

CHAPITRE 02 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS

2.1. Introduction

En mécanique des sols, on étudie plus particulièrement les sols meubles, qui sont constitués par des grains de matières minérales, végétales ou animales. En première approximation les sols constituent un système triphasé : grains solides, eau interstitielle, air et/ou vapeur d'eau. On est ainsi amené à étudier des ensembles constitués par des grains laissant entre eux des interstices qui sont remplis de gaz (généralement l'air) ou de liquide (généralement l'eau). La masse d'un sol se présente donc sous trois phases : solide, liquide, et gazeuse. En un point quelconque, chaque phase se trouve dans un état d'équilibre particulier. Le sol est l'ensemble de ces trois phases (Figure 2.1). Les propriétés d'un sol ne dépendent pas seulement de la phase solide, elles sont fortement influencées par la présence et la nature des fluides, liquide et gaz. On appelle sol, un massif de terre se trouvant dans un état de compacité et de structure déterminé.

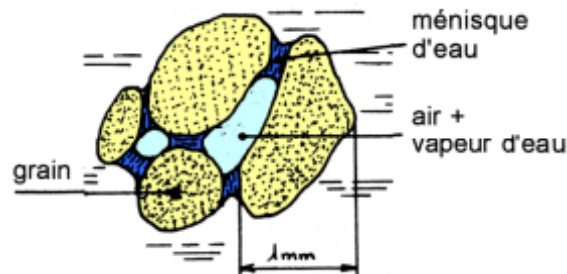


Figure 2.1. Éléments constitutifs d'un sol

2.2. Schéma des différentes phases du sol

Les termes sur la Figure 2.2 sont utilisés dans la description des diagrammes des phases et dans la mécanique des sols en général.

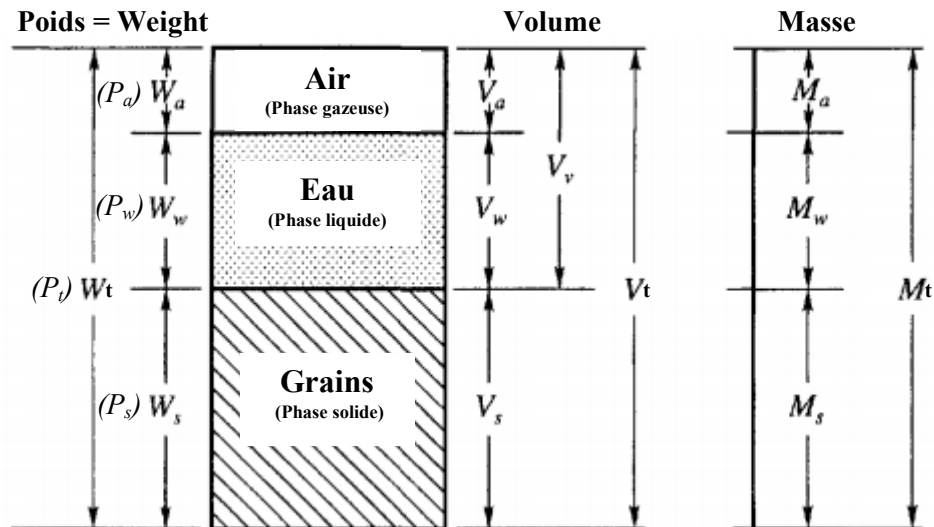


Figure 2.2. Les trois phases d'un sol

Poids des différentes phases :

$W_t = P_t$: poids total du sol (des trois phases) = $P_s + P_w$

$W_s = P_s$: poids des grains solides.

$W_w = P_w$: poids de l'eau.

$W_a = P_a$: poids de l'air (négligeable).

Volumes des différentes phases :

V_t : volume total du sol = $V_v + V_s$

V_s : volume occupé par les grains solides.

V_w : volume occupé par l'eau.

V_a : volume occupé par l'air.

V_v : volume des vides = $V_a + V_w$

2.3. Définitions de base

2.3.1. Paramètres dimensionnels

- *Le poids volumique total ou apparent du sol γ_t* : c'est le poids de l'unité de volume, eau et air compris. On dit aussi *poids volumique humide* (total ou apparent) γ_h .

$$\gamma_t = \gamma_h = \frac{P_t}{V_t} = \frac{W_t}{V_t} ; \text{ en (kN/m}^3\text{), (N/m}^3\text{), etc.} \quad (2.1)$$

- *Le poids volumique des grains solides γ_s* : c'est le poids de l'unité de volume des grains solides, il est de l'ordre de $2,65 \text{ g/cm}^3$ pour les sables et on a une valeur moyenne statistique de l'ordre de $2,7 \text{ g/cm}^3$ pour les Argiles. On dit aussi poids volumique absolu.

