2\pi K e \frac{H_1 - H_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} = 0,0428 \text{ m}^3/\text{s} = 43 \text{ l/s}$$

### **Exercice 3**

Déterminer le coefficient de perméabilité K dans une nappe captive si les mesures du rabattement dans deux piézomètres situés respectivement à 20 et 150 m du puits sont, dans l'ordre 3,3 et 0,3 m. L'épaisseur de la nappe est de 30 m et le débit est de 0,2 m<sup>3</sup>/s.

$$K = \frac{Q \cdot \ln \frac{x_1}{x_2}}{2\pi(H_1 - H_2)e} = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Olivari G.** (1983) Mécanique des sols appliquée aux calculs d'ouvrages. Tome 2. ENTPE. Lyon.
- Plumelle C.** (2004-2005) Cour Géotechnique C.N.A.M- Géotechnique B1/B6.
- Reiffsteck P.** (2010) Cour de fondation des ouvrages. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Division Mécanique des Sols des Roches et de la Géologie de l'Ingénieur.
- CEN (2005) Eurocode 7** : calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales, NF EN 1997-1 (P94-251-1), 175 pages
- CEN (2006) Eurocode 7** : calcul géotechnique - Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais, NF EN 1997-2 (P94-252), 209 pages
- Mekerta Belkacem,** (2017), « Mécanique des sols avancée » Université Ahmed Draïa – Adrar
- Guettouche Amar,** (2015), « Mécanique des sols: Cours et exercices », Support de cours - Université Ferhat Abbas- Sétif-1.
- Khaled Meftah,** (2008), « Cours et exercices de mécanique des sols », Support de cours- Septembre 2008.
- Khelifa Harichane,** (2013), « Mécanique des sols 1 », Support de cours -Université Hassiba Ben-Bouali de Chlef.
- Michel Dysli,** (1997), «Mécanique des sols », Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne 3<sup>ème</sup> Edition.
- Gérard Degoutte, Paul Royet** (2009), «Aide -Mémoire de Mécanique des sols »
- Clément Cesodt, Philippe Reiffsteck** (2015), «Exercices et problèmes corrigés de mécanique des sols, avec rappels de cours ».
- Norme EN 13286-2,** (2004), «Méthodes d'essai de détermination en laboratoire pour la masse volumique de référence et la teneur en eau - Compactage Proctor. ».

**Fascicule 62 Titre V** (1993), Règles techniques de calcul et de conception des fondations des ouvrages de génie civil, CCTG, Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, Texte officiel N° 93-3, 182 pages

**Fondations profondes pour le bâtiment** (1992), Norme NF-P11-212 AFNOR, Paris, 72 pages (DTU n°13.2 CSTB),

**Frank R.**, (1999) Calcul des fondations superficielles et profondes, Techniques de l'ingénieur et Presses des Ponts et Chaussées, 141 pages.