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} = \frac{W_s}{V_s} \quad (2.2)$$

- *Le poids volumique de l'eau γ_w* : c'est le poids de l'unité de volume de l'eau, égal à $9,81 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ généralement on prend $\approx 10 \text{ (kN/m}^3\text{)}$.

$$\gamma_w = \frac{P_w}{V_w} = \frac{W_w}{V_w} \quad (2.3)$$

- *Le poids volumique du sol sec γ_d* : c'est le poids de l'unité de volume du sol exempt d'eau interstitielle (après expulsion de l'eau libre). On dit aussi poids volumique sec.

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V_t} = \frac{W_s}{V_t} \quad (2.4)$$

- *Le poids volumique déjaugé (ou submergé) du sol γ'* : c'est le poids de l'unité de volume d'un sol submergé sous une nappe d'eau compte tenue de la poussée d'Archimède.

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (2.5)$$

2.3.2. Paramètres sans dimensions

- *Notion de densité* : c'est le poids volumique du sol par rapport à celui de l'eau. On parle de, densité sèche $\rho_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$; densité humide $\rho_h = \frac{\gamma_h}{\gamma_w}$ et densité des grains solides $\rho_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$.

- *La Porosité n* : c'est le rapport du volume des vides au volume total du sol.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.6)$$

- *L'indice de vides e* : c'est le rapport du volume des vides au volume des grains solides.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.7)$$

- *La teneur en eau w* : c'est le rapport du poids de l'eau contenue dans un certain volume de sol au poids des éléments solides compris dans le même volume. La teneur en eau est exprimée en (%).

$$w = \frac{P_w}{P_s} \cdot 100 = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (2.8)$$

- *Le degré de saturation S_r* : c'est le rapport du volume effectivement occupé par l'eau au volume des vides.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100 \quad (2.9)$$

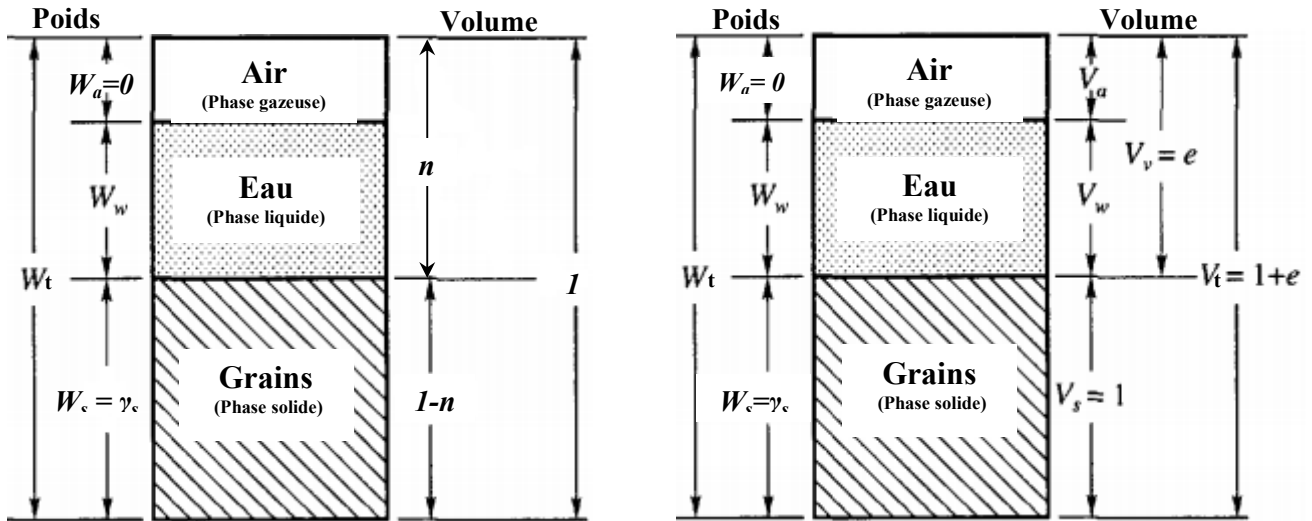
Pour un sol saturé $V_v = V_w$ et $S_r = 1 = 100\%$; pour un sol sec $V_w = 0$ et $S_r = 0$.

- *La compacité C* : c'est le rapport du volume des grains solides au volume total du sol.

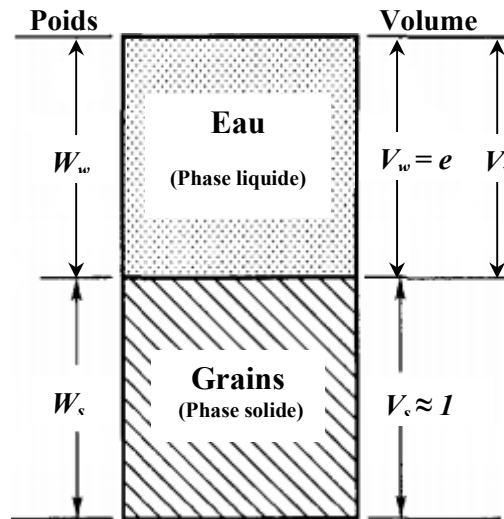
$$C = \frac{V_s}{V_t} \quad (2.10)$$

2.3.3. Relations entre les paramètres du sol

Soit un élément de sol tel que le volume des grains solides V_s soit égal à l'unité ($V_s = 1$), le poids volumique des grains de ce sol est par définition égal à γ_s . Donc, $\gamma_s = W_s/V_s$ et $V_s = 1 \Rightarrow W_s = \gamma_s$. D'autre part, le volume des vides à pour mesure la valeur de l'indice des vides, $e = V_v/V_s$ et $V_s = 1 \Rightarrow e = V_v$. En considérant que le poids de l'air est nul ($W_a = 0$), les schémas suivants permettent de retrouver facilement les relations suivantes :



(a) Sol partiellement saturé, $V_s \approx 1$



(b) Sol saturé, $V_s \approx 1$ et $S_r = 100\%$

Figure 2.3. Diagrammes des phases des sols

Quelques relations entre les paramètres du sol en utilisant les digrammes de la Figure 2.3:

- $n = \frac{V_v}{V_t}$ et comme $V_v = e$ et $V_t = 1 + e \Rightarrow n = \frac{e}{1 + e}$
- $e = \frac{V_v}{V_s}$ et comme $V_v = n$ et $V_s = 1 - n \Rightarrow e = \frac{n}{1 - n}$
- $V_w = f(e, S_r) : S_r = V_w / V_v \Rightarrow V_w = S_r \cdot V_v$ et comme $V_v = e$, on aura : $V_w = e \cdot S_r$
- $w = f(\gamma_w, \gamma_s, e, S_r) : w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\gamma_w \cdot V_w}{\gamma_s} = \frac{\gamma_w \cdot e \cdot S_r}{\gamma_s}$

- $e = f(w, \gamma_w, \gamma_s, S_r) : w = \frac{\gamma_w \cdot e \cdot S_r}{\gamma_s} \Rightarrow e = w \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w \cdot S_r}$, si le sol est saturé ($S_r = 1$) $\Rightarrow e = w \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$
- $\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} = \frac{\gamma_s}{1+e}$

De la même manière on aura plusieurs relations utiles entre les paramètres physiques du sol :

$$\begin{aligned} \gamma_h &= \gamma_d (1+w) & \gamma' &= \gamma_{sat} - \gamma_w = (1-n) (\gamma_s - \gamma_w) \\ \gamma_h &= (1-n) \gamma_s + n \cdot S_r \cdot \gamma_w & \gamma' &= (\gamma_s - \gamma_w) / (1+e) \\ \gamma_h &= \gamma_d + S_r \cdot n & \gamma' &= (\gamma_d / \gamma_s) (\gamma_s - \gamma_w) \\ \gamma_s &= \gamma_d (1+e) & \gamma' &\approx 0,62 \gamma_d \\ \gamma_d &= \gamma_s (1-n) & S_r &= (\gamma_s \cdot w) / (\gamma_w \cdot e) \\ \gamma_d &= \gamma_s / (1 + w_{sat} (\gamma_s / \gamma_w)) & e &= (\rho_s \cdot w) / S_r ; \text{ si } S_r = 1 \Rightarrow e = \rho_s \cdot w \\ \gamma_d &= \gamma_h / (1+w) \\ \gamma_{sat} &= \gamma_s (1+w) / (1+e) \\ \gamma_{sat} &= (W_s + W_w) / V_t = W_s + (V_v \cdot \gamma_w) / V_t \\ \gamma_{sat} &= (1-n) \gamma_s + n \cdot \gamma_w \text{ (à saturation : } S_r = 1) \\ \gamma_{sat} &= \gamma_d + \left[1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \right] \cdot \gamma_w \end{aligned}$$

2.4. Echantillonnage

2.4.1. But et principe de l'échantillonnage

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, celles-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Donc, il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Ce problème est complexe à résoudre mais il conditionne en grande partie la fiabilité des résultats obtenus au cours des essais de laboratoire. Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit.
- Prélèvement au laboratoire de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

2.4.2. Prélèvement sur le tas (sables et graviers)

Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en élément de faibles diamètres. On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin. Dans le cas des matériaux de carrière, il faudra également prendre en compte l'hétérogénéité des différents bancs rocheux exploités.

2.4.3. Echantillonnage en laboratoire

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105°C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60°C dans le cas contraire.

- **Le quartage** : l'échantillon est divisé en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés. Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial (Figure 2.4).

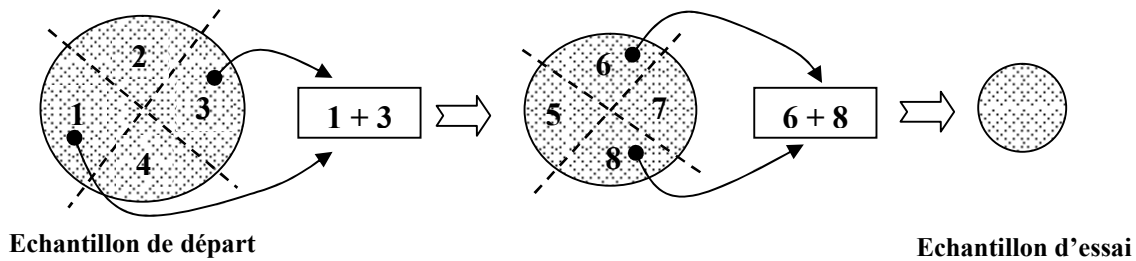


Figure 2.4. Le quartage d'un échantillon de sol en laboratoire

- **L'échantillonneur** : cet appareil de laboratoire permet de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans bac de manière séparée. La répétition en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir, après trois ou quatre opérations identiques, la quantité de matériaux représentative et nécessaire à l'essai envisagé. L'échantillonneur sera choisi de telle manière que son ouverture soit de dimension comparable avec celle des plus gros grains du matériau traité. Le procédé peut être résumé par la Figure 2.5. Celle-ci permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse de ($3m$).

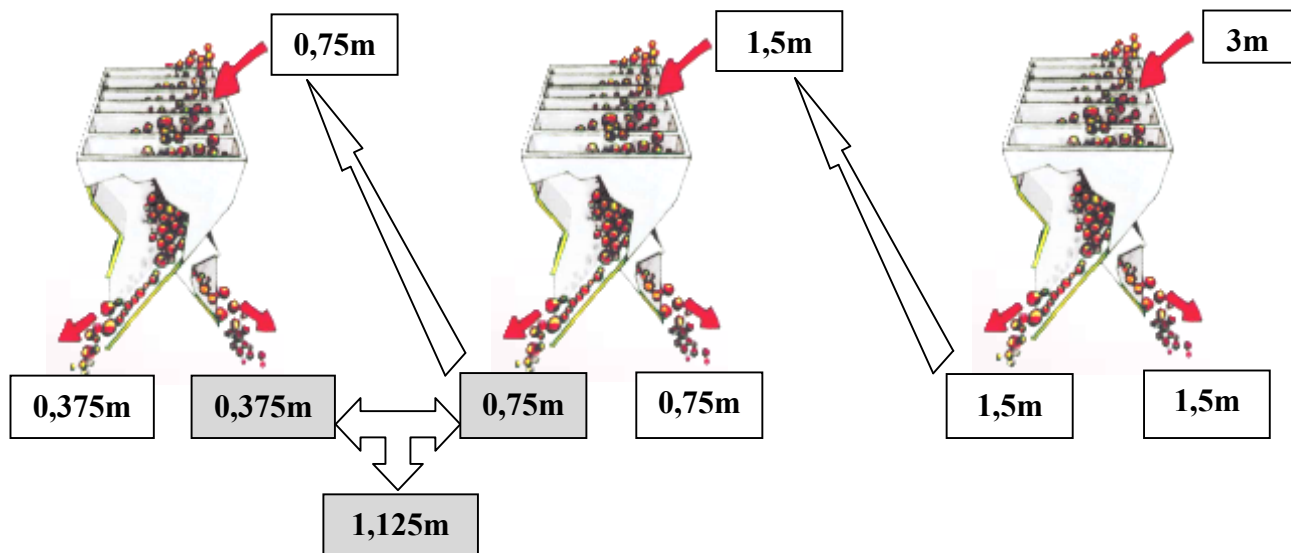


Figure 2.5. Le principe d'un échantillonneur

2.4.4. Choix du procédé

Ces deux procédés peuvent être utilisés séparément ou conjointement, en fonction de la quantité nécessaire à l'essai et de la grosseur maximale des grains. Si l'échantillon de départ est d'un volume très important, une ou deux opérations de quartage permettent de diminuer rapidement le volume des matériaux traités ensuite à l'aide de l'échantillonneur on termine l'opération.

2.5. Mesures en laboratoire (Essais de bases)

2.5.1. Mesure de la teneur en eau d'un sol

- La méthode la plus ancienne et la plus simple pour mesurer la teneur en eau d'un sol consiste à prélever du sol, à le peser, à le dessécher à l'étuve jusqu'à poids constant, et à le peser en suite.
 - ✓ La différence des deux pesées donne le poids d'eau cherché (P_w).
 - ✓ Rapporté au poids du sol sec P_s (2^{ème} pesée) le poids d'eau donne la teneur en eau de l'échantillon de sol : $w = (P_w/P_s) \times 100$ en (%).
 - ✓ En général on dessèche 24 heures dans une étuve à $100^\circ\text{C} \pm (10^\circ\text{C})$.
- La méthode par séchage à l'alcool méthylique (alcool à brûler) : un échantillon d'environ 100 gr de sol est arrosé par 50 cm³ d'alcool que l'on fait brûler. On recommence l'opération sur le même échantillon, avec la même quantité d'alcool. L'échantillon est pesé après chaque combustion.
 - ✓ Si l'écart entre le poids n'est pas pratiquement négligeable l'opération est reproduite autant de fois qu'il est nécessaire pour que la différence entre les deux derniers poids le soit (c.à.d. négligeable). Ce qui nous donne (P_s) d'autre part $P_w = [(\text{poids initial de l'échantillon avant l'opération de séchage à l'alcool}) - (\text{poids final après cette dernière qui a donnée } P_s)]$
 - ✓ On aura donc : $w = (P_w/P_s) \times 100$ en (%).

Remarque : Il est important d'insister sur le fait que les échantillons de sol doivent être désagrégés avant leur mise à l'étuve de manière à avoir une dessiccation complète. Si on élève la température d'étuvage la dessiccation est plus rapide et elle peut ne pas être complète si l'échantillon n'est pas bien désagrégé. Dans certains cas (les tourbes, sols qui contiennent des quantités importantes en matière organiques par exemple) il est recommandé que la température d'étuvage ne dépasse pas 90°C et que la durée d'étuvage soit prolongée.

2.5.2. Détermination du poids volumique total γ_t et sec γ_d

- **Méthode de l'anneau volumétrique :** cette méthode est utilisée soit en laboratoire soit in-situ. Le prélèvement s'effectue à l'aide d'un anneau volumétrique (ou carottier) dont les dimensions et les formes sont étudiés de manière à modifier le sol aussi faiblement que possible (Figure 2.6). Connaissant le volume intérieur V_t du carottier et son poids vide P_o , la seule pesée du carottier plein de sol et correctement arasé ($P+P_o$) permet de déterminer le poids volumique total (ou apparent) du sol :

$$\gamma_t = \frac{(P + P_o) - P_o}{V_t} \left\{ \begin{array}{l} \text{La pesée de l'échantillon après séchage à l'étuve donne} \\ P_s \text{ et l'on obtient ainsi le poids volumique sec:} \end{array} \right\} : \gamma_d = \frac{P_s}{V_t}$$

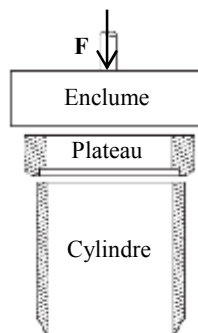


Figure 2.6. Vue en coupe de l'outil de l'anneau volumétrique

- **Méthode au Densitomètre :** cette méthode utilisée in-situ, consiste à creuser une cavité en pesant les matériaux extraits P_t et à déterminer le volume de cette cavité V_t occupé par les matériaux extraits, en replissant cette cavité soit :

- **à l'aide de sable de poids spécifique connu γ_s (densimètre à sable):** on utilise à cet effet une bouteille à sable (Figure 2.7) muni d'une ouverture réglable dont on détermine le poids avant P_i et après P_r remplissage de la cavité et du cône de garde. Connaissant le poids constant du sable contenu dans le cône de garde P_c , on calcul aisément le volume de la cavité :

$$V_t = \frac{P_i - P_r - P_c}{\gamma_{s(sable)}}, \text{ avec } V_t \approx V_{s(sable)} \Rightarrow \gamma_t = \frac{P_t}{V_t}$$

Les inconvénients majeurs de cet appareil sont : la nécessité de réaliser une surface initiale horizontale avant l'essai ; la possibilité de variation du γ_s du sable suite aux variations d'humidité ; la possibilité de pertes des grains de sable dans les fissures du terrain.

- **à l'aide d'un liquide (densimètre à membrane):** ce système utilisant un densitomètre à membrane (Figure 2.8), permet de remédier aux inconvénients du système précédent et de simplifier les manipulations concernant la détermination du volume, qui sont ramenées à deux lectures du niveau du liquide dans le corps du cylindre dont le fond est constitué par la membrane que l'on applique sur la surface de la cavité en agissant sur le piston à tige graduée. C'est la simple différence des lectures finale et initiale qui fournit le volume V_t de la cavité. La souplesse de la membrane lui permet d'épouser très exactement la forme de la cavité et d'assurer une grande précision à la mesure.



Figure 2.7. Densimètre à sable



Figure 2.8. Densimètre à membrane

2.5.3. Détermination du poids volumique des grains solides γ_s :

Le poids volumique des grains solides est appelé aussi poids spécifique absolue du sol et peut être défini comme : le poids de l'unité de volume du sol supposé compact (c.à.d. considéré comme un ensemble formant un seul grain). V_s est mesuré à l'aide de l'éprouvette graduée dont le principe est le suivant : on plonge un échantillon de sol de poids P , dont on a déterminé au préalable la teneur en eau naturelle, dans une éprouvette graduée contenant de l'eau distillée sur une hauteur h et on mesure son volume par le déplacement du liquide en h' (Figure 2.9). Pour P_s voir la mesure de la teneur en eau, alors que $V_s = (\pi d^2/4) \Delta h \Rightarrow \gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$.

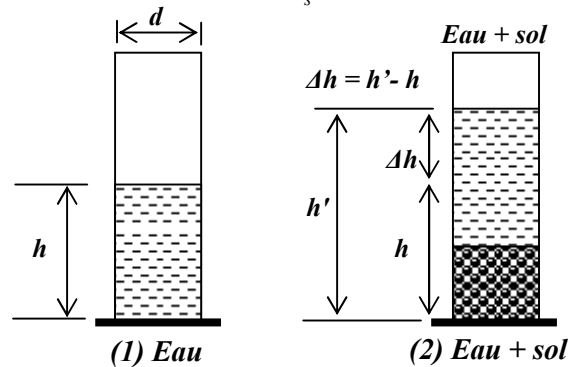


Figure 2.9. Eprouvette graduée pour la détermination de γ_s

2.5.4. Détermination de l'indice des vides d'un sol

Soit V_t le volume d'un échantillon non remanié. Il vient que : $\gamma_h = W_t/V_t$ et $\gamma_d = W_s/V_t$, comme $e = V_v/V_s = (V_t - V_s)/V_s$ et $V_s = W_s/\gamma_s$ l'indice des vides e est donné par la relation suivante :

$$e = \frac{V_t - \left(\frac{W_s}{\gamma_s}\right)}{\left(\frac{W_s}{\gamma_s}\right)} = \frac{V_t}{\left(\frac{W_s}{\gamma_s}\right)} - 1 \quad (2.11)$$

Le Tableau 1.1 présente à titre indicatif quelques caractéristiques physiques des sols.

Tableau 1.1. Caractéristiques physiques des sols (d'après Terzaghi et Peck)

Sol	Porosité n (%)	Indice des vides e	Teneur en eau w (%)	Densité ρ	
				ρ_d	ρ_h
Sable à granulométrie serrée (état peu compact)	46	0,85	32	1,43	1,89
Sable à granulométrie serrée (état compact)	34	0,51	19	1,75	2,09
Sable à granulométrie étalée (état peu compact)	40	0,67	25	1,59	1,99
Sable à granulométrie étalée (état compact)	30	0,43	16	1,86	2,16
Argile molle	55	1,2	45	-	1,77
Argile raide	37	0,6	22	-	2,07
Bentonite molle	84	5,2	194	-	1,27